

# MODELOVANJE I PROJEKTOVANJE FILTARA SA POVRŠINSKIM TALASIMA I NJIHOVA PRIMENA U VOJNE SVRHE

Hribšek F. Marija, Ristić S. Slavica, Radojković Ž. Bojana,  
Filipović Lj. Zoran, Institut Goša, Beograd

UDC: 621.372.852.1

OBLAST: Elektronika

## Sažetak:

*U radu su dati osnovni principi rada PAT filtara, materijali i tehnologije primenjeni u njihovoj proizvodnji. Posebna pažnja posvećena je širokoj i raznovrsnoj primeni filtara s površinskim akustičkim talasom u procesiranju signala, telekomunikacijama i u oblasti hemijskih senzora, sa naglaskom na primene u vojne svrhe. Prikazan je originalni metod koji su autori razvili za modeliranje i predikciju karakteristika PAT filtara. Mogućnosti ovog metoda su ilustrovane na primeru hemijskih senzora za detekciju bojnih otrova. Projektovan je i izrađen PAT filter PAT-FPO, koji je osnova za hemijski senzor specijalne namene.*

*Ključne reči: površinski akustički talas, PAT filter, PAT senzor, projektovanje, modeliranje.*

## Uvod

Filteri sa površinskim akustičkim talasom – PAT (surface acoustic wave – SAW) imaju važnu ulogu u modernim elektronskim i telekomunikacionim sistemima zbog specifičnih performansi i kompatibilnosti sa ostalim plenarnim tehnologijama [1–29].

Poslednjih tridesetak godina ovi filteri dostigli su visok stepen razvoja i značajne civilne i vojne primene. Prvi PAT filteri našli su primene u radarima, a zatim u telekomunikacionim uređajima, sistemima za procesiranje signala, te u mobilnim radio i telefonskim sistemima [5–9]. Poslednjih decenija prošlog veka PAT filteri su počeli da se primenjuju kao senzori. Danas se već prave PAT senzori visokog kvaliteta za merenje temperature, pritiska, mehaničkog napona, prisustva hemijskih i bioagenasa [10–29]. Među njima značajno mesto zauzimaju senzori prisustva supstanci kao što su bojni, a naročito nervni otrovi, te senzori bioloških agenasa kao što su antraks, i drugi bacili [13,16, 21, 22].

---

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

Prednosti PAT filtara nad klasičnim LC filtrima, koji obavljaju istu funkciju, jesu u tome što su mnogo manjih dimenzija (deset i više puta), veoma su pouzdani i imuni na zračenja, pasivni i bežično povezani. PAT elementi rade u frekventnom području od 10 MHz do oko 5 GHz kao filtri propusnici opsega, linije za kašnjenje sa konstantnim i disperzivnim kašnjenjem, prilagođeni filtri, kompresori, ekspanzori, korelatori i konvolveri [6, 7, 8].

Pobuđivanje površinskog akustičkog talasa električnim signalom u piezoelektričnoj podlozi pomoću tzv. interdigitalnih pretvarača otkrili su White i Voltmer 1965. godine [2]. Osnovni PAT element sastoji se od dva interdigitalna pretvarača (IDP) postavljena na podlogu od piezoelektričnog materijala, kao što je npr. kristal kvarca ili litijum niobata -LiNbO<sub>3</sub>. Interdigitalni pretvarač sastoji se od dva niza učešljanih metalnih elektroda i služi za pretvaranje električnog signala u akustički talas i obrnuto. Geometrija i broj elektroda određuju centralnu učestanost PAT filtra. Tehnologija PAT elemenata obuhvata izradu tankih filmova i proces fotolitografije koji je potpuno podudaran proizvodnji integrisanih kola što olakšava celokupan način proizvodnje ovih filtara.

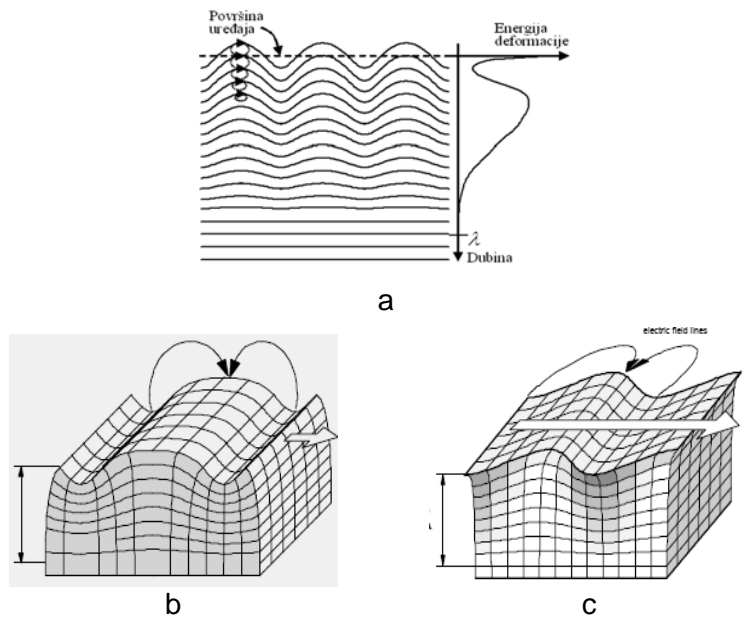
U radu su, pored uvodnih napomena, dati i osnovni principi rada PAT filtara, materijali i tehnologije primenjeni u njihovoj proizvodnji. Posebna pažnja posvećena je širokoj i raznovrsnoj primeni filtara s površinskim akustičkim talasom u procesiranju signala, telekomunikacijama i u oblasti hemijskih senzora. Prikazan je originalni metod koji su autori razvili za modeliranje i predikciju karakteristika PAT filtara. Mogućnosti ovog metoda ilustrovani su na primeru hemijskih senzora za detekciju bojnih otrova. Projektovan je i izrađen PAT filter PAT-FPO, koji je osnova za hemijski senzor specijalne namene.

## Površinski akustički talasi i piezoelektrični materijali

Kretanje površinskog akustičkog talasa, koje je otkrio lord Rejli i opisao njegova svojstva i ponašanje, ilustrovano je na slici 1.

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. 1).

Osим 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 (sl. 1b) (vertikalni talas). Transverzalni talas može da bude polarisan i tako da se čestice kreću paralelno sa podlogom (horizontalni talas – shear horizontal SH-SAW). Sreću se i tzv. cureći PAT (leaky – LSAW) i Love talasi, koji su naročito pogodni za primenu u oblasti biosenzora [4, 16, 21, 22].



Slika 1 – a) Ilustracija promene amplitude kod PAT elemenata, b) Rayleigh talasi, c) smičući vertikalni talas  
 Figure 1 – a) Illustration of the amplitudes of SAW, b) Rayleigh waves, c) shear waves

Brzina prostiranja površinskih talasa je od 3.000 do 5.000 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 elektromagnetskih talasa. Sva energija talasa (95%) praktično je vezana za površinski sloj materijala debljine do jedne talasne dužine. Amplituda ovih talasa je reda nanometra, a talasne dužine su im u opsegu od  $1 \cdot 10^{-6}$  m do  $1 \cdot 10^{-4}$  m. Tipični PAT filteri rade na frekvencijama od  $10 \cdot 10^6$  Hz do oko  $5 \cdot 10^9$  Hz.

Piezoelektrični materijali se najčešće koriste kao podloge za izradu PAT filtera. Piezoelektrični efekat je karakterističan za ove materijale i predstavlja pojavu naelektrisanja na površini materijala kada je on izložen dejstvu mehaničkog naprezanja. Taj proces je reverzibilan: primenom određenog električnog polja na piezoelektrični materijal stvara se mehaničko naprezanje. Kod piezoelektričnih PAT elemenata primenjuje se 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 filtre važno je da materijal ima veliki koeficijent elektromehaničke sprege, značajnu faznu brzinu površinskog ta-

lasa i nizak temperaturni koeficijent [1–3, 10, 12, 15, 20, 28, 29]. U tu svrhu najčešće se koristi kvarc ( $\text{SiO}_2$ ), koji je temperaturno stabilan. 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 (LGS –  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , takođe pogodan za visoke temperature), cink-oksidi ( $\text{ZnO}$ ), aluminijum-nitrid ( $\text{AlN}$ ) i aluminijum-fosfat ( $\text{AlPO}_4$ ), litijum-tetraborat ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), olovo-cirkonijum-titanat (PZT) i poliviniliden-fluorid (PvDF).

