Visokonivojsko modeliranje in načrtovanje večkanalnega senzorskega sistema za zaznavanje različnih molekul v zraku

Drago Strle

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Povzetek. V delu predstavljamo modeliranje večkanalnega senzorskega merilnega sistema za zaznavanje različnih molekul v zraku. Detekcijski sistem temelji na spremembi kapacitivnosti zaradi adsorpcije ciljnih molekul na modificirane površine COMB kapacitivnih senzorjev ter integriranem nizkošumnem elektronskem vezju in ustreznih algoritmov za digitalno procesiranje signalov. Občutljivost pod $1aF/\sqrt{Hz}$ zagotavlja, da lahko s predlaganim merilnim senzorskim sistemom zaznamo tri molekule TNT v 10^{12} molekulah nosilnega plina v eni sekundi merjenja, kar uvršča tak merilni sistem med najobčutljivejše v svetovnem merilu. Polje različno modificiranih kapacitivnih senzorjev zagotavlja ustrezno selektivnost. Nizkošumno analogno procesiranje signalov zagotavlja ustrezen detekcijski nivo, medtem ko digitalno procesiranje signalov poskrbi za ločitev signalov pri večkanalnem merjenju v realnem času. V sklepu predstavljamo primerjavo nekaterih simulacijskih in izmerjenih rezultatov za štirikanalni sistem.

Ključne besede: zaznavanje sledi različnih molekul v zraku, visokonivojsko modeliranje senzorskega sistema, adsorpcija-desorpcija, nizkošumno procesiranje.

High-Level Modeling and Design of a Multichannel Sensor System for Vapor Trace Detection of Different Molecules in the Air

Design, implementation and high-level modeling and simulation of a multi-channel sensor system for the vapor trace detection of different molecules in the air are presented in the paper. The detection is based on the change of the capacitance when a target molecules adsorb to the surface of a chemically-modified COMB capacitive sensor. An integrated low-noise analog electronic circuit with corresponding digital signal processing algorithms measures a small capacitance change. The detection limit is in the range below 1aF/√Hz which makes it sure that the detection limit is in the range of three molecules of TNT in 1012 molecules of the carrier gas in one second, which ranks the sensitivity among the best in the world. The array of differently modified sensors provides the possibility to improve the selectivity; the low-noise signal processing provides a low detection level while a digital signal processing assures a multichannel processing of the signals in real time. A comparison is made between the simulation and measurement results.

1 Uvod

Obstaja potreba po miniaturnem, občutljivem, kemijsko selektivnem in cenenem detekcijskem sistemu za zaznavo različnih molekul v zraku z detekcijskim nivojem v razredu nekaj ppb (ppb:1 ciljna molekula v 10¹² molekulah nosilnega plina). Načrtovanje takšnega detekcijskega sistema je izjemno zahtevno in težavno, ker so spremembe izjemno majhne, različne molekule pa so si zelo podobne. Ustrezno selektivnost zagotavlja polje različno modificiranih COMB (glavnikastih)

Prejet 19. junij, 2015 Odobren 5. oktober, 2015 kapacitivnih senzorjev, kjer minimalne spremembe kapacitivnosti zaznavajo nizkošumno analogno integrirano vezje in ustrezni algoritmi digitalnega procesiranja signalov. Načrtovanje takšnega detekcijskega sistema je zahtevno in dolgotrajno. Za povečanje učinkovitosti in skrajšanje časa načrtovanja smo razvili metodologijo načrtovanja in modeliranja na visokem hierarhičnem nivoju v okolju Matalb/Simulink, ki poveča učinkovitost načrtovalskega procesa, omogoča preverjanje pravilnosti in učinkovitosti arhitekture v zgodnji fazi načrtovalskega procesa in tako skrajša čas, potreben za načrtovanje.

