

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2011-1/114

ZAKLJUČNO POROČILO O REZULTATIH RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	L2-9583
Naslov projekta	Miniaturni keramični senzorji tlaka za nizke tlake
Vodja projekta	4378 Marina Santo Zarnik
Tip projekta	L Aplikativni projekt
Obseg raziskovalnih ur	2.838
Cenovni razred	D
Trajanje projekta	07.2007 - 06.2010
Nosilna raziskovalna organizacija	1704 HIPOT-RR raziskave in razvoj tehnologij in sistemov, d.o.o.
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	106 Institut "Jožef Stefan"
Družbeno-ekonomski cilj	06. Industrijska proizvodnja in tehnologija

1.1. Družbeno-ekonomski cilj¹

Šifra	06.
Naziv	Industrijska proizvodnja in tehnologija

2. Sofinancerji²

1.	Naziv	HYB Proizvodnja hibridnih vezij d.o.o.
	Naslov	Levičnikova cesta 34, 8310 Šentjernej
2.	Naziv	
	Naslov	
3.	Naziv	
	Naslov	

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Poročilo o realizaciji programa raziskovalnega projekta³

Cilj projekta je bil izdelati z uporabo keramike z nizko temperaturo žganja (Low Temperature Cofired Ceramic, LTCC) miniaturne keramične senzorje tlaka z visoko ločljivostjo, ki bi bili primerni za uporabo v relativno nizkem tlačnem področju (do 30 kPa). Osnovna zgradba senzorja je keramična struktura z votlino in tanko membrano na kateri se v odvisnosti od izbranega senzorskega principa s postopki debeloplastne tehnologije izdelajo:

- Debeloplastni piezoupori povezani v Wheatstonov mostič (piezouporovni senzor),
- Elektroda(e) kondenzatorja z zračno režo (kapacitivni senzor) ali
- Debeloplastni piezoelektrični aktuator/senzor (piezoelektrični resonančni senzor),

ki »pretvorijo« mehansko veličino (upogib membrane zaradi tlaka) v ustrezen električni signal.

Raziskave so potekale v štirih delovnih sklopih: Tehnologija in materiali za izdelavo senzorskega elementa (DS1), Izvedbe senzorskega elementa (DS2), Numerično modeliranje senzorskega elementa (DS3) in Primerjalna analiza (DS4).

Aktivnosti v sklopu DS1 so bile usmerjene v razvoj tehnologije izdelave keramične strukture s kanali za dovod zraka (medija) in razširjeno cilindrično votlino, ki je zaprta z ene strani s tanko in čim bolj ravno membrano. DS1 vključuje tudi procesiranje funkcijskih debelih plasti.

Osnova tehnološkega postopka 3D oblikovanja keramičnih struktur za senzorje tlaka je laminacije ustrezno razrezanih/oblikovanih folij zelene LTCC keramike in žganje v komorni peči z ustreznim temperaturnim profilom. Ker je tehnološki postopek oblikovanja in procesiranja LTCC povezan tudi s sestavo samega keramičnega materiala, smo za razvoj in optimizacijo tehnoloških postopkov izbrali preverjen komercialni material DuPont 951, katerega smo v predhodnih raziskavah ocenili za primerne in smo s procesiranjem le tega imeli tudi največ izkušenj. Za izvedbo projekta smo uporabili LTCC folije debeline 100 um, 150 um in 200 um. V razvojni fazi so bile odprtine za votlino in kanale v strukturi izrezane z laserjem, kar je za optimizacijo tehnološkega postopka in izdelavo manjših serij testnih vzorcev najbolj primerno. Ker sta debelina membrane in višina votline v taki strukturi določeni z debelino folij LTCC, smo lahko izdelali strukture z najmanjšo višino votline okoli 100 um. Te so primerne predvsem za piezouporovne in piezoelektrične senzorje, pri katerih sama višina votline ne vpliva na tlačno občutljivost, medtem ko je za kapacitivne senzorje bilo potrebno zagotoviti tanjšo in natančno definirano zračno režo. Razvoj tehnologije za izdelavo tankih rež v LTCC, je potekal na projektih J2-9090 in L2-0186. V sklopu projekta L2-9583 smo se skoncentrirali predvsem na evaluacijo uporabe kapacitivnih senzorjev pri nizkih tlakih in primerjalno analizo s piezouporovnim in piezoelektričnim senzorjem.

Pomemben rezultat DS1 je določitev optimalnih parametrov priprave, obdelave in laminacije plasti ter ustreznega temperaturnega profila, ki je omogočil izdelavo ravnih membran debeline 100 um (ukrivljenost do največ nekaj um). Vsak posamezen korak našega »knowhow-a« vključuje celo vrsto pomembnih podrobnosti, katere smo skrbno načrtovali in preizkušali na številnih serijah testnih struktur. Ker je bil cilj projekta izdelava in karakterizacija senzorjev za nizke tlake smo v DS1 raziskali skrajne zmožnosti tehnologije v tej smeri. Za potrebe projekta so bile izdelane keramične strukture z membranami premera 7–24 mm in debeline 100 um in 200 um.

Hkrati z razvojem tehnologije za izdelavo 3D struktur smo študirali tudi kompatibilnost funkcijskih debeloplastnih materialov in LTCC ter delali na optimizaciji tehnoloških postopkov za procesiranje debeloplastnih senzorskih elementov. Delo na tej tehnološki problematiki je potekalo usklajeno z aktivnostmi v delovnem sklopu DS2, saj je obsegalo načrtovanje in izdelavo testnih struktur za vse tri obravnavane senzorske principe ter sistematično optimizacijo posameznih tehnoloških korakov.

Na strukturah z debeloplastnimi piezo-upori (uporabljeni so materiali proizvajalcev DuPont in ElectroScience Laboratories), smo študirali relacije med geometrijo debeloplastnih uporov in razmerjem signal/šum ter analizirali ostale ključne parametre, ki vplivajo na stabilnost senzorja. Analize so pokazale, da sočasno žganje LTCC s funkcijskimi debeloplastnimi upori nekoliko zmanjša piezouporovni efekt v uporih, kar negativno vpliva na doseganje potrebe občutljivosti senzorja za nizko tlačno področje. Zato smo funkcijske upore procesirali na predhodno žgani 3D keramični strukturi.