Frekvencija na kojoj rade PAT filtri na klasičnoj piezoelektričnoj podlozi je oko 1 GHz, a ograničenja su najčešće uslovljena tehnologijom izrade interdigitalnih pretvarača. Povećanje radne frekvencije dobija se korišćenjem drugih materijala za podlogu kao što su: silicijum, safir,  $\text{SiC}$  ili dijamant. Dijamant ima najveću brzinu prostiranja akustičkih talasa ( $V_L=17,52 \cdot 10^3$  m/s i  $V_T=12,82 \cdot 10^3$  m/s, nije piezoelektričan ali se koristi u kombinaciji sa tankim filmom od piezoelektričnog materijala.  $\text{AlN}$  ima brzinu prostiranja  $V_L=11,37 \cdot 10^3$  m/s i  $V_T=6,09 \cdot 10^3$  m/s, dok kvarc ima  $V_L=5,96 \cdot 10^3$  m/s i  $V_T=3,31 \cdot 10^3$  m/s.

PAT filtri imaju relativno nisku cenu 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 očvrstnuo. 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.

Za izradu elektroda obično se 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 [15].

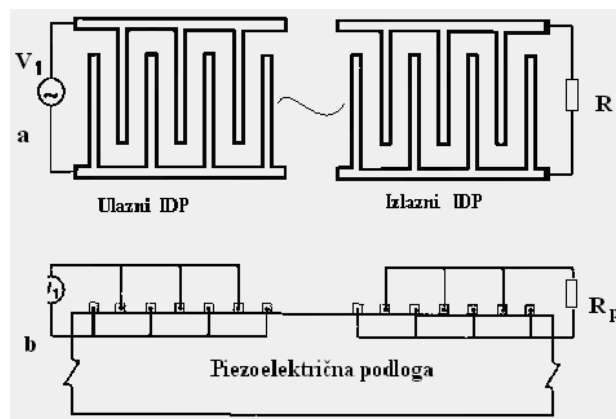
## Princip rada PAT filtera

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 su zupci-elektrode međusobno uvučeni jedni u druge (sl. 2a i 2b). Širine elektroda su reda veličine od dela mikrometra do nekoliko mikrometara. Period elektroda (rastojanje između dve susedne elektrode) je konstantan i definiše talasnu dužinu PAT. Ovo rastojanje je jednako polovini talasne dužine površinskog akustičkog talasa. Najčešće je širina elektroda jednaka njihovom međusobnom rastojanju, jer je tada koeficijent pretvaranja električne energije u mehaničku najveći.

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

1. transversalni PAT filteri sa progresivnim talasom – To su linije za kašnjenje. Kod njih se kao izlazna veličina očitava vreme kašnjenja (propagacije) ili faza izlaznog napona;

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



Slika 2 – Šematski prikaz transversalnog PAT filtera tipa linije za kašnjenje  
 Figure 2 – Schematic presentation of the transversal SAW filter, delay line type

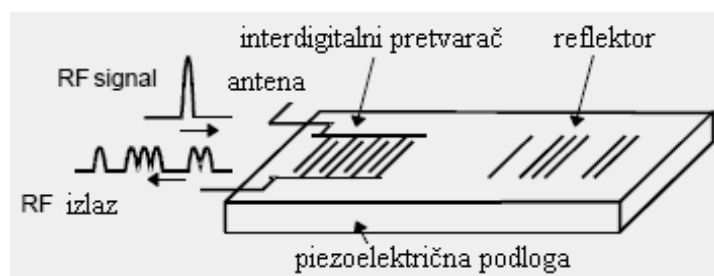
Mehanizam funkcionisanja IDP-a može se objasniti na sledeći način. Prostoperiodični napon  $V_1$  učestanosti  $f$  priključen na elektrode ulaznog pretvarača stvara električno polje koje, zbog piezoelektričnih osobina podloge, izaziva u podlozi mehanički napon usled čega se javlja talasno kretanje čestica duž površine podloge u oba smera od pretvarača. Ovaj mehanički (akustički) talas kada stigne do izlaznog pretvarača svojim mehaničkim naponom izaziva odgovarajuće električno polje koje stvara odgovarajući napon na potrošaču  $R_p$  (sl. 2).

Amplituda napona na potrošaču zavisi pre svega od odnosa talasne dužine pobudnog napona i rastojanja centara susednih elektroda  $d$ . Signal čija je talasna dužina  $2d$  imaće najveću amplitudu dok ce amplitude ostalih biti utoliko manje ukoliko su po učestanosti više udaljene od signala najveće amplitude. To znači da se PAT element u suštini ponaša kao filter propusnik opsega učestanosti.

Kod ovih elemenata od uniformnosti rastojanja između elektroda zavisi oblik fazne karakteristike, a od broja i dužine preklapanja elektroda oblik amplitudske karakteristike elementa. Ako pretvarači imaju mali broj

uniformno raspoređenih elektroda PAT element će biti širokopojasna linija za kašnjenje sa konstantnim kašnjenjem. Veličina kašnjenja određena je rastojanjem prvih elektroda pretvarača. Disperzivna linija za kašnjenje dobija se ako je jedan pretvarač uniforman sa malim brojem elektroda, a drugi sa elektrodama čije rastojanje linearno opada ili raste.

Druga vrsta PAT elemenata koristi takođe interdigitalne pretvarače, ali oni služe samo kao pretvarači za pobuđivanje i ekstrakciju signala, dok se željeni oblik karakteristike prenosa postiže na drugi način. Kod ovih elemenata, pored prostiranja, koristi se i refleksija talasa od malih prepreka na površini podloge (sl. 3). Prepreke se mogu praviti ili nanošenjem tankog sloja provodnog ili neprovodnog materijala na površnu podloge ili ukopavanjem plitkih žlebova u podlogu. Koeficijent refleksije, tj. pretvaranje pobudne snage površinskog talasa u reflektovani, zavisi od odnosa visine prepreke i talasne dužine. Rasipanje i konverzija u zapreminske (parazitne) talase su veći ako je refleksija jača. Zato se potpuna refleksija površinskih talasa može ostvariti samo sabiranjem fazno sinhronizovanih slabih refleksija od većeg broja malih prepreka. Na ovom principu rade PAT rezonatori i RAC filtri.



Slika 3 – Šematski prikaz refleksionog PAT filtra  
Figure 3 – Schematic presentation of the reflection SAW filter

## Pat filtri u obradi signala i telekomunikacijama

Linearni i nelinearni PAT elementi koriste se 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 su kepsralna analiza, spektralna analiza, promenljivo kašnjenje, te da su našli značajnu primenu u oblastima kao što su radari s kompresijom impulsa (Doplerovi procesori itd.) ili komunikacije u proširenom spektru (disperzivne linije za kašnjenje).

Razvijeni su mnogi PAT filtri za primene u radarima za kompresiju impulsa, oscilatorima, televizijskim aparatima za sva tri tipa prenosa i radio-sistemima. Osamdesetih godina prošlog veka PAT filtri su našli ogromnu primenu u mobilnim radio-sistemima i mobilnoj telefoniji. Sada se godišnje proizvodi preko tri milijarde komada različitih vrsta ovih filtara. Zbog PAT elemenata koji se koriste u savremenim telekomunikacijama, ova oblast je i dalje u intenzivnom razvoju zahvaljujući njihovim dobrim osobinama. Posebno veliko interesovanje vlada za primenu ovih komponenata u savremenim vojnim telekomunikacijama.

Kod radio-senzora koriste se i transverzalni i rezonatorski PAT elementi, ali se u oba slučaja praktično koristi refleksija. Ovde se koriste širokopojasne linije za kašnjenje, disperzivne linije za kašnjenje i PAT rezonatori. PAT element može ujedno da baš bude i senzor ili može samo da služi za prenošenje informacije koja je dobijena od samog senzora.

Postoji više različitih tipova transformacije signala, kao što su Hadamardova ili Fresnelova, koje se mogu implementirati PAT elementima ali su za primenu u tehničkim sistemima najinteresantniji procesori za analognu Furijeovu transformaciju. Furijeovi PAT procesori zasnivaju se na upotrebi ekspandora i kompresora (čirp filtri) koji dekomponuje Furijeovu transformaciju u tri računске operacije. Glavni značaj ovako primenjenog algoritma je što omogućuje da se zahtevana konvolucija može efikasno izvoditi PAT disperzivnim linijama za kašnjenje – čirp filtrima. PAT komponente su komercijalno raspoložive i omogućuju realizaciju PAT procesora sa propusnim opsegom većim od  $125 \cdot 10^6$  Hz i više od 1024 transformacionih tačaka [1, 7, 23]. U poređenju sa digitalnim FFT procesorima, analogni PAT procesori nude širokopojasni rad u realnom vremenu, malu potrošnju i imaju male dimenzije.