Običajen načrtovalski proces se začne brez modeliranja na visokem hierarhičnem nivoju. Tak način je povsem primeren za načrtovanje preprostih elektronskih vezij in sistemov. Če načrtujemo kompleksno mešano analogno-digitalno integrirano vezje skupaj s senzorji, pa navadna simulacijska orodja (kot npr. Spice in podobna) niso primerna, ker je preverjanje prepočasno. Preverjanje v zgodnji fazi načrtovalskega procesa mora bit hitro in učinkovito in mora omogočiti preverjanje različnih arhitektur v čim krajšem času.

V 2. poglavju predstavimo princip delovanja senzorja in njegov visokonivojski model ter oceno občutljivosti, ki jo lahko dosežemo. Poglavje 3 obravnava detekcijski sistem in njegov visokonivojski model s poudarkom na modeliranju analognega dela merilnega kanala, ki lahko obdeluje signale iz polja senzorjev. V 4. poglavju predstavljamo primerjavo simulacijskih in izmerjenih rezultatov za 4-kanalni detekcijski merilni sistem, ki zaznava molekule eksploziva RDX v zraku.

2 SENZOR IN NJEGOV MODEL

Slika 1 prikazuje princip delovanja kapacitivnega senzorja s kemijsko modificiranimi površinami, ko je vzpostavljeno ravnotežje med adsorbiranimi in desorbiranimi ciljnimi molekulami. Adsorpcija se zgodi na modificiranem senzorju, medtem ko na referenčnem senzorju ta proces ne poteka. Adsorbirane molekule povzročijo majhno spremembo dielektrične konstante med ploščama. Preostale molekule v prostoru med ploščama obeh kapacitivnosti so približno enakomerno razporejene. Merilni sistem zazna razliko obeh kapacitivnosti, kar pomeni, da zaznamo spremembo zaradi adsorbiranih molekul. Slika 2 kaže izdelan glavnikasti (COMB) senzor v modificirani MEMS tehnologiji: na levem delu slike je prikazan diferencialni par pri majhni povečavi, na desnem delu detajl. Razdalje med ploščami so velike približno 1um [1].

Posamezne kapacitivnosti izračunamo s pomočjo enačb od (1.1) do (1.3), kjer je pomen simbolov naslednji: ε_0 , $\varepsilon_{r,cm}$ in $\varepsilon_{r,z}$ so dielektričnost vakuuma, adsorbirane površine in zraka, A je površina COMB kapacitivnega senzorja, δ je debelina adsorbirane plasti, d_0 je razdalja med ploščami COMB kondenzatorja pred adsorpcijo, $\psi(t)$ pa je koeficient pokritosti površine potem, ko se vzpostavi ravnovesje med adsorbiranimi in desorbiranimi molekulami;



Slika 1: Poenostavljen fizikalni model kapacitivnega senzorja: adsorpcija na modificiranem senzorju in brez adsorpcije na nemodificiranem desnem senzorju



Slika 2: SEM-slika izdelanega senzorja v modificirani tehnologiji MEMS

Slika 3 prikazuje poenostavljen električni model kapacitivnosti modificiranega senzorja po tem, ko se vzpostavi ravnotežje med adsorbiranimi in desorbiranimi molekulami.



Slika 3: Poenostavljen električni model senzorske kapacitivnosti, ki zaradi posledic adsorpcije povzroči spremembo kapacitivnosti

 $C_{pi1}(t)$ je celotna kapacitivnost modificiranega senzorja, kjer je del površine zaseden z adsorbiranimi ciljnimi molekulami,

$$\delta C_{i}(t) = \frac{\varepsilon_{0}\varepsilon_{r,cm}A\psi_{k}(t)}{\delta}$$
(1.1)

$$\delta C_{pi1}(t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{rZ} A \psi_k(t)}{d_0 - 2\delta}$$
(1.2)

$$C_{pi2}(t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{rZ} A\left[1 - \psi_k(t)\right]}{d_0}$$
(1.3)