Pri razvoju tehnologije in postopkov za izdelavo piezoelektričnih resonančnih senzorjev je bil največji poudarek na procesiranju in karakterizaciji piezokeramičnih debelih plasti. Baza iz katere smo črpali predznanje za začetne aktivnosti je bil uspešen evropski projekt MINUET (NMP2-CT-2004-505657, 2004-2007, koordinator Ferroperm Piezoceramics). Zahvaljujoč rezultatom MINUETA smo že ob začetku projekta obvladovali nekatere ključne postopke za procesiranje in karakterizacijo piezokeramičnih debelih plasti na LTCC. Eno pomembnih predhodnih spoznanj v zvezi s procesiranjem debelih piezokeramičnih plasti na LTCC je dejstvo, da je LTCC izredno reaktiven substrat in da sočasno žganje s piezokeramičnimi plasti ni možno. Tudi v primeru procesiranja

piezokeramičnih plasti na pred-žgano strukturo je izredno pomembno z ustrezno bariero (vmesno, zelo tanko keramično plastjo ali pa v obliki goste elektrode) preprečiti reakcijo med substratom in funkcijsko plastjo med procesiranjem. Med pomembnimi dosežki je bilo uspešno procesiranje debelih plasti PZT ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) na pred-žgani LTCC keramiki z uporabo komercialne debeloplastne Au paste za izdelavo elektrod, ki brez vmesne plasti ter z ustreznim temperaturnim/časovnim profilom žganja dovolj omeji difuzijo in prepreči poslabšanje piezoelektričnih lastnosti PZT filma. Drugi pomemben rezultat je izboljšava nestandardnih merilnih metod za karakterizacijo debelih PZT plasti, ki so nam omogočili dovolj natančno ovrednotiti materialne parametre obravnavanih PZT filmov. Z upoštevanjem izsledkov predhodnih raziskav smo preizkušali primernost več različnih komercialnih materialov za izvedbo elektrod debeloplastne senzorske/aktuatorske strukture in dva debeloplastna piezokeramična materiala (nedopiran PZT, ki je bil razvit na Odseku za elektronsko keramiko na IJS in material TF2100 industrijskega proizvajalca Ferroperm). Primerjalna analiza testnih struktur in poskusnih senzorjev je pokazala, da je za izdelavo resonančnega senzorja tlaka bolj primeren material TF2100, ki ima manjše izgube in višji modul elastičnosti. To so potrdili, tako eksperimentalni rezultati, kot tudi rezultati numeričnih analiz.

Za izdelavo kapacitivnih senzorjev smo za senzorske elektrode in električne povezave uporabljali debeloplastni Pt/Ag material. Posebnost tehnološkega postopka za izdelavo kapacitivne senzorske strukture je v sočasnem žganju kompletne keramične strukture skupaj z elektrodami in električnimi povezavami.

Delovni sklop DS2 je obsegal študij izvedbe keramičnih senzorjev tlaka zasnovanih na treh različnih senzorskih principih, oz. piezouporovni, kapacitivni in piezoelektrični resonančni senzor. Aktivnosti so bile usmerjene v načrtovanje senzorskih struktur z ustreznimi funkcionalnimi debeloplastnimi elementi, izdelavo poskusnih senzorjev ter karakterizacijo in analizo možnosti za uporabo senzorjev v načrtovanem tlačnem področju.

Piezouporovni senzorji: Ker je v splošnem ločljivost piezouporovnih senzorjev omejena z funkcijskimi lastnostmi komercialno dostopnih debeloplastnih uporovnih materialov (faktor »gauge«, šum, plastna upornost), je izboljšanje ločljivosti senzorja možno doseči z izdelavo tanjših membran in ustrezno geometrijo. Ključni parametri tehnološkega postopka, ki smo jih obravnavali so bili: priprava (mešanje) debeloplastnih uporovnih past in procesiranje debeloplastnih uporov na predhodno žgani 3D keramični strukturi. S skrbno načrtovanim in sistematičnim raziskovalnim delom smo tehnološke postopke postopoma izboljševali in jih na več zaporednih serijah testnih senzorjev optimizirali tako, da so sedaj primerni za serijsko izdelavo senzorjev v industrijskem okolju in za prenos tehnologije v proizvodnjo.

Za doseganje ciljnih karakteristik senzorjev pa je poleg tehnologij izdelave bilo potrebno raziskati še celo vrsto parametrov, ki bistveno vplivajo na dosežene karakteristike. Tako smo študirali možnost uravnoteženja ničelnega odziva senzorja z laserskim doravnavanjem v ta namen načrtovanih debeloplastnih uporov na fiksni osnovi, ki so vezani v serijo ali vzporedno s senzorskimi upori. Te postopke danes uspešno obvladujemo in so primerni za prenos v serijsko proizvodnjo. Eksperimentalno smo ovrednotili ločljivost in stabilnost senzorjev za različne kombinacije debeloplastnih uporovnih in LTCC materialov in analizirali kratkoročno in dolgoročno stabilnost ničelnega odziva in tlačne občutljivosti. Dosežena občutljivost, šum in stabilnost potrjujejo realne možnosti za uporabo piezouporovnih keramičnih senzorjev v ciljnem, relativno nizkem tlačnem področju (0-30 kPa). Uspešno je bil razvit in izdelan tudi senzor za področje do 3 kPa, kar je izreden dosežek za keramične senzorje tlaka.

Piezoelektrični resonančni senzorji: Osnovna konstrukcija obravnavanega piezoelektričnega resonančnega senzorja je prej opisana 3D keramična struktura s tanko membrano na kateri je s postopki debeloplastne tehnologije izdelan piezoelektrični aktuator. Skladno z osnovnim principom, ki ga tak senzor izkorišča je naloga aktuatorja, da membrano spravi v resonanco. Resonančna frekvenca (v izbranem načinu) je odvisna od geometrije, materialnih lastnosti in mehanskih napetosti v membrani obremenjeni s tlakom. Sprememba tlačne obremenitve povzroči premik resonančne frekvence, ki jo ta ista aktuatorska struktura zazna kot spremembo impedance. Z ustrezno električno vezavo takega aktuatorskega/senzorskega elementa pretvorimo mehansko spremembo v ustrezen električen signal. Tako je poleg procesiranja same senzorske strukture bilo potrebno za evalvacijo senzorja raziskati tudi možnosti za izvedbo elektronike, ki je omogočila meritve oz. karakterizacijo senzorja. Obravnavali smo dve možni rešitvi za izvedbo elektronike in v končni fazi razvili in preizkusili izvedbo s frekvenčnim izhodom senzorja (z aktuatorsko/senzorskim elementom v povratni zanki oscilatorskega vezja). Izdelali smo in testirali več serij poskusnih senzorjev, na katerih smo izvajali različna tipska testiranja in so bili uporabljeni tudi za preverjanje numeričnih modelov. Delali smo na optimizaciji dizajna senzorske/aktuatorske strukture, predvsem z ustreznim oblikovanjem elektrod ter ločitvijo senzorskega in aktuatorskega dela na membrani. Podrobnosti so

opisane v več znanstvenih objavah. Rezultati testiranja poskusnih senzorjev so pokazali, da ima piezoelektrični resonančni senzor dovolj visoko tlačno občutljivost in je obetaven za uporabo pri nizkih tlakih. Največji problem je še nedorečen debeloplastni piezoelektričen material za izdelavo aktuatorja, ki trenutno še ni komercialno dobavljiv in tako predstavlja omejevalni faktor za potencialno aplikacijo v industrijski praksi.

Kapacitivni keramični senzori so bili tudi predmet raziskav na vzporednem projektu L2-0186, zato smo aktivnosti v sklopu tega projekta omejili predvsem na evaluacijo uporabo v nizkem tlačnem področju in primerjalno analizo s piezouporovnimi in resonančnimi piezoelektričnimi senzori kot je opisano v DS4.

V delovnem sklopu DS3 smo z uporabo metode končnih elementov (v programskem okolju Ansys/Multiphysics in FlexPDE) zgradili numerične modele za simulacijo vseh treh tipov senzorjev.