Analogni procesori signala sa PAT komponentama nalaze značajnu primenu u vojnim telekomunikacijama. Pre svega, primenjuju se u radarima i sonarima, potom za spektralnu i mrežnu analizu, te za sintezu različitih signala [6–9, 13]. Sinteza signala otvara mogućnost primene u sistemima širokopojasnih komunikacija sa proširenim spektrom.

Pored primene za izračunavanje tzv. vremenske Furijeove transformacije, PAT procesori mogu se upotrebiti i za prostornu Furijeovu transformaciju kao kod sonara, npr. za uobličavanje snopa i kompresiju impulsa u pasivnim prislušnim sistemima, te za dobijanje slike morskog dna. Hibridni PAT, digitalni procesori omogućuju obradu signala frekventnog opsega do  $1 \cdot 10^8$  Hz i trajanja  $100\text{--}200 \cdot 10^{-6}$  s [8]. U takvim hibridnim sistemima do 100 snopova može biti upotrebljeno u slušnom opsegu od 10 Hz do  $2 \cdot 10^3$  Hz. Upotrebom PAT čirp filtara sa propusnim opsegom  $B = 40 \cdot 10^6$  Hz i  $T = 1 \cdot 10^{-4}$  s može se ostvariti rezolucija od 2 Hz na 1000 tačaka.

PAT procesorska tehnika može se korisno upotrebiti za dvodimenziono snimanje terena radarom. Primena radara uključuje elektronski podrža-

no merenje za brzu spektralnu analizu dolaznih signala. Upotrebom kombinacije više PAT Furijeovih procesora sa drugim elementima kola moguće je realizovati sofisticirane funkcije u obradi signala kao što su npr. kepsralna analiza, programabilna korelacija ili filtriranje propusnikom opsega s promenljivim opsegom, koje imaju značajne vojne primene.

Sposobnost filtriranja ovakvom strukturom PAT procesora realnog vremena u vojnim sistemima komunikacije s proširenim spektrom može se porediti sa onom koja se ostvaruje sa prijemnicima direktne sekvence (DS) bez filtera za prigušenje. Tako, konvencionalni DS prijemnik zahteva pojačanje u opsegu 255–511, za istu verovatnoću greške, kao PAT procesor sa procesnim pojačanjem 31[8]. PAT procesori u sistemima zaštite od ometanja mogu zahtevati dinamički opseg od 80 dB za opsluživanje varijacija u nivou ulazne snage.

Veoma značajno mesto u obradi signala u komunikacionim sistemima imaju fazno kodirani PAT filtri. Oni služe za generisanje i obradu kodiranih signala u vremenskom domenu. Najpoznatiji i najčešće korišćen ovakav signal je binarni PSK (fazno kodirani – phase shift keyed) signal. Zahvaljujući fleksibilnosti izrade PAT pretvarača može se ostvariti kodiranje sa proizvoljnim vrednostima faze.

U PAT tehnologiji mogu se napraviti i složena kola sa više ulaza i izlaza pogodna za izvođenje kompleksnih operacija sa više ulaznih i izlaznih promenljivih, kao što je linearna transformacija matrica. Primer takvog složenog kola je u procesiranju slike u tzv. Hadamardovom transformatoru video signala čiji je rad definisan zadatom matričnom jednačinom [Hen73].

## Pat filtri u sensorima različitih fizičkih veličina

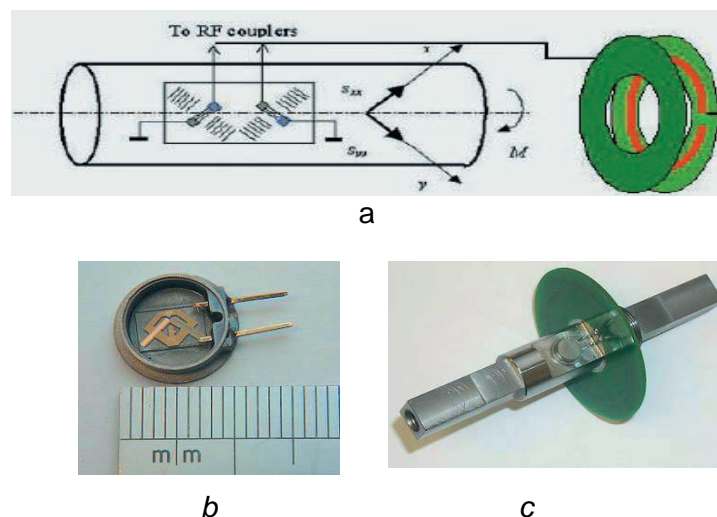
Senzori različitih fizičkih i hemijskih veličina razvijaju se za potrebe industrije, poljoprivrede, ekologije, medicine, za mirnodopske i vojne svrhe. PAT filtri su najznačajnija komponenta posebnih tipova senzora za merenje različitih neelektričnih fizičkih veličina. Princip rada PAT senzora se zasniva na činjenici da merena veličina (temperatura, pritisak) utiče na prostiranje talasa tako što manje ili njegovo slabljenje ili kašnjenje. Ako se senzor zagreva, isteže ili opterećuje, menjaju se dužina podloge i nje-ne elastične konstante. Ove promene izazivaju promene faze i brzine kretanja talasa, koje pak izazivaju odgovarajuće promene centralne učestanosti, slabljenja i kašnjenja.

Prvi PAT senzori su napravljeni za merenje pritiska. Razvoj i primena PAT senzora u medicini i zaštiti životne sredine naročito je porasla početkom 21. veka. Među njima značajno mesto zauzimaju senzori prisustva hemijskih supstanci kao što su bojni, a naročito nervni otrovi, i senzori bioloških agenasa. Posebna pogodnost PAT senzora je mogućnost



bežičnog pristupa (radio senzori), pa se mogu koristiti za daljinski monitoring i merenja, posebno na nepristupačnim mestima. PAT senzori se koriste za bežično merenje temperature, pritiska, mehaničkih napona, uvijanja, ubrzanja, trenja između gume i puta i vlažnosti. PAT senzori koji se nazivaju identifikacioni markeri (ID marker) koriste se za identifikaciju pokretnih objekata i delova. Ovi senzori rade i na visokim temperaturama i u okruženjima opasnim po čoveka. PAT senzori imaju kompaktnu strukturu, malu težinu i zapreminu, izvrsnu stabilnost, veliku osetljivost, nisku cenu izrade u velikim serijama, veoma kratko vreme odziva. Zahvaljujući načinu proizvodnje koji je kompatibilan sa CMOS i MEMS tehnologijom, mogu se ugraditi u kompleksne sisteme merenja i monitoringa. Interesantno je da se u sistemima kontrole zagađenja isparljivim organskim materijalima u prostorijama gde se prave satelitske i vasionke letilice u SAD, NASA, koriste senzorski sistemi bazirani na PAT sensorima.

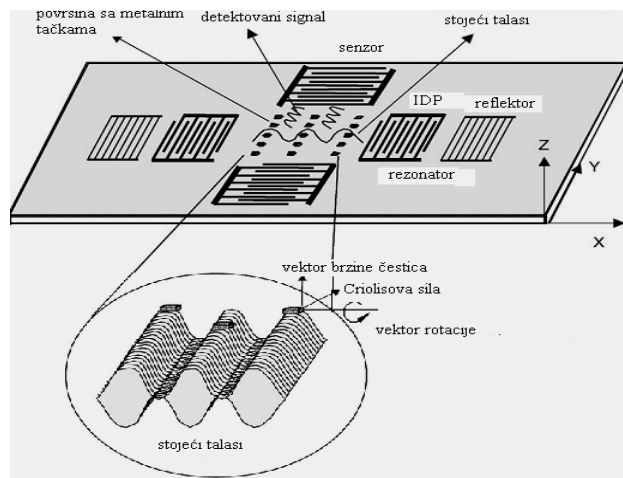
Do sada je instalirano više PAT identifikacionih sistema u industriji vozila, kontroli saobraćaja, za praćenje kontejnera za prevoz robe i za pakovanje proizvoda. U automobilima i kamionima koristi se do sedam bežičnih sistema i 15 PAT senzora po vozilu za merenje uvijanja, pritiska i temperature: tzv. EPAS senzor uvijanja, senzori uvijanja svih osovina (menjača, osovina točkova itd.), sistem za monitoring pritiska u gumama (TPMS) i trenja između gume i kolovoza. Na slici 4 prikazan je PAT senzor za merenje torzije, koji se može instalirati na sva bojna vozila, transportere, tenkove ...