 $C_{p,0}$ je kapacitivnost senzorja brez adsorbirane plasti ciljnih molekul, $\delta C_i(t)$ je kapacitivnost adsorbirane plasti ciljnih molekul (~0.52nm za TNT) ter C_{pi2} , ki pomeni kapacitivnost dela modificiranega senzorja, na katerem ni adsorbiranih molekul. Celotna kapacitivnost je tako sestavljena iz serijske vezave $\delta C_i(t)$, $\delta C_{pi1}(t)$ in $\delta C_i(t)$ ter vzporedno vezane kapacitivnosti $C_{pi2}(t)$ in parazitnih kapacitivnosti C_{par} med obema ploščama in priključnimi vodniki. $\psi(t)$ je pokritost senzorja, ki je odvisna od ravnotežja med adsorpcijo in desorpcijo ciljnih molekul na modificirani plasti in se spreminja s časom $0 \le \psi(t) \le 1$. Med meritvijo in ob prisotnosti ciljnih in drugih molekul v prostoru v okolici senzorjev, del ciljnih molekul adsorbira na površino, kar spremeni dielektrično konstanto in s tem kapacitivnost senzorja. Pokritost senzorja, ki jo modeliramo z $0 \le \psi_k(t) \le 1$, je odvisna od kakovosti in enakomernosti funkcionalizacijske plasti ter od ravnotežja med adsorbcijo in desorbcijo, torej od adsorpcijskega in desorpcijskega koeficienta, ki pomeni verjetnost; različne molekule imajo različne adsorpcijske in desorpcijske koeficiente ter tako različno pripomorejo k povprečni pokritosti senzorja. Kapacitivnost senzorja lahko izračunamo z enačbo (1.4).

$$C_{pi}(t) = C_{pi2}(t) + \frac{\delta C_i(t) \cdot \delta C_{pi1}(t)}{\left(\delta C_i(t) + 2\delta C_{pi1}(t)\right)} + C_{par} \qquad (1.4)$$

Modeliranje procesa adsorpcije in desorpcije na visokem nivoju temelji na idejah, podanih v [3] in [4], z uporabo programa Smoldyn [5]. Ciljne molekule v tem modelu nimajo mase; nekatere se adsorbirajo za določen čas in potem desorbirajo. Na prosta mesta adsorbirajo nove ciljne molekule. Gostota molekularne porazdelitve v prostoru je enakomerna, razen na površini, kjer je zelo visoka. Medmolekularne interakcije so zanemarjene, kar je dober približek, če je koncentracija molekul v prostoru okoli senzorjev majhna. Predpostavljamo, da je gibanje molekul difuzijsko, kar lahko opišemo s Fickovim zakonom [4]. Model adsorpcije/desorpcije opišemo z enačbo (1.5):

$$\frac{\partial \Psi_{a}(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=+0} = \kappa \Psi(0,t) - k \Psi_{a}(t) \quad (1.5).$$

Pomen simbolov v (1.5) je naslednji: $\Psi_a(t)$ je povprečna koncentracija ciljnih molekul, adsorbiranih na površino v času t, $\Psi(x,t)$ je profil koncentracije (povprečna koncentracija ciljnih molekul na mestu x in času t), D je koeficient difuzije, κ je koeficient adsorpcije, ki je lahko 0 za popolnoma inertno površino in neskončen za površine, ki takoj adsorbirajo molekule (κ je omejen približno s toplotno hitrostjo ciljnih molekul), medtem ko je k desorpcijski koefficient, ki lahko zavzame vrednosti od 0 (brez desorpcije) do neskončnosti (za trenutno desorpcijo). Slika 4 kaže diagram poteka izračunov gibanja molekul z adsorpcijo in desorpcijo. Ko je vzpostavljeno ravnotežje, se izračuna kapacitivnost. V vsakem časovnem intervalu se položaji molekul naključno spremenijo, sledi izračun verjetnosti adsorpcije/desorpcije ter odbojev in trkov. V vsakem časovnem intervalu funkcionalizirana površina adsorbira določeno število ciljnih molekul in jih zadrži določen čas, potem sledi desorpcija. Pokritost površine s ciljnimi molekulami je odvisna od razmerja hitrosti adsorpcije in desorpcije. Iz tega ravnotežja izračunamo pokritost v modelu kapacitivnosti, kar vodi v izračun kapacitivnosti v skladu z enačbami od (1.1) do (1.4).