Pri snovanju modelov za piezoelektrični resonančni senzor je bil poudarek na analizi statičnih razmer (mehanske napetosti v membrani in senzorskih elementih) kakor tudi dinamičnih razmer (modalna in harmonična analiza ter izračun impedančne karakteristike). Na tem segmentu smo se navezali na rezultate EU projekta MINUET v sklopu katerega smo pridobili potrebno znanje s področja numeričnega modeliranja sklopljenih fizikalnih problemov in nekaj preizkušenih modelov testnih struktur, kar je pripomoglo k uspešni realizaciji projektnih ciljev. Modele v katerih smo uporabili eksperimentalno ovrednotene materialne parametre (piezoelektrične koeficiente, elastične in dielektrične konstante) smo v tem delovnem sklopu ustrezno nadgradili in rezultate simulacij preverili s eksperimentalnimi rezultati. Dobro ujemanje simuliranih in izmerjenih karakteristik testnih struktur je omogočilo uporabo numeričnih analiz pri optimizaciji senzorske strukture (simulacije so pokazale trende in poenostavile odločitve pri načrtovanju prototipov). Izsledki obsežnih numeričnih in eksperimentalnih analiz so v več iteracijah potrdili izvedljivost piezoelektričnega resonančnega sensorja z debeloplastnim aktuatorjem/senzorjem na membrani. Dosežke na segmentu numeričnega modeliranja piezoelektričnega sensorja smo objavili v desetih znanstvih prispevkih.

Zgradili smo več numeričnih modelov za simulacijo statičnih mehanskih in dinamičnih temperaturnih razmer v strukturi piezouporovnega sensorja tlaka pod različnimi tlačnimi obremenitvami in pogoji okolice. Modeli so omogočili študij učinkov različnih mehanskih obremenitev med izdelavo sensorja, ki so rezultat tehnološkega postopka in simulacijo dinamičnih temperaturnih razmer. Te so še posebej pomembne po priključitvi sensorja na napajanje (v času segrevanja, »warm-up«) in močno vplivajo na ničelni izhod sensorja in njegovo stabilnost. Z uporabo numeričnih modelov, ki smo jih predhodno eksperimentalno potrdili, smo pokazali kako zelo pomembno je vpliv samo-segrevanja mostičnih piezouporov upoštevati pri načrtovanju sensorja in pri tehnološkem postopku izdelave (podobnih študij še nismo zasledili v literaturi). Rezultate numeričnih analiz smo uporabili kot pomoč pri načrtovanju in optimizaciji konstrukcije sensorja. V pomoč pa so nam bili tudi pri optimizaciji postopka izdelave: aktivnega uravnoteženja ničelnega izhoda ter izvajanju meritev karakteristik/parametrov za izračun in nastavitve občutljivosti in ostalih ključnih senzorskih parametrov.

V zvezi z aktivnostmi v sklopu DS3, ki so vključevale študij kapacitivnih keramičnih senzorjev, je za projekt bilo zelo pomembno sodelovanje v sklopu bilateralnega projekta BI-RO/08-09-009. Rezultati tega sodelovanja so numerični modeli in analize, ki so pripomogli k razumevanju problematike in pri načrtovanju ustreznih struktur. Podrobnosti so predstavljene v petih znanstvenih objavah (COBISS.SI-ID: 22942759, 22628135, 22941735, 22889767, 22808871) in jih v tem poročilu zaradi obsežnosti ne omenjamo.

Za primerjalno analizo izvedb (DS4) smo izdelali več serij poskusnih senzorjev za ciljno tlačno področje do 30 kPa in v primerjalno analizo vključili tudi prototipe senzorjev, ki so rezultat sodelovanja z industrijskim partnerjem HYB d.o.o. in so bili projektirani za različna področja uporabe (medicinski senzori, industrijski senzori in senzori za vgradnjo v naprave široke potrošnje za nizko tlačno področje). Poleg osnovne karakterizacije smo opravili tudi nekatera tipska testiranja, ki vključujejo testiranje kratkoročne in dolgoročne stabilnosti ter mehanske in termične vzdržljivosti (fatigue teste). Rezultati teh testiranj so razkrili nekatera kritična točka v postopku izdelave, ki so pomembne za serijsko proizvodnjo LTCC senzorjev, čeprav pri izdelavi posameznih prototipov niso problematični. V celoti pa so rezultati testiranj dali pozitiven odgovor na naša pričakovanja in pokazali, da na doseženi tehnološki stopnji uspešno obvladujemo procese za prenos tehnologije in izdelkov v proizvodnjo.

Preizkusi piezoelektričnih resonančnih senzorjev so pokazali, da ima tak senzor dovolj visoko tlačno občutljivost ($S = 2,5 \text{ Hz/kPa}$) in je obetaven za uporabo pri nizkih tlakih. Temperaturna odvisnost tlačne občutljivosti je $1800 \times 10^{-6}/\text{K}$ kar zahteva temperaturno kompenzacijo za

potencialno aplikacijo v praksi.

Največja tlačna občutljivost, ki smo jo dosegli za piezouporovni keramičnega senzor je znašala 370 $\mu\text{V/V/kPa}$ za senzor s 200 μm debelo membrano, premera 24 mm in 500 $\mu\text{V/V/kPa}$ za membrano premera 15 mm debelo 100 μm . Linearnost, histereza in stabilnost ničelne izhodne napetosti so zadovoljivi za ciljno tlačno področje ($> 0.1\%$ tlačnega področja). Koeficient temperaturne odvisnosti karakteristike je v območju $100-1200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, in je odvisen od konstrukcije, dimenzij, ohišja. Relativno nizka temperaturna odvisnost v primerjavi z drugimi senzori je zelo dober rezultat s stališča potencialne uporabe, saj za nekatere aplikacije ni potrebna temperaturna kompenzacija.

Tipične karakteristike izmerjene na prototipih kapacitivnih senzorjev so: ničelna kapacitivnost 5-15 pF, tlačna občutljivost do 20 fF/kPa, temperaturna odvisnost ničelne kapacitivnosti $1-10 \text{ fF}/^{\circ}\text{C}$ in temperaturna odvisnost občutljivosti $< 20 \text{ aF/kPa}/^{\circ}\text{C}$. Za kapacitivne senzore je vsekakor potrebna temperaturna kompenzacija, vendar v končni fazi ne predstavlja problem (npr. na projektu L2-0186 smo z digitalno kompenzacijo temperaturne odvisnosti senzorja (za področje 0-100 kPa) dosegli napako $< 0,4\%$ v kalibracijskem področju $0-75^{\circ}\text{C}$).

Oblikovanje in procesiranje 3D struktur v LTCC, ki je ključnega pomena za projekt predstavlja osnovo za raziskovalno delo na področju keramičnih mikrosistemov. Na tej skupni osnovi je raziskovalna skupina sodelovala tudi v okviru slovensko-poljskega bilateralnega sodelovanja BI-PL/08-09-011 z naslovom: "Nove možnosti oblikovanja 3D struktur s keramiko z nizko temperaturo žganja (LTCC)", kar je v tudi pripomoglo k uspešni realizaciji projekta. Člani projektne skupine so vključeni tudi v projekt Eureka (E14570, IPCTECH, Nova generacija 3D integriranih pasivnih komponent in mikro-sistemov v LTCC tehnologiji) v sklopu katerega nadaljujejo sodelovanje na tem raziskovalnem področju s Tehnično Univerzo na Dunaju, tokrat v širšem konzorciju skupaj z več partnerji iz Avstrije, Poljske in Srbije.