Slika 4 – Šematski prikaz (a) i fotografije PAT senzora (b) i (c) za merenje torzije  
 Figure 4 – Schematic presentation (a) and photos of SAW sensors (b) and (c) for torsion measurements

Mehanička naprezanja se mere 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 prenose se na senzore, koji se sa jedne strane šire, a sa druge komprimuju. Zbog toga se menja srednja frekvencija izlaznog signala. Signal se prenosi bežično. Obrada se vrši kompariranjem srednjih frekvencija i amplituda signala. Monitoring trenja između gume i kolovoza je ključan za stabilizaciju vozila u kritičnim situacijama. Pored toga, radio PAT senzori koriste se i za identifikaciju vozila, praćenje temperature izduvnog lonca i detekciju izduvnih gasova. PAT senzori koriste se za merenje temperature kočnica šinskih vozila, visokonaponskih vodova i rotora asinhronih motora velike snage. Za merenje temperature u visokim pećima koriste se radio PAT senzori na langasitu sa zlatnim elektrodama.

PAT senzori su našli brojne različite primene u industriji kao delovi složenih sistema za bežično, beskontaktno i nedestruktivno merenje i monitoring. Interesantna je primena [31] PAT filtara u žiroskopima, koji imaju i vojnu i civilnu primenu. Pat žiro senzori se prave na  $128^\circ$  Y-sečenog  $\text{LiNbO}_3$  (sl. 5). Koriolisove sile generišu sekundarne površinske akustičke talase koji su ortogonalni sa primarnim talasima.



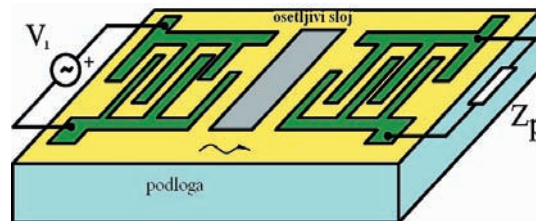
Slika 5 – Žiroskopski PAT senzor  
Figure 5 – SAW gyroscope sensor

## Hemijski PAT senzori

Hemijski senzori na bazi PAT elemenata predstavljaju jednu veliku grupu senzora koja se može razvrstati prema tome da li se koriste za detekciju gasovitih ili tečnih reagenasa, na kojoj podlozi su rađeni [4, 10, 11, 18–25, 28, 29].

Rad gasnog transversalnog PAT senzora (sl. 6) zasniva se na reverzibilnoj apsorpciji gasa u naneti osetljivi materijal, najčešće polimer. Osetljivost ovih senzora je velika jer registruju promene mase na površini reda  $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2$ .

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. Amplituda talasa opada sa dubinom po eksponencijalnom zakonu (sl. 1), tako da je praktično cela energija talasa sadržana u gornjem sloju podloge debljine jedne talasne dužine pobudnog signala.



Slika 6 – Hemijski PAT senzor  
Figure 6 – Chemical SAW sensor

Izlazni signal je napon na opterećenju izlaznog IDP-a. Masa i viskoznost tankog sloja utiču na promenu brzine i slabljenja akustičkog talasa. Tanki sloj polimera apsorbira gas tako da će se srazmerno količini apsorbovanog gasa dodatno promeniti brzina i faza akustičkog signala. Interdigitalni pretvarači su 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 projektuje se 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 određeni geometrijom IDP-a i osobinama piezoelektrične podloge [23, 26, 28].

Piezoelektrična podloga je najčešće kvarc. Hemijski senzori rade na centralnoj frekvencija oko  $1 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ . Brzina prostiranja i slabljenje površinskih akustičkih 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. Osetljivost senzora je srazmerna kvadratu centralne frekvencije.

Senzori obično imaju ugrađene grejne elemente uz pomoć kojih se vrši desorpcija.

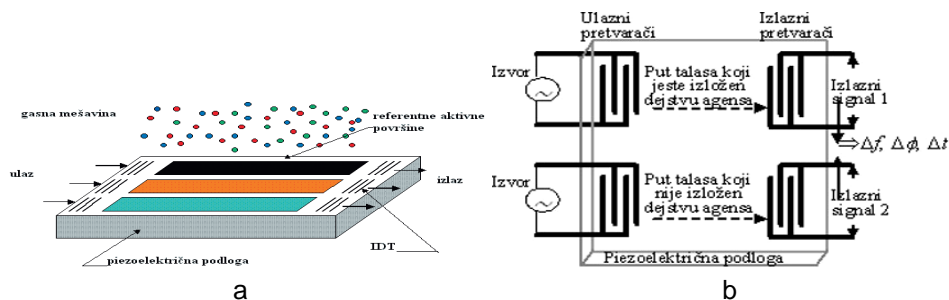
Proizvođači hemijskih senzora za specijalne namene koriste umesto kvarca podloge od GaAs, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, i GaP. Izrađuju se senzori koji rade pri veoma visokim temperaturama i preko 1000°C. Uređaji su prenosivi i opremljeni softverom za dobijanje podataka u realnom vremenu. Hemijski osetljivi sloj se obično izrađuje od čistih ili pomešanih plemenitih metala, različitih polimera, u veoma tankom filmu sa debljinom reda nekoliko nm.

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

Rezonatorski tip senzora je novijeg datuma u odnosu na transversalni koji se 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.

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 često koristi diferencijalni način merenja sa referentnim sensorom u istim ostalim uslovima, ali na koji ne utiče merena veličina. Kao izlazni podatak koristi se 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 povećava se osetljivost senzora i eliminiše dejstvo nekih neželjenih faktora (npr. fluktuacije temperature). Na slici 7 prikazana je šema principa rada transversalnog, diferencijalnog PAT senzora za a) istovremenu detekciju tri različita gasa i b) PAT sensor sa dve linije za kašnjenje.

Ulazni, odnosno izlazni pretvarač kod bilo kog od ova dva tipa senzora, ne mora da bude direktno vezan za izvor, već se može napajati preko antene sa udaljenog izvora. Na taj način dobijaju se 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).



Slika 7 – Transverzalni PAT senzor diferencijalnog tipa  
Figure 7 – Differential type transversal SAW sensor

Prvi hemijski senzor napravljen je 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 [18].

Savremeni trend razvoja hemijskih senzora uključuje korišćenje nanotehnologija. Na primer, na podlogu od kvarca nanosi se sloj  $\text{SiO}_2$ , za izolaciju elektrode od sloja ugljeničnih nanocevi koji je aktivan senzorski sloj. Sloj od fulerena koristi se za detekciju organskih isparenja. Nanotehnologije su primenjene i pri izradi senzora za vodonik koji imaju osetljivi sloj sačinjen od amorfno  $\text{TiO}_2$  dopiranog koloidnim zlatom, sol-gel tehnologijom na podlozi  $64^\circ \text{YX LiNbO}_3$  [25].

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

U prenosivim uređajima za detekciju hemijskih reagenasa obično ima više senzora sa različitim aktivnim premazima, koji istovremeno mogu da detektuju različite supstance (sl. 7a). Osim identifikacije, oni pokazuju i koncentraciju. Pored industrijske i vojne primene, ovi senzori su nezamenljivi u ekološkom monitoringu. Na slici 8 dati su primeri komercijalnih senzora na bazi PAT elemenata [16, 18, 25].

## PAT senzori bojnih otrova

Hemijski bojni otrovi su snažno oružje i najčešće ne mogu biti detektovani golim okom kao klasično oružje. Zbog toga je veoma bitno koristiti senzore koji mogu da ih detektuju pre nego što živa sila oseti delovanje otrova.

PAT senzori su našli široku primenu u detektorima za brzo i precizno otkrivanje i identifikaciju hemijskih bojnih otrova [1, 11, 16, 18–24, 28, 29]. Performanse detektora na bazi PAT senzora razlikuju se od proizvođača. Dinamički opseg tipičnih PAT detektora kreće se približno od 1 pikogram do 1 mikrogram hemijskog agensa, u kontrolisanom temperaturnom opsegu, jer za temperature izvan radnog režima dolazi do promene fiziko-hemijskih osobina polimernog sloja PAT senzora.

Firma Microsensor Systems Inc. proizvodi detektore bojnih otrova na bazi PAT tehnologije. Primer HAZMATCAD Plus™ (slika 8a) je senzor koji otkriva plikavce, nervne i krvne bojne otrove. Nervne otrove identifikuje u koncentracijama od 0.04 do 0.14 ppm za 20 s, kada radi u brzom režimu, ili u koncentracijama od 0.01 do 0.03 ppm za 120 s kada je izabrana opcija povećane osetljivosti [25].

SAW MiniCAD mk II Detector (slika 8d) je savremen detektor nervnih bojnih otrova i plikavaca za personalnu primenu. Izrađuje ga firma MSA Safety company. Lak je za upotrebu sa veoma sofisticiranim sistemom za pouzdan rad. Za manje od 60 s detektuju se i identifikuju sledeći bojni otrovi u navedenim koncentracijama: GA  $0.2 \cdot 10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>, GB  $0.5 \cdot 10^{-6}$  kg/ m<sup>3</sup>, GD  $0.1 \cdot 10^{-6}$  kg/ m<sup>3</sup>, HD  $1.0 \cdot 10^{-6}$  kg/ m<sup>3</sup>.