Slika 4: Diagram poteka procesa adsorpcije in desorpcije, ki temelji na simulaciji delcev z uporabo simulatorja Smoldyn [5]

Rezultat je tabela kapacitivnosti v odvisnosti od časa, ki jo uporablja visokonivojski model celotnega merilnega sistema, kjer so senzorji prikazani kot kapacitivnosti. Na levi strani slike 5 kapacitivnosti z različnim senčenjem predstavljajo senzorje z različnimi modifikacijami.

Model molekularnih interakcij, adsorpcije in desorpcije je v trenutni fazi primitiven in poenostavljen in ne vključuje nekaterih pomembnih podrobnosti o interakciji molekul; nadgradili ga bomo v prihodnosti.

3 DETEKCIJSKI SISTEM IN NJEGOV VISOKONIVOJSKI MODEL

Elektronski detekcijski sistem za zaznavanje majhnih kapacitivnih sprememb natančno meri razliko dveh kapacitivnosti, ki je sorazmerna z dinamiko procesa adsorpcije/desorpcije. Spremembe zaradi adsorpcije so izjemno majhne, v razredu aF (aF=10-18 F), zato detekcijski sistem potrebuje mehanizem, ki zmanjšuje vpliv ničelnih napetosti 1/f in termičnega šuma. Slika 6 prikazuje poenostavljeno blokovno shemo merilnega sistema za štiri različno modificirane senzorje. Ti so ojačevalnika priključeni na naboja v kanalu nizkošumnega analognega integriranega vezja (AFE). Sledi vezja za digitalno procesiranje signalov (DSP) v sivem območju (slika 5). Vezje AFE je izdelano v procesu 0.18um CMOS, DSP pa v programabilnem digitalnem vezju FPGA (Field Programmable Gate Array). Natančno delovanje elektronskega vezja za nizkošumno obdelavo signalov je opisano v [1]. Arhitektura sistema je pravzaprav večkanalni in večfrekvenčni fazno sklenjeni ozkopasovni ojačevalnik, kjer AFE pretvori zelo majhne kapacitivne spremembe v tok digitalnih rezultatov. DSP omogoča nadaljnjo obdelavo signalov ter ločitev na rezultate posameznih senzorjev. Visokofrekvenčni pravokotni signali, ki so priključeni na posamezne senzorje, omogočajo meritev razlik kapacitivnosti vsakega senzorja; vsak od njih ima nekoliko drugačno frekvenco in nastavljivo amplitudo. Diferencialni signal na izhodu ojačevalnika naboja, $V_{Cho} - V_{Chop} - V_{Chon}$ ko so vsi štirje pari senzorjev povezani z ustreznim vzbujanjem signalov, je sestavljen iz štirih spektralnih črt in njihovih lihih harmonskih komponent.



Slika 5: Blokovni diagram elektronskega detekcijskega sistema za merjenje kapacitivnih sprememb štirih senzorjev v realnem času. Detekcijski nivo je $0.2 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Amplitude na izhodu ojačevalnika naboja so sorazmerne z razlikami senzorskih kapacitivnosti ter amplitudami vzbujevalnih signalov v skladu z enačbo (1.6), kjer je V_{si} amplituda krmilnega signala, $\Delta C_i = C_{pi} - C_{ni}$ je razlika kapacitivnosti modificiranega in nemodificiranega kondenzatorja senzorja (i=1,...4) ter C_f kapacitivnost v povratni vezavi ojačevalnika naboja.