4. Ocena stopnje realizacije zastavljenih raziskovalnih ciljev⁴

Realizacija zastavljenih raziskovalnih ciljev je v skladu s planiranim programom projekta.

Razvoj tehnologije 3D oblikovanja LTCC struktur za senzore tlaka, ki delujejo na različnih principih je omogočil izdelavo struktur z votlino (premera 7-24 mm) in s tanko membrano (debeline 100 μm in 200 μm). Te so primerne predvsem za piezouporovne in piezoelektrične senzore, za katere sama višina votline ni pomembna za doseganje tlačne občutljivosti, medtem ko je za kapacitivne senzore potrebno izdelati strukturo tanjšo zračno režo. Razvoj tehnologije za izdelavo tankih rež v LTCC poteka na vzporednih projektih J2-9090 in L2-0186, tako, da smo se v sklopu projekta L2-9583 skoncentrirali na evaluacijo uporabe senzorjev pri nizkih tlakih in primerjalno analizo z ostalimi tipi senzorjev.

Pomemben poudarek raziskave je bil na optimizaciji tehnoloških postopkov za procesiranje funkcijskih plasti na predžgani LTCC strukturi. Tu je šlo za procesiranje debeloplastnih uporov za izvedbo piezouporovnih senzorjev in piezoelektričnih debelih plasti za izvedbo resonančnih senzorjev. V obeh primerih smo dosegli zadovoljivo občutljivost senzorskih struktur (z uporabo komercialnih debeloplastnih materialov in piezoelektričnih materialov, ki so rezultat raziskav v sklopu EU projekta MINUET), kar je omogočilo uspešno realizacijo zastavljenih projektih ciljev.

Izdelano je bilo več deset serij različnih poskusnih senzorskih struktur (za vse tri obravnavane tipe senzorjev katere smo eksperimentalno ovrednotili za uporabo pri nizkih tlakih, do 30 kPa. Z razvito tehnologijo lahko realiziramo keramične strukture z membranami debeline najmanj 100 μm in premera tudi $> 20 \text{ mm}$, kar bi teoretično pomenilo, da so senzori primerni za uporabo tudi v tlačnem področju ($< 10 \text{ kPa}$). Ker pa je razmerje med debelino in premerom membrane, ki določa občutljivost senzorja, po drugi strani omejeno z upogibno trdnostjo keramike (za LTCC je ta 200-250 MPa), ki določa maksimalni tlak, ki ga senzor vzdrži brez poškodbe, predstavlja ta parameter eno ključnih omejitev pri določanju tlačnega področja senzorja. Tako so izsledki raziskave pokazali, da so obravnavani senzori (neodvisno od principa) bolj primerni za meritev tlaka nad 10 kPa, saj je s tehnologijo, ki jo trenutno obvladujemo težko doseči dovolj dobro resolucijo za tlake v nižjih tlačnih področjih.

Kot pomoč pri oblikovanju senzorjev so bili zgrajeni ustrezni numerični modeli (z uporabo programskih orodij Ansys in FlexPDE) v katerih so uporabljeni eksperimentalno ovrednoteni materialni parametri. Ustreznost modelov in pravilnost rezultatov numeričnih analiz je potrjena z eksperimentalnimi rezultati na testnih senzorskih strukturah. Numerične analize so pokazale trende in možnosti za izboljšavo konstrukcije ter doseganje boljše stabilnosti in občutljivosti senzorskih elementov.

Rezultati so potrdili primernost keramičnih senzorjev tlaka za uporabo pri relativno nizkih tlakih in predstavljajo solidno osnovo za bodoče razvojne projekte.

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁵

Ni bistvenih sprememb programa projekta ne sestave projektne skupine.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁶

		Znanstveni rezultat	
1.	Naslov	SLO	Miniaturni keramični senzorji tlaka z debelimi PZT plastmi
		ANG	Thick-film piezoceramics structures for miniaturised pressure sensors
	Opis	SLO	Študirali smo primernost debeloplastnih piezokeramičnih (PZT) struktur, procesiranih na predhodno žgani LTCC podlagi, za uporabo pri izvedbi senzorjev tlaka. Posebna pozornost je namenjena karakterizaciji PZT plasti in ovrednotenju materialnih parametrov potrebnih za numerično modeliranje. Predstavljen je primer numeričnega modeliranja in validacije modela resonančnega senzorja tlaka.
		ANG	PZT thick-film structures on pre-fired LTCC substrates were studied for possible implementation in ceramic pressure sensors. Special attention was paid to the evaluation of the material parameters for numerical models and the model validation. An example of a resonance pressure sensor with a PZT thick-film actuator structure on the diaphragm was presented.
	Objavljeno v	SANTO-ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, MAČEK, Srečo. Thick-film piezoceramics structures for miniaturised sensors and actuators : experimental and numerical analysis. Int. Conf. [and Exhibition] IMAPS Poland 2007, Rzeszów, Krasieczyn, 23-26 September 2007. Proceedings. Rzeszów: Rzeszów University of Technology; Kraków: International Microelectronics and Packaging Society, Poland - Chapter, 2007, str. 39-46.	
	Tipologija	1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljen predavanje)	
	COBISS.SI-ID	21175079	
2.	Naslov	SLO	Karakterizacija in numerično modeliranje debeloplastnih PZT struktur
		ANG	Characterisation and numerical modelling of ceramic structures with piezoceramic thick films
	Opis	SLO	Opisan je inovativen postopek karakterizacije PZT debelih plasti na LTCC keramiki, s katerim smo določili materialne parametre PZT za potrebe numeričnega modeliranja senzorske strukture. Standardov za to področje še ni. Predstavljena rešitev vključuje uporabo indentacijske metode za meritev elastičnih lastnosti debelih piezokeramičnih plasti in ustrezno prilagojeno metodo za določanje transverzalnega piezoelektričnega koeficienta. Dobro ujemanje rezultatov simulacij testnih aktuatorjev z eksperimentalnimi rezultati je potrdilo ustreznost predlaganih merilnih postopkov.
		ANG	A procedure for characterising lead-zirconate-titanate (PZT) thick films on pre-fired LTCC substrates aimed at an evaluation of the material parameters for numerical modelling was presented. Due to the lack of standard procedures for measuring the elastic and piezoelectric properties of the films, the compliance was evaluated from the results of nano-indentation tests, and a substrate-flexure method was used to evaluate the transverse piezoelectric coefficients. The validation of the model and the results of the finite-element analysis of the test structures are discussed.
	Objavljeno v	SANTO-ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, URŠIČ, Hana, MAČEK, Srečo. Numerical modelling of ceramic MEMS structures with piezoceramic thick films. Journal of electroceramics, 2008, vol. 20, no. 1, str. 3-9.	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
	COBISS.SI-ID	21287719	
3.	Naslov	SLO	Numerična analiza debeloplastnih piezokeramičnih struktur za miniaturne senzorje tlaka
			Numerical analysis of thick-film piezoceramics structures for miniature