Slika 8 – Komercijalni hemijski senzori na bazi PAT filtera  
Figure 8 – Commercial chemical SAW sensor devices

U svetu se sprovode intenzivna istraživanja orijentisana ka poboljšanju selektivnosti i povećanju osetljivosti PAT senzora. Za detekciju hemijskih bojnih otrova na bazi PAT tehnologije koriste se senzori u kojima je osetljivi sloj najčešće polimer (primer polydimethylsiloxane). Takođe, koriste se polimeri na bazi fenola (phenol, BSP3) kada se traži povećana selektivnost za sarin [18].

PAT detektori rezonatorskog tipa su veoma perspektivni za vojne primene što pokazuju najnovija istraživanja. U radu [12] je prikazano da je povećana osetljivost detekcije gasnih hemijskih bojnih otrova, kada se kao osetljivi sloj koriste: polyepichlorohydrin (PECH), Silicone (SE-30), Hexafluoro-2-propanol bisphenol-substituted siloxane polymer (BSP3) i fluorinated polymethylsiloxane (PTFP).

Tehnologija izrade savremenih senzora prati razvoj novih toksičnih materija koji se koriste kao oružje ili su neželjeni produkti u hemijskoj industriji. Zavisnost od uvoznih tehnologija u oblasti detekcije i zaštiti od toksičnih materija nije dobra za bezbednost ljudi u slučaju akcidenata ili oružanih sukoba. Imajući ovo u vidu, kod nas se u okviru materijalnih i kadrovskih mogućnosti sprovode istraživanja u oblasti PAT senzora i njihova primena u detekciji hemijskih toksičnih materija.

## Projektovanje PAT filtera za primene u telekomunikacijama i u hemijskim senzorima

Projektovanje se sastoji od nekoliko koraka: izbor materijala podloge, izbor konfiguracije pretvarača, određivanje impulsnog odziva pretvarača, izračunavanje geometrije pretvarača, određivanje geometrije maske. Postupak projektovanja filtera počinje izborom materijala podloge, izborom konfiguracije pretvarača, proračunom impulsnog odziva pretvarača ... Ključnu ulogu u ostvarenju zahtevane PAT frekvencijske karakteristike ima određivanje odgovarajućeg razmeštaja i dužine elektroda IDP-a. S obzirom na to da se svaki IDP može tretirati kao struktura za uzorkovanje u vremenskom domenu analogna digitalnom FIR filtru, to se za projektovanje IDP-a mogu upotrebiti metode projektovanja ovih filtera [25–27]. Postupak sadrži više koraka:

- na osnovu zadatih specifikacija biraju se podloga i konfiguracija pretvarača;
- određuje se impulsni odziv pretvarača.
- iz impulsnog odziva izračunava se raspored elektroda i relativna funkcija preklapanja elektroda tj. apodizacija;
- određuje se geometrija IDP-a i PAT filtra u celini;
- određuju se elementi kola za spregu i apertura pretvarača;
- izračunavaju se karakteristični parametri filtra uzimajući u obzir da IDP-i nisu idealni transverzalni filtri.

Kao podlogu najčešće se koriste litijum-niobat i ST kvarc. Karakteristični parametri upotrebljenog materijala koji utiču na performanse projektovanog elementa su: koeficijent piezoelektrične sprege, brzina površinskih talasa, temperaturni koeficijent brzine i kašnjenja, parametar anizotropije, gubici usled propagacije... Ova svojstva materijala moraju se razmatrati u kontekstu izabranog tipa pretvarača i upotrebljenog prilagođenja.

Na izbor tipa piezoelektrične podloge utiče više parametara, a najvažniji je temperaturna osetljivost. Naime, poznato je da ST kvarc ima mnogo manji temperaturni koeficijent ( $^{\circ}0$ ) od litijum-niobata ( $-90 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ) tako da za filtre propusnike opsega sa veoma malom relativnom širinom opsega (ispod 5) mora se koristiti ST kvarc. Međutim, filtri načinjeni na podlozi od ST kvarca imaju veliko uneseno slabljenje što je posledica malog koeficijenta sprege. Uzevši u obzir i druge sekundarne efekte (brzina prostiranja, difrakcija, veličina podloge, ...), proizilazi da ST kvarc ima prednost uvek kada je relativna širina opsega ispod 10 ili ako su potrebna veća kašnjenja na višim učestanostima.

Konvencionalni pristup u izboru konfiguracije pretvarača umnogome zavisi od izbora podloge. Ako se koristi podloga od ST kvarca onda se ne može koristiti višeelektrodni sprežnik MSC, zbog malog koeficijenta piezoelektrične sprege, pa se izbor svodi na dve mogućnosti:

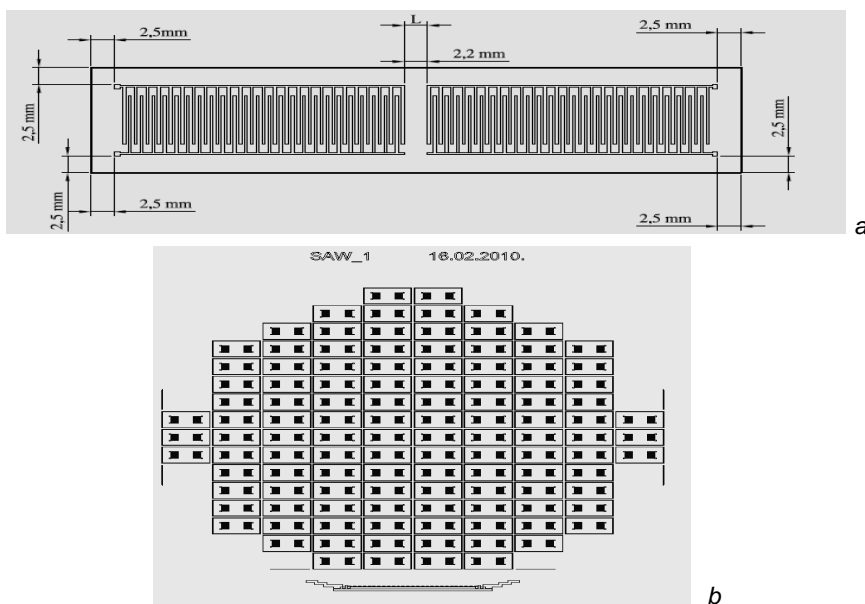
- jedan apodizovani IDP i jedan ponderisan uklanjanjem elektroda
- jedan apodizovani i jedan uniformni pretvarač sa malim brojem elektroda.

Prvi metod daje bolje rezultate, ali je drugi znatno jednostavniji. U okviru ovog istraživanja korišćen je drugi metod. Ukoliko je podloga od litijum-niobata onda je zbog većeg koeficijenta sprege najpovoljnije koristiti kombinaciju sa dva apodizovana pretvarača razdvojena višeelektrodnim sprežnikom.

Određivanje impulsnog odziva pretvarača je i najsloženija a uz to je i najvažnija faza projektovanja filtra sa površinskim talasima, jer omogućuje određivanje frekvencijske karakteristike PAT filtra. Koristeći analogiju između PAT nedisperzivnih filtara i digitalnih FIR filtara, moguće je upotrebiti mnogobrojne tehnike razvijene za projektovanje FIR filtara na osnovu zadatih specifikacija.

Na osnovu ovih principa, napravljen je algoritam i univerzalni softver za projektovanje nedisperzivnih PAT filtara različitih filtarskih karakteristika, koji predstavlja originalno tehničko rešenje.

Na osnovu algoritma formiran je računarski program, primenom MATLAB-a, za projektovanje nedisperzivnih PAT filtara propusnika opsega koji je fleksibilan u tom smislu da omogućuje sintezu svih filtara čija je konfiguracija sastavljena od interdigitalnih pretvarača ponderisanih apodizacijom. Ulazni podaci, određeni na osnovu zadatih specifikacija, unose se u računar, kroz interaktivni dijalog. Program omogućava prikaz dobijenih, numeričkih i grafičkih, rezultata i specifikacija na osnovu kojih je projektovan filter. Pored ovog softvera razvijen je i softverski modul za projektovanje maske IDPa sa minimalnim slabljenjem [27]. Projektovana maska prikazana je na slici 9.