$$V_{cho}\left(f_{oi}\right) \cong \frac{4V_s}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{\Delta C}{C_f} \tag{1.6}$$

Frekvence krmilnih signalov f_{si} (i = 1,...4) so višje od mejne frekvence 1/f šuma operacijskega ojačevalnika (približno 200kHz za proces 180nm CMOS). Razmerje SnR (Signal to noise Ratio) na izhodu ojačevalnika naboja je sorazmerno moči osnovne harmonske komponente signala, ki je sorazmerna razliki kapacitivnosti ter amplitudi krmilnega signala in obratno sorazmerna moči šuma v okolici te spektralne črte. SnR določa detekcijski nivo celotnega senzorskega merilnega sistema ob predpostavki, da so prispevki preostalih modulov v AFE in DSP k šumu zanemarljivi.

Pasovno propustni filter (BP filter na sliki 5) ojači osnovne harmonske komponente s frekvencami f_{si} (*i* = 1,...4), neželene spektralne črte ter ničelno napetost in 1/f šum ojačevalnika-naboja pa ta filter oslabi. Dobljeni ojačani signal množimo s skladnim (koherentnim) pravokotnim signalom s frekvenco $f_m = f_{si} - f_{oi}$, ki ga generira DSP; to mešanje zniža frekvenco signalov na $f_{oi} = f_{si} - f_m$, poleg tega pa generira še signale z vsotami frekvenc $f_{xi} = f_{si} + f_m$ in številnimi drugimi spektralnimi črtami z visokimi frekvencami. Te oslabi filter LP, ki prilagodi tudi nivo koristnega signala na vhodno območje $\Sigma\Delta$ modulatorja. Tako obdelan in ojačen signal kvantizira Σ - Δ analogno digitalni pretvornik (ADC), ki je sestavljen iz $\Sigma\Delta$ modulatorja drugega reda in decimacijskega filtra 3. reda z razmerjem prevzorčenja 32. Višje harmonske komponente, ki ostanejo po mešanju in filtriranju, ter preoblikovan kvantizacijski šum oslabi decimacijski filter (Sinc R=32 na sliki 5), ki je implementiran v enoti DSP. Sledi množenje digitalnega signala iz decimacijskega filtra s posameznimi digitalnimi sinusnimi signali v štirih ločenih digitalnih množilnikih f_{oi} (*i* = 1,...,4). Množenje v vsakem kanalu generira vsote in razlike frekvenc obeh vhodov v množilnike. Pri pravilno izbranih frekvencah f_{si} , f_m in f_{oi} dobimo na izhodih množilnikov spektralni črti pri frekvenci 0 in $2f_{oi}$ ter še nekatere spektralne črte z višjimi frekvencami. Vse višjefrekvenčne komponente oslabi digitalni filter s pasovno širino približno 12Hz. Poljubno dodatno zmanjšanje pasovne širine in s tem povečanje razmerja SnR poteka v računalniku. Vsak digitalni izhod nosi informacijo o spremembi kapacitivnosti pripadajočega senzorja zaradi adsorpcije ciljnih molekul. Vsak senzor se drugače odziva na različne ciljne molekule; veliko različnih molekul na različno modificiranih senzorjih povzroči nekakšen podpis, ki je z veliko verjetnostjo značilen za posamezne ciljne molekule. S tem močno izboljšamo selektivnost senzorskega sistema za detekcijo različnih molekul v zraku.