		ANG	pressure sensor
	Opis	SLO	Obravnavan je piezoelektrični resonančni senzorja tlaka z debeloplastnim PZT aktuatorskim/senzorskim elementom izdelanim na pred-žganji 3D LTCC strukturi. Posebna pozornost je namenjena numeričnem modeliranju senzorja in analizi odziva senzorske strukture v resonanci. Z eksperimentalnim preverjanjem numeričnih rezultatov smo potrdili pravilnost zgrajenih numeričnih modelov in njihovo uporabnost v nadaljnjih analizah za optimizacijo dizajna.
		ANG	The paper discusses the feasibility of a piezoelectric resonant pressure sensor made of lead-zirconate-titanate (PZT) thick films on a preprocessed three-dimensional LTCC structure with a deformable diaphragm. Numerical and experimental analyses were carried out. By using experimentally evaluated material properties, a finite-element analysis showed the trends and facilitated the decisions in the design phase of the sensor.
	Objavljeno v		SANTO-ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, MAČEK, Srečo: Experimental and numerical analysis of thick-film piezoceramics structures for miniaturised sensor and actuators. <i>Microelectron. int.</i> , 2008, vol. 25, no. 2, str. 31-36.
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
	COBISS.SI-ID		21688615
4.	Naslov	SLO	Študij primernosti različnih materialov za elektrode debeloplastne PZT strukture na LTCC
		ANG	Evaluation of different electrode materials for PZT thick-film structures on LTCC
	Opis	SLO	Študirali smo mikrostrukture ter električne in piezoelektrične lastnosti debelih PZT plasti na pred-žgani LTCC in korundni keramiki. Z namenom, da bi zmanjšali interakcijo med PZT filmom in reaktivno LTCC podlago smo preizkusili rešitve z dodatno vmesno keramično plastjo (bariero) in z uporabo različnih debeloplastnih materialov za izvedbo elektrod. Predstavljeni so rezultati karakterizacije PZT plasti v strukturah z elektrodami izdelanimi z uporabo različnih debeloplastnih prevodnih materialov.
		ANG	The microstructural, electrical and piezoelectric characteristics of the PZT thick films on prefired LTCC tapes and relatively inert alumina substrates were studied. To minimise the influence of the substrate-film interactions, different electrode materials and the use of an additional intermediate layer as a barrier were evaluated. The dielectric permittivities, dielectric losses, and piezoelectric coefficients were measured and compared.
	Objavljeno v		BELAVIČ, Darko, HROVAT, Marko, SANTO-ZARNIK, Marina, HOLC, Janez, KOSEC, Marija. An investigation of thick PZT films for sensor applications : a case study with different electrode materials. <i>Journal of electroceramics</i> , 2009, vol. 23, no. 1, str. 1-5, doi: 10.1007/s10832-008-9495-1.
	Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek
COBISS.SI-ID		22677031	
5.	Naslov	SLO	Študij stabilnosti nizekotlačnega piezouporovnega keramičnega senzorja tlaka izdelanega v LTCC
		ANG	Stability study of a low-pressure piezoresistive ceramic pressure sensor made in LTCC
	Opis	SLO	Študirali smo stabilnost piezouporovnega keramičnega senzorja tlaka izdelanega v LTCC tehnologiji ter eksperimentalno ovrednotili primernost LTCC izvedbe senzorjev za precizne meritve v tlačnem področju 0-3 kPa. Poleg eksperimentalne karakterizacije poskusnih senzorjev so v študijo vključene tudi numerične analize, ki so pokazale trende in pomagale razložiti vpliv nekaterih ključnih parametrov dizajna. Rezultati so dobra osnova za razvoj novega komercialnega izdelka.
		ANG	The stability of an LTCC-based piezoresistive sensor designed for the measurement of air pressures lower than 3 kPa was investigated. A series of test sensors was manufactured and characterised. Among the experimental tests the numerical analyses were included to show the trends and help reveal the impact of some of the design parameters. The essential sensor characteristics, i.e., the sensitivity, the warm-up drift and the offset-voltage stability, are discussed. The results presented are a good basis for the future development of the new, commercial products.
Objavljeno v		SANTO-ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, MAČEK, Srečo. The warm-up and offset stability of a low-pressure piezoresistive ceramic pressure sensor.	

	Sens. actuators, A, Phys.. [Print ed.], 2010, vol. 158, no. 2, str. 198-206,
Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
COBISS.SI-ID	23364135

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomsko relevantni rezultati projektne skupine⁶

		Družbeno-ekonomsko relevantni rezultat
1.	Naslov	<i>SLO</i> Študij izvedljivosti piezoelektričnega resonančnega sensorja tlaka
		<i>ANG</i> Feasibility study of a thick-film PZT resonant pressure sensor
	Opis	<i>SLO</i> Predstavljeni so rezultati študije izvedljivosti piezoelektričnega resonančnega sensorja tlaka s PZT debeloplastnim aktuatorskim/senzorskim elementom izdelanim na pred-žgani 3D LTCC strukturi. Opisan je princip delovanja sensorja, tehnološki postopek izdelave debeloplastne senzorske/aktuatorske strukture, karakterizacija dveh debeloplastnih PZT materialov in meritve poskusnih senzorjev. Numerične analize v katerih so uporabljeni eksperimentalno ovrednoteni materialni parametri so pomagale pri študiju in optimizaciji senzorske strukture.
		<i>ANG</i> Feasibility of a piezoelectric resonant pressure sensor made of lead-zirconate-titanate (PZT) thick films on a pre-processed three-dimensional LTCC structure with a deformable diaphragm. Numerical and experimental analyses were carried out. Two different thick-film PZT compositions were characterised. By using experimentally evaluated material properties, a finite-element analysis showed the trends and facilitated the decisions in the design phase of the sensor.
	Šifra	F.02 Pridobitev novih znanstvenih spoznanj
	Objavljeno v	SANTO ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, JERLAH, Mitja. Feasibility study of a thick-film PZT resonant pressure sensor made on a pre-fired LTCC structure. V: 2008 IMAPS/ACerS, 4th International Conference and Exhibition on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT), April 21-24, 2008, Munich, Germany. Proceedings. Washington: International Microelectronics and Packaging Society, 2008, 7 str.
	Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci
COBISS.SI-ID	21688103	
2.	Naslov	<i>SLO</i> Razvoj piezoelektričnega resonančnega sensorja tlaka
		<i>ANG</i> Development of a piezoelectric resonant pressure sensor
	Opis	<i>SLO</i> Piezoelektrični resonančni sensor tlaka je zaradi relativno visoke občutljivosti obravnavan kot obetaven kandidat za uporabo v nizkem tlačnem področju. Predstavljene so numerične in eksperimentalne analize. Posebej so obravnavani nekateri kritični parametri, predvsem v zvezi s ponovljivostjo, stabilnostjo, staranjem in tudi vpliv montaže/ohišenja in neželenih vibracij.
		<i>ANG</i> A piezoelectric resonant pressure sensor was considered as a promising candidate for applications in the low-pressure range. Based on the results of the finite-element (FE) analysis, the geometry of the sensor was optimised. Some critical design parameters were discussed such as stability, ageing, and spurious vibrations and related package issues.
	Šifra	F.08 Razvoj in izdelava prototipa
	Objavljeno v	SANTO ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, MAČEK, Srečo. Some design and technological issues related to the development of a piezoelectric resonant pressure sensor. V: 32nd International IMAPS-IEEE CPMT Poland Conference : Warszawa, Pułtusk, 21-24 September 2008. [S. l.]: IMAPS, 2008, 6 str.
	Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci
COBISS.SI-ID	22030887	
3.	Naslov	<i>SLO</i> Primerjalna študija različnih izvedb keramičnih sensorji tlaka za nizko tlačno področje
		<i>ANG</i> Comparison study of different ceramic pressure sensors designed for low pressure ranges
		V primerjalni študiji je obravnavan dizajn in izdelava različnih tipov membranskih keramičnih senzorjev tlaka v LTCC, načrtovanih za merjenje