Slika 9 – Shematski prikaz maske za izradu filtra; a) pojedinačna maska, b) raspored filtara na podlozi

Figure 9 – Schematic presentation of the mask layout, a) single filter mask, b) distribution of filters on wafer

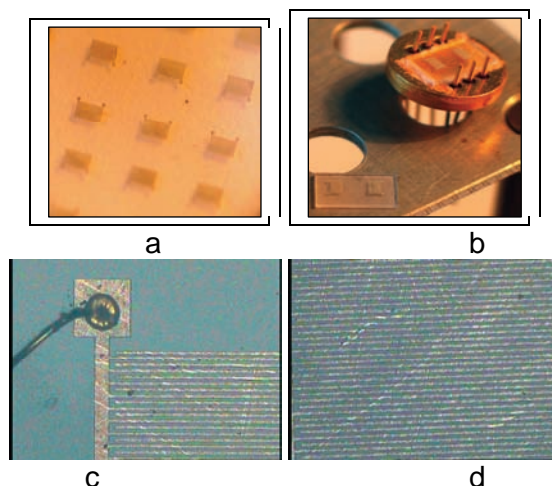


S obzirom na tehnološke mogućnosti izrade PAT filtera u našoj zemlji, projektovan je jednostavan višenamenski PAT filter propusnik opsega učestanosti koji se može koristiti u obradi signala i telekomunikacionim sistemima kao međufrekventni filter ili kao linija za kašnjenje u kolu oscilatora. Pored toga, sa određenim dodacima može se koristiti i kao senzor različitih namena. Projektovan je filter za centralnu učestanost od  $71,72 \cdot 10^6$  Hz sa identičnim pretvaračima sa uniformno raspoređenim elektrodama istih dužina na podlozi od kvarca. Broj elektroda odabran je tako da se dobije minimalno slabljenje u propusnom opsegu filtera. Laboratorijski prototip PAT FPO je prikazan na slici 10.

Rastojanje između centara susednih elektroda iznosi  $22 \cdot 10^{-6}$  m, a rastojanje između pretvarača  $2,2 \cdot 10^{-3}$  m. Na ivice podloge nanet je apsorber kojim se eliminišu smetnje usled refleksije talasa. Priključci su spojeni sa krajevima interdigitalnih pretvarača termokompresionim bondovanjem zlatnom žicom debljine  $25 \cdot 10^{-6}$  m. Podloga od ST kvarca je zalepljena silikonskim gitom na pozlaćene donje delove kućišta.

Izrada PAT filtra počinje izradom maske direktnim laserskim osvetljavanjem na hromnoj fotoploči na uređaju LW405. Na kvarcnu pločicu od 0,0762 m firme SAWER nanosio se aluminijum debljine  $0,5 \cdot 10^{-6}$  m u uređaju za spaterovanje Perkin Elmer.

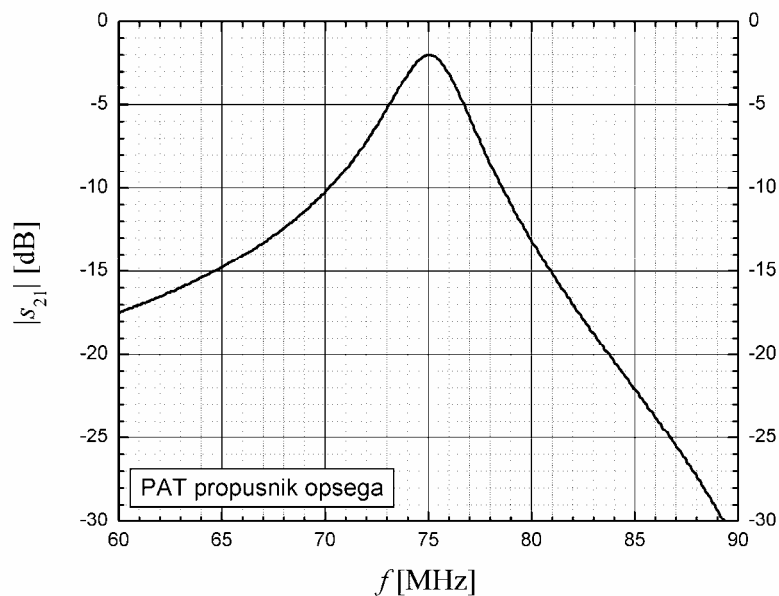
Na pločicu sa aluminijumom nanesen je negativan rezist N1410 i izvršen je fotopostupak korišćenjem maske, na uređaju sa dvostranim podešavanjem EVG 620. Pločica je sečena na uređaju Cambridge Microslice 4. Dobijeni PAT filteri postavljeni su i zalepljeni silikonskim gitom na pozlaćena kućišta sa šest priključaka – pinova. Ulazni i izlazni krajevi filtera spojeni su na četiri spoljašnja pina termokompresionim bondovanjem zlatnom žicom debljine 25  $\mu$ m. Kućišta su zatvorena kاپicama od poliamida.



Slika 10 – Fotografije prototipa PAT-FPO; a) PAT filteri na pločici, b) PAT filter na pozlaćenom kućištu, c) i d) segmenti interdigitalnih pretvarača filtera PAT\_FPO [6]

Figure 10 – Photographs of the **PAT-FPO** laboratory prototype

Merenja koja su izvršena na gotovom prototipu (analizatorom mreža Agilent ENA-L E5062A) pokazuju da je centar propusnog opsega **PAT-FPO** na učestanosti  $75 \cdot 10^6$  Hz, propusni opseg je  $2 \cdot 10^6$  Hz. Izmerena ulazna/ izlazna impedansa je  $65 \Omega$ .



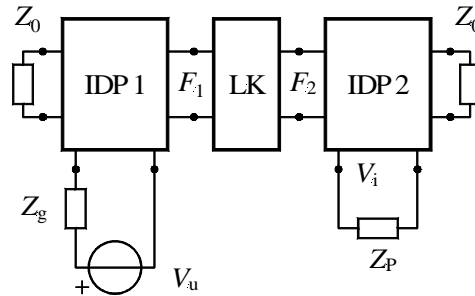
Slika 11 – Izmereni parametar  $S_{21}$  laboratorijskog prototipa **PAT-FPO**  
 Figure 11 – Measured parameter  $S_{21}$  of the **PAT-FPO** laboratory prototype

## Modelovanje PAT senzora za bojne otrove

Modeliranje PAT senzora je neophodni deo projektovanja koji ubrzava i pojeftinjuje ceo postupak. U okviru istraživanja PAT filtera, razvijen je originalni metod modeliranja, koji se zasniva na ekvivalentnom električnom kolu PAT senzora. Mogućnosti koje ovaj metod pruža biće prikazani kroz modelovanje PAT senzora za bojne otrove.

U teoretskim istraživanjima za predikciju detektovane koncentracije i identifikaciju bojnih otrova potrebno je napraviti model PAT senzora koji omogućava brzo, precizno i efikasno određivanje zahtevanih parametara.

Na slici 10 je šematski prikazano ekvivalentno električno kolo senzora namenjenog detekciji gasova koji simuliraju bojne otrove [22–29].



Slika 12 – Ekvivalentna šema PAT senzora  
 Figure 12 – Equivalent circuit of the SAW sensor

Konfiguracija prikazana na slici 6. može se predstaviti ekvivalentnom šemom sa slike 12, gde su interdigitalni pretvarači predstavljeni mrežom sa tri para krajeva, a linija za kašnjenje mrežom LK sa dva para krajeva. Karakteristična akustička impedansa neopterećene podloge je označena sa  $Z_0$ .

Promena izlaznog napona na opterećenju  $V_i$  je proporcionalna masi kojom je opterećen senzorski deo, tj. linija za kašnjenje. Prvo se određuje izlazni napon kada je linija za kašnjenje opterećena samo polimernim filmom koji apsorbuje odgovarajući gas. Ovaj napon će biti referenca  $V_b$ . Razlika između ovog napona i izlaznog napona koji se dobija u prisustvu gasa biće proporcionalna koncentraciji gasa u okruženju (vazduhu). U nekim slučajevima ovaj napon direktno se meri, ali je češće senzor deo složenog mernog sistema. U tom slučaju prave se dva identična senzora od kojih se samo jedan izlaže uticaju gasa, a drugi služi kao referenca. Najčešće se svaki od ova dva senzora uključuje u kolo oscilatora. Razlika učestanosti oscilovanja ova dva oscilatora je srazmerna koncentraciji gasa. Prema slici 7 električna funkcija prenosa može se izraziti formulom:

$$|T(f)| = \left| \frac{V_i}{V_u} \right| = |T_1(f)|^2 \left| \frac{F_2}{F_1} \right| \quad (1)$$

$T_1(f)$  je prenosna funkcija jednog pretvarača. Pošto senzor radi u okolini centralne učestanosti,  $T_1(f)$  je konstanta koja zavisi od geometrije pretvarača.