Celoten merilni sistem modeliramo na visokem hierarhičnem nivoju s pomočjo orodja Matlab/Simulink. Model analognega dela skupaj s štirimi senzorji prikazuje slika 6, ki vključuje: visokonivojski model adsorpcije in desorpcije štirih različno modificiranih senzorjev, priključenih na en merilni kanal elektronike detekcijo, visokonivojski model analognega za procesiranja signalov, ki ga sestavljajo modeli: ojačevalnika naboja, BP filtra, analognega množilnika, LP filtra, ter $\Sigma\Delta$ modulatorja. Modeli vključujejo najpomembnejše neidealne lastnosti, kot so: končno ojačenje, končna hitrost, končni čas vzpona, termični šum, 1/f šum, ničelna napetost itd., [6]. Tak način omogoča učinkovito in hitro optimizacijo arhitekture in parametrov celotnega merilnega sistema. Na začetku načrtovalskega procesa uporabljamo idealizirane preproste modele (npr. prevajalne funkcije), pozneje lahko dodajamo posamezne neidealnosti, ki so povezane z realizacijo. Optimizirane meje parametrov analognega dela lahko uporabljamo kot specifikacijo elementov in parametrov med načrtovanjem analognih modulov.

Hierarhični model celotnega senzorskega sistema vključuje tudi pravilni model (bit-true model) digitalnega procesiranja signalov DSP, vendar v tem delu model DSP zaradi pomanjkanja prostora ni predstavljen; postopek je opisan v [7]. Model na visokem nivoju vključuje arhitekturo, opis in dolžine vseh registrov in aritmetično-logičnih operacij. Model DSP je namenjen za preverjanje delovanja, kot tudi za avtomatsko sintezo VHDL kode, ki se lahko uporabi bodisi za realizacijo na vezju FPGA ali pa za sintezo digitalnega vezja na siliciju. Pomemben vidik tega pristopa je njegova učinkovitost. Tudi v tem primeru najprej s pomočjo preprostih modelov preverimo arhitekturo in funkcionalnost posameznih modulov vezja za digitalno procesiranje signalov (DSP), pozneje pa dodajamo neidealnosti, kot so končna dolžina besed registrov in aritmetičnih operacij.



Slika 6: Simulink model vezja za nizkošumno analogno procesiranje signalov (AFE) skupaj s štirimi različno modificiranimi senzorji na levi strani

Z uporabo opisanih metod modeliranja je proces načrtovanja učinkovit, poveča se verjetnost uspešnosti načrtovalskega procesa celotnega detekcijskega sistema, hitre simulacije na visokem hierarhičnem nivoju pa so lahko učinkovita osnova za razvoj algoritma za prepoznavanje vzorcev.

Slika 7 prikazuje simulirani spekter na izhodu AFE vezja ($\Sigma\Delta$ modulatorja) za štiri različno modificirane senzorje, ki so priključeni na en kanal. Opazimo štiri glavne spektralne komponente; amplituda vsake spektralne črte je posledica razlik kapacitivnosti ustreznega senzorja, ki so posledica proizvodnega procesa MEMS kapacitivnih senzorjev; adsorpcija/ desorpcija v tem simulacijskem rezultatu ni prisotna. Ocenjena občutljivost merilnega sistema je boljša kot $0.1aF/\sqrt{Hz}$, kar je zelo blizu izmerjenim rezultatom.



Slika 7: Spekter na izhodu $\Sigma\Delta$ modulatorja enega kanala za štiri različno modificirane senzorje, ki so priključeni na en kanal. Razlike kapacitivnosti senzorjev med simulacijo so: 100aF, 50aF 10aF in 5aF. Model adsorpcije/desorpcije v tej simulaciji ni vključen. Vključeni so vsi pomembni neidealni pojavi. Občutljivost je ocenjena na 44zF/ \sqrt{Hz} .