Opis	SLO	nizkih tlakov do nekaj 10 kPa. Poudarek je na tehnologiji piezouporovnih in kapacitivnih senzorjev tlaka različnih dimenzij (debeline membrane 100 in 200 μm ter premera 25 mm, 15 mm in 8 mm). Največja občutljivost, ki smo jo dosegli za piezouporovni senzor je znašala 500 $\mu\text{V/V/kPa}$ in 20 fF/kPa za kapacitivni senzor, kar je zelo obetaven rezultat s stališča potencialne uporabe.
	ANG	Ceramic pressure sensors designed for measuring low pressures up to a few 10 kPa were investigated. The prototype sensors based on the piezoresistive and the capacitive principles were made in the LTCC structures with different dimensions (thickness of the diaphragm of 200 μm and 100 μm , and the diameters of 25, 16, and 8 mm) and characterised. The laboratory-scale prototype testing showed the characteristics to be favourable for possible future applications (a sensitivity of about 500 $\mu\text{V/V/kPa}$ was obtained for the piezoresistive and of 20 fF/kPa for the capacitive sensors).
Šifra	B.03 Referat na mednarodni znanstveni konferenci	
Objavljeno v	BELAVIČ, Darko, SANTO-ZARNIK, Marina, JERLAH, Mitja, KOČJAN, Sandi, LIPUŠČEK, Igor, HROVAT, Marko, HOLC, Janez, MAKAROVIČ, Kostja. Ceramic pressure sensors designed for low pressure ranges. V: 33rd International IMAPS-IEEE CPMT Poland Conference, 21-24 September 2009, Psczyna Poland. Proceedings. [S. l.]: IMAPS, 2009, str. 62-65.	
Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci	
COBISS.SI-ID	22941735	
4. Naslov	SLO	Numerična analiza in testiranje prototipne serije piezouporovnega LTCC senzorja za nizke tlake
	ANG	FE analysis and prototype testing of a piezoresistive LTCC-based low-pressure sensor
Opis	SLO	Predstavljena študija obsega numerične analize, načrtovanje, izdelavo in karakterizacijo poskusnih struktur ter testiranje piezouporovnih LTCC senzorjev tlaka za tlačno področje do 3 kPa. Senzorji so bili načrtovani glede na zahteve industrijskega partnerja. Numerične in eksperimentalne analize ter tipski preizkusi, ki so obsegali tudi meritve dolgoročne stabilnosti in testiranje vzdržljivosti (fatigue) so potrdili ustreznost prototipov za uporabo v načrtovanem področju.
	ANG	The results of the numerical analyses and prototype testing of a piezoresistive LTCC-based low-pressure sensor for a pressure below 3 kPa were presented. The sensors were designed to meet the demands for a potential product of our industrial partner. The results of the numerical and experimental analyses, and prototype testing (including long-term stability and fatigue tests) confirmed the appropriateness of the sensor for application in the low pressure range.
Šifra	F.08 Razvoj in izdelava prototipa	
Objavljeno v	SANTO-ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, MAČEK, Srečo. FE analyses and prototype testing of a piezoresistive LTCC-based low-pressure sensor. V: SIITME 2009, Int. Sym. Design and Technology of Electronics Packages 17-20 Sep. 2009, Gyula, Hungary. Conference proceedings. Piscataway: IEEE, 2009, str. 205-210.	
Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci	
COBISS.SI-ID	22942503	
5. Naslov	SLO	Analiza kritičnih korakov pri izdelavi piezouporovnega LTCC senzorja tlaka
	ANG	Some critical steps in the manufacturing of LTCC-based pressure sensors
Opis	SLO	Pri razvoju piezouporovnega LTCC senzorja tlaka za medicinsko uporabo (v skladu z AAMI in ICE standardi) je posebna pozornost bila namenjena analizi kritičnih korakov pri postopku izdelave senzorjev, ki so pomembni predvsem v primeru izdelave večjih serij senzorjev. Predstavljeni so rezultati eksperimentalne in numerične analize najbolj kritičnih točk postopka in predlagane ustrezne rešitve.
	ANG	During the development of LTCC-based piezoresistive pressure sensors and the appropriate manufacturing process for large-scale production, special attention has to be paid to specific, critical steps. In this paper the most critical steps in the manufacturing of a pressure sensor designed to meet the characteristics relating to the AAMI and ICE standards are discussed.

Šifra	F.06 Razvoj novega izdelka
Objavljeno v	SANTO-ZARNIK, Marina, BELAVIČ, Darko, MAČEK, Srečo. Some critical steps in the manufacturing of LTCC-based pressure sensors. V: ĐONLAGIĆ, Denis (ur.), ŠORLI, Iztok (ur.), ŠORLI, Polona (ur.). Proceedings. Ljubljana: MIDEM - Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials, 2010, str. 303-308.
Tipologija	1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci
COBISS.SI-ID	24081703

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁸

1. Pomemben dosežek projektne skupine (PS) je odločitev sofinancerja HYB, da uporabi rezultate projekta v novih izdelkih z lastno blagovno znamko. Vodstvo HYB je članom PS zaupalo pripravo in vodenje razvojno-investicijskega programa "KeraMEMS", ki temelji na novih materialih in tehnologijah in je usmerjen v povečanje konkurenčnosti družbe z razširitvjo programa na področje keramičnih mikrosistemov. Cilj programa je prenos nove LTCC tehnologije in znanja v proizvodnjo ter izdelava pilotnih serij (npr. senzorja za invazivno merjenje krvnega tlaka v skladu z AAMI/IEC std. in več industrijskih senzorjev).
2. Člani PS so na pobudo evropskega združenja IMAPS pripravili in izvedli sklop predavanj (tutorial) z naslovom »Ceramic pressure sensors - from materials to devices«. Predavanja so bila aprila 2008 na sedežu instituta Fraunhofer v Minhnu. Predstavljeni so pomembni dosežki projekta L2-9583. (Gradivo: COBISS.SI-ID 21892391, 21891879)
3. Priznanje organizacijskega odbora "Int. Sym. Design and Technology of Electronics Packages", SIITME 2009, za odličen prispevek (Cobiss.si ID 22942503). Dokumentirano v IEEE-CMPT Vol. 32 No. 3, Sept. 2009 (ISSN 1077-2999).
4. Člani PS so tudi po zaslugi dosežkov na tem projektu vključeni v projekt Eureka E!4570, IPCTECH, Nova generacija 3D integriranih pasivnih komponent in mikrosistemov v LTCC tehnologiji (01.07.2009 – 30.6.2012).
5. Dosežki PS na tem projektu so v veliki meri pripomogli k uspešni pripravi enega od projektov Centra odličnosti NAMASTE, Napredni nekovinski materiali s tehnologijami prihodnosti. CO je bil sprejet v financiranje, kot eden od 8 izbranih med 61 prijavi na razpisu MVZT za obdobje od 2009 -2013.
6. Rezultati PS so prispevali k dobri oceni novega Razvojnega centra v Sloveniji, IN.Medical, izbranega za sofinanciranje v okviru razpisa MG in ESRR za obdobje 2011-2014. V enem od programov center predvideva razvoj novih izdelkov, ki temeljijo na rezultatih projekta.