Električne veličine su dobijene na osnovu analogije sa mehaničkim veličinama (brzina prostiranja akustičkog talasa  $v$  i sila  $F$ ) koje su promenljive veličine. Brzina prostiranja talasa direktno zavisi od tipa osetljivog sloja i količine apsorbovanog agensa. Kao rezultat analize dobijaju se formule koje daju promenu izlaznog napona (2) ili učestanosti (3) u funkciji koncentracije gasa.

$$\frac{\Delta V_{\text{vap}}}{V_b} = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_p} \frac{\Delta V_i}{V_0} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta f_{\text{vap}}}{f_0} = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_p} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (3)$$

gde je:

$\Delta V_{\text{vap}}$  je promena izlaznog napon izazvana apsorbovanim agensom,  $\Delta V_i$  je promena izlaznog napona koju izaziva sloj polimera u odnosu na izlazni napon bez prisustva polimera,  $\rho_{\text{vap}}$  je gustina gasa, a  $\rho_p$  je gustina polimera. Učestanost  $f_0$  je radna učestanost senzora određena geometrijom pretvarača,  $\Delta f_{\text{vap}}$  je promena učestanosti koju izaziva prisustvo gasa,  $\Delta f$  je promena koju izaziva polimer.

Iz navedenih formula može da se izvede izraz za određivanje koncentracije detektovanog gasa  $C_v$ :

$$C_v = \frac{\Delta f_{\text{vap}}}{\Delta f} \frac{\rho_p}{K} = \frac{\Delta V_{\text{vap}}}{\Delta V_i} \frac{\rho_p}{K} \quad (4)$$

U formuli (4) koeficijent  $K$  predstavlja odnos koncentracije apsorbovanog gasa u polimeru i koncentracije istog u okruženju.  $K$  zavisi od tipa polimera i vrste gasa koji se detektuje. Iznos koeficijenta  $K$  zavisi od jedinica kojima se izražavaju koncentracije. Faktor  $K$  se bira tako da se dobi je maksimalna osetljivost senzora za detektovani gas.

Predloženi metod analize je primenjen na senzor centralne učestanosti 99 MHz za predikciju koncentracije gasova koji simuliraju bojne otrove. Podloga je kvarc. Rastojanje između pretvarača 1.500 $\mu\text{m}$  je sa aperturom od 1.800 $\mu\text{m}$  Polimer je poliepihlorohidrin (PECH), a gas dihlorometan ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , DCM). Podaci koji su korišćeni u izračunavanjima su:  $\rho_s=2620 \text{ kg/m}^3$ ,  $v=3158 \text{ m/s}$ ,  $k^2=0,0014$ ,  $C_s=50,3385\text{p}\cdot 10^{-7} \text{ F/m}$ ,  $N_p=100$ ,  $\rho_p=1360 \text{ kg/m}^3$ ,  $h_p=0,34\cdot 10^{-6} \text{ m}$ ,  $V=24,461/\text{mol}$ ,  $MW=85\cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ,  $K=10^{2,0743}$ .

Za koncentraciju od 5 ppm DCM-a, izračunati pomeraj učestanosti je 584 Hz. Za istu koncentraciju istog gasa na polimeru PIB izračunata vrednost pomeraja je približno 200 Hz.

Predloženi metod predikcije koncentracije gasa verifikovan je eksperimentalnim rezultatima iz [20]. Eksperimenti su rađeni bez ikakvog prethodnog proračuna sa senzorima na kvarcu sa centralnim učestanostima od 39,6, 99, 132, 198, i 264 $\cdot 10^6$  Hz, raznim polimerima i za tri gasa koji

simuliraju bojne otrove. Polimeri poliizobutilen (PIB), poliepihlorohidrin (PECH), i polidimetilsiloksan (PDMS) su ravnomerno naneti na celu površinu linije za kašnjenje. Rastojanje između pretvarača je  $1,5 \cdot 10^{-3}$  m sa aperturom od  $1,8 \cdot 10^{-3}$  m. Karakteristike su merene direktno mrežnim analizatorom E-5061A.

Za koncentraciju od 5 ppm DCM-a izmerena vrednost pomeraja učestanosti je 574 Hz [30]. Za istu koncentraciju istog gasa na polimeru PIB nije bilo moguće izmeriti odgovarajući pomeraj [29]. To se može objasniti činjenicom što je konstanta  $K$  u ovom slučaju oko tri puta manja, pa je prema tome i detektovani signal tri puta manji, što je verovatno ispod granice osetljivosti analizatora.

Za detekciju štetnih gasova kao što su CO, NO<sub>2</sub> i COCl<sub>2</sub>, u PAT sensorima se kao osetljivi slojevi koriste sa velikim uspehom tanki filmovi nanokompozitnog materijala na bazi provodnog polianilina [4, 5]. Bezbedna, dozvoljena koncentracija fozgena za žive organizme je 0,1 ppm. Nemodifikovan polianilin ne može da ga detektuje na toj koncentraciji. Istraživanja su pokazala da kompozitni materijali polianilinskih nanovlakana sa aminima daju dobar odgovor za detekciju fozgena pri koncentraciji manjoj od 0,01 ppm. Odgovor ka fozgenu se puno razlikuje između korišćenih amina i njihovih soli.

Na bazi razvijene metode modeliranja napravljeni su i konkretni proračuni za gasove za koje postoje eksperimentalni podaci u literaturi [29, 30]. Za sloj polianilin/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> debljine  $0,4 \cdot 10^{-6}$  m na LiNbO<sub>3</sub> kod PAT senzora učestanosti  $107,2 \cdot 10^6$  Hz, promena učestanosti izazvana koncentracijom CO od 500 ppm, izračunata korišćenjem jed. (1), iznosi  $2,016 \cdot 10^3$  Hz. Za isti senzor za koncentraciju NO<sub>2</sub> od 2,12 ppm promena učestanosti iznosi  $2,28 \cdot 10^3$  Hz.

Za sloj polianilin/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> debljine  $0,4 \cdot 10^{-6}$  m na kvarcu PAT senzora učestanosti  $107,2 \cdot 10^6$  Hz promena učestanosti izazvana koncentracijom CO od 500 ppm, iznosi  $3,58 \cdot 10^3$  Hz. Za isti senzor za koncentraciju NO<sub>2</sub> od 2,12 ppm promena učestanosti iznosi  $4,05 \cdot 10^3$  Hz. U [30] prikazani su eksperimentalni rezultati za CO i NO<sub>2</sub> PAT senzore SH tipa učestanosti  $107,2 \cdot 10^6$  Hz, sa slojem polianilin/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na LiNbO<sub>3</sub>. Autori navode da: promena učestanosti izazvana koncentracijom CO od 500 ppm iznosi  $2 \cdot 10^3$  Hz i promena učestanosti izazvana koncentracijom NO<sub>2</sub> od 2,12 ppm, iznosi  $2,5 \cdot 10^3$  Hz.

Numeričke vrednosti dobijene na osnovu prikazanog modela PAT senzora veoma se malo razlikuju od eksperimentalnih rezultata, jer model daje relativno uprošćenu sliku PAT senzora i ne uzima u obzir slučajne uticaje i greške tokom izrade senzora i tokom merenja.

Mnogo je jeftinije i brže modelovati prema željenim karakteristikama senzora, a onda ga napraviti i testirati. Imajući ovo u vidu senzori se sve više prvo modeluju, pa se onda projektuju, proizvode i testiraju.

## 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 PAT filtri u telekomunikacijama i 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 i u obradi signala u realnom vremenu. Posebno se danas širi i razvija njihova primena u senzorima.

Prikazan je deo originalnih rezultata modelovanja PAT senzora koji su namenjeni detekciji pomenutih gasova. Rezultati dobijeni na bazi sopstvenog modela poređeni su sa rezultatima iz literature. Pokazano je da se ovim načinom modelovanja može uspešno odrediti koncentracija bojnih otrova i drugih štetnih gasova u okruženju.

### Literatura

- [1] Matthews, H., *Surface Wave Filters*, John Wiley, New York, 1977.
- [2] White, R. M., Voltmer, F.W., *Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves*, Appl. Phys. Lett., 7/1965, str. 314–316.
- [3] Hribšek, M., *Kola sa površinskim talasima – SAW*, Nauka, Tehnika, Bezbednost, 2/1995. , str. 3–13.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Feldman, M., Henaff, J., *Surface Acoustic Waves for Signal Processing*, Artech House, London, 1989.
- [7] Jack, M. A., Grant, P. M., *The Theory, Design, Applications of SAW Fourier-Transform Processors*, Proc. IEEE, 68/1980, str. 229–247.
- [8] Campbell, C. K., *Surface Acoustic Wave Devices, Their Signal Processing Applications*; Academic Press: San Diego, USA. 1989, pp. 238–315.
- [9] Živković, Z., Hribšek, M., *PAT procesori u komunikacijama*, Zbornik Odbrambene tehnologije OTEH 2009, 8–9 oktobar 2009, Beograd, str. 636–639.
- [10] Mortet, V., Williams O. A. and Haenen K., *Diamond: a material for acoustic devices*, Phys. Stat. Sol. (a) 205, 5/2008, str. 1009–1020.