4 PRIMERJAVA SIMULACIJSKIH IN Izmerjenih Rezultatov

Slika 8 prikazuje simulirani odziv celotnega senzorskega sistema. Model vključuje: proces adsorpcije in desorpcije na štirih različno modificiranih senzorjih, en kanal analognega, nizkošumnega elektronskega vezja ter DSP procesiranje enega kanala. Pasovna širina rezultatov na izhodu je pribl. 400 Hz, da skrajšamo čas, potreben za simulacijo. Dodatno filtriranje dodatno zmanjšuje pasovno širino in s tem povečuje razmerje SnR. Vhodni signal za simulacijo je gostota RDX molekul, kot funkcija časa, z vključenimi značilnostmi adsorpcije/desorpcije za molekule RDX. Vsak od treh senzorjev je modificiran s specifično nano plastjo receptorskih molekul (APS, APHS, UPS), četrti senzor (Ref.) je referenčni, torej brez modifikacije. Simulacija adsorpcije/desorpcije poteka, dokler ni doseženo ravnovesje, potem se izračunajo kapacitivnosti upoštevajoč površino in dielektričnost adsorbiranih molekul. Simulacijo nadaljujemo brez ciljnih molekul; zaradi desorpcije in difuzije se zmanjšuje površina plasti, kjer so bile adsorbirane ciljne molekule. Ob ponovni vzpostavitvi ravnotežja ponovno izračunamo kapacitivnost; tako dobimo vektorje kapacitivnosti kot funkcijo časa, ki jih lahko uporabimo v simulaciji celotnega detektorja. Rezultati na sliki 8 so brezdimenzijski. Začetni digitalni rezultati ustrezajo razliki kapacitivnosti neenakih kondenzatorjev diferencialnih senzorjev in nastanejo zaradi toleranc proizvodnega procesa. Skok v odzivu povzročajo adsorbirane ciljne molekule, ki povzročijo spremembo kapacitivnosti modificiranega dela senzorja.

V tem delu prikazujemo le odzive na molekule eksploziva RDX, v [1] pa tudi na TNT in DNT.



Slika 8: Simulirani odziv sistema štirih različno modificiranih senzorjev (APS, APHS, UPS, Ref.) na pare eksploziva RDX s pasovno širino 400Hz.

Za potrebe preverjanja smo zgradili demonstrator merilnega senzorskega sistema. Sistem v ohišju (SIP -System in Package) [1,2] združuje štiri različno modificirane diferencialne senzorje, ki so priključeni na en kanal integriranega merilnega sistema (AFE); DSP je trenutno realiziran na FPGA. S pomočjo miniaturne piezoelektrične črpalke posrkamo nosilni plin iz okolice, ki vsebuje malo ciljnih molekul (RDX v prikazanem primeru) v predel senzorjev, ki se nahajajo v ohišju SiP. V laboratorijskih poskusih je plin, ki prihaja na površino senzorja suhi N2 in N2, kontaminiran z molekulami ciljnega materiala; število ciljnih molekul v nosilnem plinu je odvisno od parnega tlaka, ki je odvisen od materiala, temperature in tlaka. V realnem okolju (prikazanem na sliki 9) dovajamo v senzorje zrak, kontaminiran s ciljnimi molekulami.

Izmerjeni odzivi štirih različno modificiranih senzorjev (APS, APHS, UPS in REF) na pare RDX v zraku so predstavljeni na sliki 9. Steklena bučka vsebuje majhno količino RDX. V levem spodnjem delu je bučka zaprta. Začetni nivo odzivov različno modificiranih senzorjev je vsak senzor za proporcionalen razliki kapacitivnosti diferencialnega senzorja po kalibraciji. V bučki se vzpostavi parni tlak ciljnih molekul. V srednjem delu slike posodo odpremo, zato se vsebina bučke začne mešati z zrakom iz okolice. Senzorski merilni sistem s pomočjo piezoelektričnih črpalk posrka okoliški zrak z molekulami RDX, ki se adsorbirajo na površini in povzročijo spremembo kapacitivnosti, torej odziv, ki je različen na različno modificiranih senzorjih, kar vidimo kot spremembo odziva. Do spremembe pride relativno počasi, ker je pretok piezoelektričnih črpalk le približno 5ml/min, rezultati pa se osvežujejo enkrat na sekundo. Po določenem času bučko spet zapremo (na desni strani slika 9) in odziv se počasi vrne na izhodiščni nivo. Opazimo, da so odzivi različno modificiranih senzorjev različni; na referenčnem senzorju, kot je bilo pričakovano, ni odziva. Izmerjeni odzivi so zelo podobni simuliranim odzivom. Trenutno potekajo meritve odzivov različno modificiranih senzorjev (APS, APHS in UPS) na različne ciljne molekule, poleg tega pa poteka tudi sinteza drugačnih modifikatorjev ter načrtovanje velikega polja različno modificiranih senzorjev skupaj z detekcijskim sistemom, ki bo omogočal zaznavanje sprememb na velikem polju integriranih in različno modificiranih senzorjev.