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁹

9.1. Pomen za razvoj znanosti¹⁰

SLO

Raziskave opravljene v sklopu projekta so omogočile odkrivanje novih spoznanj o procesiranju in lastnostih keramičnih materialov z nizko temperaturo žganja (LTCC) ter prispevale k razvoju novih tehnoloških postopkov za oblikovanje tridimenzionalnih senzorskih struktur. Gre za nekonvencionalno uporabo relativno nove tehnologije in materialov, ki ob uporabi komercialnih in tudi nekaj doma razvitih debeloplastnih materialov (rezultati raziskav na vzporednih projektih) omogoča izdelavo keramičnih senzorjev tlaka, ki so zelo zanimivi za industrijsko proizvodnjo. V ta namen je bilo potrebno spoznati in ovrednotiti tudi materialne parametre in lastnosti funkcijskih debelih plasti uporabljenih za izdelavo senzorskih elementov, kar je ravno tako pomemben doprinos projekta k razvoju znanosti.

Pomemben prispevek k razvoju znanosti je tudi v tem, da projekt povezuje nove tehnološke zmožnosti z uporabo komercialnih LTCC in debeloplastnih materialov s senzorskimi principi in analizira vpliv tehnoloških rešitev na doseganje zelenih senzorskih karakteristik. Eksperimentalne in numerične analize so potrdile ustreznost nove tehnologije (in izbranih materialov) in predlaganih konstrukcijskih rešitev za izvedbo keramičnih senzorjev za nižje tlake. Nakazane so tudi možnosti obvladovanja ključnih tehnoloških problemov za bodoče raziskovalno-razvojne projekte na področju uporabe LTCC tehnologij in materialov. Doseženi rezultati, so vsekakor pomembni za bodoče raziskave na področju oblikovanja in uporabe LTCC

materialov in tudi na področju sensorike – predvsem kot atraktivna izvedba senzorjev za uporabo v specialnih pogojih okolice. Vsi ti dosežki so zelo zanimivi za različne aplikacije v praksi in kot taki pozitivno vplivajo za razvoj aplikativnega raziskovanja na področju keramičnih materialov in tehnologij in keramičnih mikro-elektromehanskih sistemov.

ANG

The investigation has contributed to the development of new technological procedures for processing three-dimensional (3D) sensor structures with Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) materials and technology. The results achieved also helped with a better understanding of the materials' functional properties and their compatibility with the relatively reactive LTCC substrate, as well as the interactions between them during processing. Moreover, the development of an up-grade of the conventional LTCC technology for manufacturing ceramic structures with cavities and channels pre-processed or even cofired together with the functional thick-film structures can be considered as an important contribution to the development of the scientific field of materials and technologies. Use of the relatively new ceramic technology together with commercial and also some new thick-film materials (non-commercial thick-film piezoceramic compositions) aimed at manufacturing the ceramic pressure sensors with functional thick-film structures are very attractive for different applications and promising for serial production.

All the results of the project individually and collectively represent an advantageous contribution to the scientific fields and give a push to development of the applied research in the field of the materials and technology for the ceramic micro electro-mechanical structures.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹¹

SLO

Na projektu pridobljeno znanje in razviti novi tehnološki postopki 3D oblikovanja LTCC struktur z funkcijskimi debelimi plastmi predstavljajo solidno osnovo za izdelavo senzorskih struktur in prenos tehnologije v proizvodnjo. Doseženi rezultati so omogočili uporabniku (sofinancerju HYB d.o.o.) začetek novega razvojnega-investicijskega programa za razvoj nove generacije lastnih keramičnih senzorjev in potencialno razširitev proizvodnega programa z lastnimi prepoznavnimi izdelki na svetovnem trgu. S tem pa lahko posredno pripomorejo k boljšem regionalnem razvoju manj razvitih področij v Republiki Sloveniji. Tako so dosežki na področju keramičnih senzorjev tlaka prispevali tudi k dobri oceni novega Razvojnega centra v Sloveniji, IN.MEDICAL, ki v enem od štirih razvojnih programov predvideva nadaljnji razvoj novih produktov, ki temeljijo na rezultatih projekta L2-9583. Dosežki projektne skupine na tem področju so v veliki meri pripomogli tudi k uspešni pripravi enega od šestih projektov centra odličnosti NAMASTE, Napredni nekovinski materiali s tehnologijami prihodnosti, ki je na razpisu MVZT sprejet v financiranje, kot eda od najbolje ocenjenih prijav.

Nenazadnje uspešna realizacija projekta odpira tudi nove možnosti za sodelovanja raziskovalne skupine in industrijskega partnerja v raziskavah doma in v evropskem prostoru ter s tem nadaljnje poglobljanje znanja in afirmacijo slovenskih raziskovalnih dosežkov. Tako npr. obvladovanje tehnologije izdelave 3D LTCC struktur, numerični modeli in analize npr. temperaturnih razmer v strukturi senzorja in drugi rezultati tega projekta, ne predstavljajo le koristno osnovo za projekte industrijskega partnerja in nadaljnje delo raziskovalne skupine na področju keramičnih mikro-elektromehanskih sistemov ampak so pomembni tudi za vključitev skupine v nove raziskave na sorodnih področjih.

ANG

An important result of the investigation so far is the new knowledge on the unconventional use of LTCC materials and technology and the development of a technological procedure for manufacturing 3D structures with the cavity and thin diaphragm on which appropriate thick-film sensing elements for miniature ceramic pressure sensors are made in post-processing. These results and know-how enable the industrial partner HYB to start with a new project aimed at the development of a new generation of ceramic pressure sensors for the market.

Due to the promising results of the project L2-9583 further investigation on this topic aimed at the development of different ceramic pressure sensors based on LTCC materials and technology was incorporated in the framework of a new Regional Research Centre IN.MEDICAL started recently in this region of the Republic of Slovenia.

The results of the project also contributed to the success in acquiring funding from the Ministry of Science and Technology for the National Center of Excellence NAMASTE, Advanced Materials and Technologies for the Future.