- [11] Hribšek, M., Tošić, D., Živković, Z., *Hemijski gasni senzori sa površinskim akustičkim talasom*, Tehnika, Elektrotehnika, vol. LXIV, no. 2, pp. 7–12, 2009.
- [12] Pohl, A. A., IEEE Trans. on Ultrasonics, *Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47, 317–332, 2000.
- [13] Hribšek, M., *Surface acoustic wave devices in communications*, Scientific Technical Review, Vol. LVIII, 2/2008, pp. 44–50.
- [14] Golio, M., *The RF and Microwave Handbook, Second Edition*, CRC Press LLC: Boca Raton, USA. 200, p. I.6.1-I.6.15.
- [15] Jaehwan, K., Park, J. H., *Saw Sensor for Train Wheel Monitoring*, Engineering Materials, 270–273/ 2004, str. 921–926.
- [16] 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, 9/2009, 980–994.
- [17] Hribšek, M., *Elementi sa površinskim akustičkim talasima u radiosenzorima*, Telfor, 2008, OS 5.13, str. 424–427. ISBN: 978–86–7466–337–0.
- [18] 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.
- [19] Wen Wang et al, *A novel wireless, passive CO2 sensor incorporating a surface acoustic wave reflective delay line*, Smart Mater. Struct. 16/2007, 1382–1389,
- [20] Sadek, Z. A., Buso, D., Martucci, A., Mulvaney, P., Wlodarski, W., and Kallantar-Zadeh, K., *Titanium Dioxide-Based 64° YX LiNbO3 Surface Acoustic Wave Hydrogen Gas Sensors*, Journal of Sensors, Article ID 254283, 5 pages, 2008.
- [21] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0010/Ivanov/Ivanov>, Advanced Sensors for Multifunctional Applications.
- [22] Hribšek, M., Ristić, S., Živković, Z., *Modelling of saw biosensors*, Proceed. of Biodevices, Barcelona 14–17. jan. 2009., str. 376–379.
- [23] Živković, Z., Hribšek, M. and Tošić, D., *Modeling of surface acoustic wave chemical vapor sensors*, Informacije MIDEM, Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, vol. 39, 2/2009, str. 111–117., ISSN 0352–9045.
- [24] Hribšek, M., Ristić, S., Radojković, B., *Diamond in Surface acoustic wave sensors*, Acta Physica Polonica, 17, 5/ 2010, 0587–4246, 1794–1798.
- [25] Hribšek, M., *Filtri sa sa površinskim akustičkim talasom*, Institut Goša, Beograd, 2009. ISBN 978–86–86917–06–5.
- [26] Živković, Z., Hribšek, M., *Univerzalni softver za projektovanje nedisperzivnih Pat filtara*, Institut Goša, MNTR RS, 2010.
- [27] Hribšek, M., *Novi softver: Softver za projektovanje maske interdigitalnih pretvarača PAT filtara propusnika opsega sa minimalnim slabljenjem*, Institut Goša, MNTR RS 2010.
- [28] Radojković, B. M., Hribšek, M. F., Ristić, S., *Polyaniline thin films in sensors for detection of toxic welding vapors*, Hemijska industrija, 2010 OnLine-First (00):27–27, Details Full text (427 KB) DOI:10.2298/HEMIND091221027R.

[29] Hribšek, M., Tošić D., *Analysis and Modeling of Surface Acoustic Wave Chemical Vapor Sensors*, *Acoustic waves*, D. Dissanayake. ed., Sciyo, Rijeka, 2010, str. 359–376.

[30] GOSA44A. Z. Sadek, W. Wlodarski, K. Shin, R. Kaner, B. Richard, and K. Kalantar-Zadeh, *A layered surface acoustic wave gas sensor based on a polyaniline/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofibre composite*, *Nanotechnology* 17/2006.

[31] Rakonjac, V., Filipović, Z., *Merenje vibracija i relevantnih parametara leta transportnog helikoptera Mi-8 sa revitalizovanim lopaticama nosećeg rotora*, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 52, broj 6, pp. 611–621, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2004.

## MODELING AND DESIGN OF SURFACE ACOUSTIC WAVE FILTERS AND THEIR MILITARY APPLICATIONS

FIELD: Electronics

### Summary:

*The operation principles of surface acoustic wave filters (SAW) and materials and technology of their fabrication are presented. A special attention is paid to wide and diverse applications of SAW filters in signal processing, communications and chemical sensors, stressing their military applications. An original method, developed by the authors, for the modeling and prediction of SAW filter characteristics is presented. The abilities of the method are illustrated by the examples of chemical SAW sensors for the detection of warfare chemical agents. The designed and fabricated SAW filter PAT-FPO is the base for the special purpose chemical sensors.*

modeling

### Introduction

*Surface acoustic wave (SAW) filters have an important role in modern electronic and communication systems due to their specific performance and compatibility with other modern planar technologies.*

*Excitation of a surface acoustic wave in piezoelectric materials by an electrical signal using interdigital transducers was discovered in 1965 by White and Voltmer [Whi85].*

### Surface acoustic waves and piezoelectric materials

*Surface acoustic waves, discovered and described by Lord Rayleigh, are illustrated in Figure 1.*

*Velocity of SAW is 3000 do 5000m/s – five orders lower than the velocity of electromagnetic waves. SAW filters work in the frequency range of 10MHz to 5GHz.*

*The commonly used piezoelectric materials are crystals of quartz (SiO<sub>2</sub>) and lithium niobate (LiNbO<sub>3</sub>). The technology of SAW filters fabrication is compatible with the integrated circuit technology.*



#### Operating principles of SAW filters

*A typical SAW filter has two or more interdigital transducers (IDT) which convert electrical to mechanical energy and vice versa. The IDT consists of two sets of interleaved electrodes (Figure 2a i 2b).*

#### SAW filters in signal processing and communications

*SAW filters are used in signal processing for convolution, correlation, compression, expansion and matched filtering of signals.*

*In communications SAW filters are used in TV sets and systems, both analog and digital, in radars and sonars, in spread spectrum communications and for monitoring of moving objects.*

#### SAW filters in sensors of different physical quantities

*The operation of SAW sensors is based on the fact that the physical quantity (temperature, pressure, strain, chemical vapor, etc.) affects the propagation of the SAW in the sensor in attenuation and delay, respectively. If the sensor is heated, stretched or compressed or if it is mass loaded, the substrate's length and its elasticity constants are changed. These changes cause velocity and phase delay variations, which then proportionally change the center frequency, attenuation and time delay of the device. The first reported use of SAW technology for a sensor application was in 1975 for pressure sensing.*

*The main advantage of all SAW sensors is their ability to be accessed wirelessly (radio sensors). It is achieved simply by connecting an antenna to the input transducer. In cars and trucks up to seven wireless systems are used and 15 SAW sensors per vehicle.*

#### Chemical SAW sensors

*The basic principle of the chemical vapor SAW sensor (Fig. 6) is the reversible sorption of chemical vapors by a solvent coating, placed between the IDTs. The sensitivity of the sensors is high, and a mass of  $100 \text{ pg/cm}^2$  can be detected.*

#### SAW sensors for warfare agents

*Chemical warfare gases are the most dangerous weapon. The dynamic range of typical SAW detectors is in the range of 1 picogram to 1 microgram of chemical agents, in a controlled temperature range.*

#### Design of SAW filters in communications and chemical sensor applications

*The design consists of several steps: choice of the substrate material, choice of the IDTs configuration, determination of the impulse response of the transducer, calculation of the IDT geometry, determination of the mask layout.*

*A filter with the center frequency of 71.72MHz and the identical uniform transducers on quartz were designed and fabricated, Figs. 10 and 11.*

#### Modeling of warfare gases SAW sensors

*Modeling of SAW sensors is an inevitable part of the design which makes it cheaper and more effective. The original modeling method based on the electromechanical equivalent circuit of the SAW sensor was developed. The closed form expressions for vapor concentration estimations were obtained. The simulation results are compared to the experimental data.*

Key words: *surface acoustic wave, SAW filter, SAW sensor, design.*

Datum prijema članka: 01. 11. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 10. 11. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 12. 11. 2010.