Slika 9: Izmerjeni odzivi štirih različno modificiranih senzorjev (APS, APHS, UPS in Ref.) na pare RDX. Detekcijski nivo občutljivosti je 3ppt (3 molekule RDX v 1013 molekulah zraka).

5 SKLEP

V delu predstavljamo visokonivojski Matlab/Simulink model miniaturnega sistema za odkrivanje sledov različnih molekul v zraku. Model vključuje proces adsorpcije in desorpcije ter visokonivojski model celotnega elektronskega sistema za zaznavanje, ki vključuje najpomembnejše neidealne lastnosti. Rezultati simulacije so primerljivi z laboratorijskimi meritvami. Parametre modela AFE lahko uporabljamo kot mejne vrednosti parametrov med načrtovanjem vezij in modulov AFE, model DSP pa lahko uporabimo za avtomatsko sintezo opisa v VHDL jeziku in sintezo DSP na siliciju. Trenutno razvijamo veliko polje različno modificiranih senzorjev ter ustrezno integrirano elektronsko vezje za zaznavo v realnem času.

ZAHVALA

Raziskavo sta podprla Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije, ARRS s št. J7-5497, in center odličnosti CO NAMASTE.

LITERATURA

- D. Strle, et al., "Surface-functionalized COMB Capacitive Sensors and CMOS Electronics for Vapor Trace Detection Of Explosives." IEEE Sens. J., May 2012, vol. 12, no. 5, pp. 1048–1057.
- [2] D. Strle, et al., "Sensitivity Comparison of Vapor Trace Detection of Explosives Based on Chemo-Mechanical Sensing with Optical Detection and Capacitive Sensing with Electronic Detection," MDPI Sensors, June 2014, pp. 11468–11491.

- [3] G. Sami, et al., "Adsorbtion-Desorbtion Noise in Gas Sensors: Modelling using Langumur and Wolkenstein models for adsorbtion," Sensors and Actuators B, Aug. 2005, Vol. 114, pp. 451–459.
- [4] S. Andrews, "Accurate Particle-Based Simulation of Adsorbtion, Desorption and Partial Transmission," IOP Physical Biology, June 2009, pp. 1–15.
- [5] Andrews, S., "Spatial and Stochastic Cellular Modeling with the Smoldyn Simulator," http://www.smoldyn.org.
- [6] Strle, D. "Mixed-Signal Circuits Modeling and Simulations Using Matlab," Engineering Education and Research using MATLAB, In-Tech: 2011.
- [7] Raič, D., Strle, D. "Advanced Decimator Modelling with HDL Conversion in Mind in Engineering Education and Research using MATLAB"; InTeh: Rijeka, Croatia, 2014.

Drago Strle je pridobil doktorat znanosti v letu 1991 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani iz področja načrtovanja in sinteze vezij Stikalo-Kondenzator. Ima več kot 30 let izkušenj na področju načrtovanja mešanih analognodigitalnih integriranih vezji, s poudarkom na načrtovanju integriranih, nizko-šumnih, visoko-sposobnih senzorskih vmesnikov. Trenutno je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer uči predmete iz področja elektronike in mikroelektronike. Raziskovalna dejavnost obsega modeliranje, načrtovanje in testiranje mešanih analogno-digitalnih integriranih vezij ter integriranih senzorjev in senzorskih vmesnikov za senzorje MEMS ter kemijske in biološke senzorje.