The achievements of project also contribute to the reputation of the research groups involved, and help them to make connections with other research partners in Slovenia and abroad. Currently, the research group is involved in several formal and informal research projects and collaborations on related investigations.

10. Samo za aplikativne projekte!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri aplikativnem projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	

		Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen

	Uporaba rezultatov	V celoti
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	

	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

Komentar

--

11. Samo za aplikativne projekte!

Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv

G.01	Razvoj visoko-šolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete					
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj					
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.09.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Komentar

--

12. Pomen raziskovanja za sofinancerje, navedene v 2. točki [12](#)

1.	Sofinancer	HYB Proizvodnja hibridnih vezij d.o.o.				
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		36.427,00	EUR		
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		25,00	%		
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja					Šifra
		1.	Vodenje razvojnih projektov v okviru programa "KeraMEMS". Projekti v programu so nastali na osnovi rezultatov raziskovalnega projekta L2-9583	D.01		
		2.	Raziskovalno delo je prispevalo k večji usposobljenosti raziskovalno-razvojnega osebja	F.03		
		3.	Raziskovalni dosežki so prispevali k oblikovanju programa "KeraMEMS", ki predstavlja začetek nove tehnologije v družbi HYB.	F.05		
		4.	Na osnovi raziskovalnih dosežkov je bilo razvitih nekaj novih prototipov senzorjev tlaka za nizke tlake	F.08		
		5.	Proizvodni program družbe je razširjen z novimi izdelki - keramični senzori nizkih tlakov.	F.06		
		Komentar	Raziskave na področju elektronskih komponent in tehnologij so bile usmerjene v izdelavo tankih membran in velikih votlin v 3D keramičnih strukturah ter keramičnih materialov z nizkim Youngovim modulom in debeloplastnih uporov z visokim piezouporovnim. To so osnove za razvoj keramičnega senzorja tlaka za merjenje nizkih tlakov. Ti in ostali rezultati projekta L2-9583 so uporabni v razvojnem programu družbe HYB s kratkim naslovom KeraMEMS. Ta razvojni program temelji na novih materialih in tehnologijah ter je usmerjen v povečanje konkurenčnosti družbe na obstoječem proizvodnem programu družbe (senzorji tlaka) in odpiranju novih tržnih možnosti na področju keramičnih mikrosistemov. Objektni cilj programa je prenos nove LTCC tehnologije in znanja v proizvodnjo, ter izdelava pilotne serije. Uspešnost programa KeraMEMS je močno odvisna tudi od povezave z raziskovalnimi organizacijami, kar nam aplikativni raziskovalni projekt omogoča.			
	Ocena	Potrjujemo, da so rezultati raziskovalnih aktivnosti v sklopu aplikativnega raziskovalnega projekta "Miniaturni keramični senzori nizkih tlakov" (Šifra ARRS: L2-9583) v skladu z načrtovanimi raziskovalnimi aktivnostmi družbe HYB. Doseženi rezultati raziskovalnega projekta so izpolnili pričakovanja družbe in jih vključujemo v razvojne programe družbe.				
2.	Sofinancer					
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:			EUR		
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:			%		
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja					Šifra
		1.				

	2.		
	3.		
	4.		
	5.		
Komentar			
Ocena			
3.	Sofinancer		
Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:			EUR
Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:			%
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
	1.		
	2.		
	3.		
	4.		
	5.		
Komentar			
Ocena			

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja, za objavo 6., 7. in 8. točke na spletni strani <http://sicris.izum.si/> ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

Marina Santo Zarnik	in	
podpis vodje raziskovalnega projekta		zastopnik oz. pooblaščen oseba RO

Kraj in datum:

Ljubljana

21.4.2011

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2011-1/114

¹ Zaradi spremembe klasifikacije družbeno ekonomskih ciljev je potrebno v poročilu opredeliti družbeno ekonomski cilj po novi klasifikaciji. [Nazaj](#)

² Samo za aplikativne projekte. [Nazaj](#)

³ Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja ter rezultate in učinke raziskovalnega projekta. Največ 18.000 znakov vključno s presledki (približno tri strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁴ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta (obrazložitev). V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikosti pisave 11). [Nazaj](#)

⁶ Navedite največ pet najpomembnejših znanstvenih rezultatov projektne skupine, ki so nastali v času trajanja projekta v okviru raziskovalnega projekta, ki je predmet poročanja. Za vsak rezultat navedite naslov v slovenskem in angleškem jeziku (največ 150 znakov vključno s presledki), rezultat opišite (največ 600 znakov vključno s presledki) v slovenskem in angleškem jeziku, navedite, kje je objavljen (največ 500 znakov vključno s presledki), izberite ustrezno šifro tipa objave po Tipologiji dokumentov/del za vodenje bibliografij v sistemu COBISS ter napišite ustrezno COBISS.SI-ID številko bibliografske enote. Navedeni rezultati bodo objavljeni na spletni strani <http://sicris.izum.si/>.

PRIMER (v slovenskem jeziku):

Naslov: Regulacija delovanja beta-2 integrinskih receptorjev s katepsinom X;

Opis: Cisteinske proteaze imajo pomembno vlogo pri nastanku in napredovanju raka. Zadnje študije kažejo njihovo povezanost s procesi celičnega signaliziranja in imunskega odziva. V tem znanstvenem članku smo prvi dokazali... (največ 600 znakov vključno s presledki)

Objavljeno v: OBERMAJER, N., PREMZL, A., ZAVAŠNIK-BERGANT, T., TURK, B., KOS, J.. Carboxypeptidase cathepsin X mediates $\beta 2$ - integrin dependent adhesion of differentiated U-937 cells. Exp. Cell Res., 2006, 312, 2515-2527, JCR IF (2005): 4.148

Tipologija: 1.01 - Izvirni znanstveni članek

COBISS.SI-ID: 1920113 [Nazaj](#)

⁷ Navedite največ pet najpomembnejših družbeno-ekonomsko relevantnih rezultatov projektne skupine, ki so nastali v času trajanja projekta v okviru raziskovalnega projekta, ki je predmet poročanja. Za vsak rezultat navedite naslov (največ 150 znakov vključno s presledki), rezultat opišite (največ 600 znakov vključno s presledki), izberite ustrezen rezultat, ki je v Šifrantu raziskovalnih rezultatov in učinkov (Glej: <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/sif-razisk-rezult.asp>), navedite, kje je rezultat objavljen (največ 500 znakov vključno s presledki), izberite ustrezno šifro tipa objave po Tipologiji dokumentov/del za vodenje bibliografij v sistemu COBISS ter napišite ustrezno COBISS.SI-ID številko bibliografske enote. Navedeni rezultati bodo objavljeni na spletni strani <http://sicris.izum.si/>. [Nazaj](#)

⁸ Navedite rezultate raziskovalnega projekta v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁹ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja. [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Največ 4.000 znakov vključno s presledki [Nazaj](#)

¹² Rubrike izpolnite/prepišite skladno z obrazcem "Izjava sofinancerja" (<http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>), ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2011-1 v1.01
5F-E5-6F-D7-B1-BB-16-1A-85-BB-36-2A-D8-97-07-BC-06-08-F2-F1