

Visoko ločljivi Fabry-Perot optični vlakenski senzorji raztezka

High resolution all-fiber Fabry-Perot strain sensors

Simon Pevec¹, Denis Donlagić¹

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: simon.pevec@um.si

Abstract. The paper presents high resolution all-fiber optic strain sensors fabricated via advanced micromachining techniques based on selective etching. These techniques allow precise and flexible fabrication of the Fabry-Perot resonators, with the possibility of fine tuning the cavity lengths to accommodate various signal interrogation schemes. The sensors are fabricated on top of single-mode or multi-mode optical fiber, exhibit high spectral sensitivity, and straightforward deployment. Furthermore, sensors are compatible with cost-effective spectral interrogation systems, including low-resolution VIS/NIR spectrometers and widely available LED sources. A strain resolution of 50 nε was demonstrated when using a single-mode fiber configuration with a super luminescent diode (SLED) and a VIS spectrometer. Additionally, a cost-efficient setup utilizing multimode fiber, a butt-coupled automotive-grade VIS LED, and a VIS spectrometer demonstrated a strain resolution of 150 nε. These results highlight the potential of the proposed sensor designs for scalable, low-cost, and high-performance strain sensing applications.

1 Uvod

Optični vlakenski senzorji raztezka so v zadnjih treh desetletjih pritegnili veliko pozornosti zaradi svojih številnih prednosti, kot so odpornost na elektromagnetne motnje, povsem dielektrična zasnova, delovanje v zahtevnih kemijsko onesnaženih okoljih, širok temperaturni razpon, majhne dimenzije, nizki stroški materiala, možnost večtočkovnega merjenja (multiplexing) in nizke izgube signala pri prenosu na dolge razdalje [1].

Zaradi teh lastnosti je bilo v zadnjem času razvitih več različnih tipov optičnih senzorjev raztezka, pri čemer pa poleg senzorjev na osnovi Fabry-Perot Interferometrov (FPI) izstopajo predvsem senzorji na osnovi Braggovih rešetk (FBG). Senzorji raztezka na osnovi FBG izstopajo predvsem zaradi visoke zanesljivosti in učinkovitosti večtočkovnega merjenja raztezka [2, 3]. Poleg tega so FBG senzorji enostavni za namestitev in relativno preprosti za izdelavo. Njihov uspeh temelji na zmožnosti neposrednega povezovanja raztezka (in temperature) z optično frekvenco, ki je fizikalna količina, merljiva z visoko natančnostjo in ločljivostjo, ter omogoča zanesljivo prenosljivost kalibracije na terenu.

Vendar pa ta ključna prednost FBG senzorjev hkrati predstavlja tudi pomembno omejitev glede dosega ločljivosti merjenja raztezka in velikih stroškov merilnega sistema. Spektralna občutljivost FBG senzorjev je razmeroma nizka, približno 1 pm/με v relevantnih valovnih območjih, kar neizogibno zahteva uporabo kompleksnih in visoko ločljivih spektralnih merilnih sistemov [4]. To velja tudi v primerih, ko so merilna območja raztezka velika in je zahtevana le zmerna ločljivost. Zahteva po visoki spektralni ločljivosti in s tem povezani visoki stroški sistema predstavljajo eno glavnih ovir za širšo uporabo FBG senzorjev v številnih potencialnih aplikacijah.

Zanesljivo merjenje raztezka v območju με ali celo nε predstavlja dodatni izziv, saj zahteva še višjo spektralno ločljivost in s tem bolj kompleksne merilne sisteme [5]. Dodatna težava pri merjenju v teh območjih izhaja iz visoke temperaturne občutljivosti FBG senzorjev [6], ki je posledica temperaturne občutljivosti lomnega količnika silicijevega stekla in je zato ni mogoče enostavno odpraviti z zasnovo FBG ali optičnega vlakna. Zato je delovanje FBG sistemov za statično ali kvazistatično merjenje raztezka v nizkem με območju pogosto omejeno z učinkovitostjo uporabljenih temperaturnih kompenzacijskih metod [7], ki so v praktičnih sistemih vedno omejene, na primer zaradi neizogibnih temperaturnih gradientov med merilnimi senzorji raztezka in kompenzacijskimi temperaturnimi senzorji.

Za razliko od senzorjev na osnovi FBG, imajo FPI senzorji občutno prednost v obliki poljubno široke kosinusne spektralne karakteristike, ki jo z razdaljo med dvema polprepustnima zrcaloma (zračna reža) določimo med postopkom izdelave senzorja.

V tem oziru so še posebej zanimivi FPI senzorji s kratko zračno režo, ki izkazujejo kosinusno spektralno karakteristiko s širokim spektralnim razponom, kar omogoča cenovno ugodno signalno razločevanje [8-10]. Interrogatorji, ki temeljijo na interferometriji z belo svetlobo [11, 12], omogočajo uporabo optičnih spektralnih analizatorjev z nizko ločljivostjo, kar odpira možnosti za cenovno dostopne merilne sisteme.

Običajno sta dolžini aktivnega območja FPI senzorja in dolžina zračne reže enaki [13-15]. Vendar pa je ta dolžina tipično omejena le na nekaj deset mikrometrov, saj pri večjih razdaljah pride do divergence žarka, kar povzroča izgube in zmanjšanje kontrasta interferenčnih vzorcev. Glavna pomanjkljivost kratkega aktivnega

območja je zmanjšana občutljivost na raztezek, saj kratka reža ne omogoča zadostne raztezne deformacije, ki je potrebna v večini praktičnih aplikacij.

Za hkratno doseglo kvalitetnega interferenčnega vzorca in doseglo večje občutljivosti mora biti aktivna dolžina senzorja mnogo večja od dolžine zračne reže. V ta namen je bilo razvitih več pristopov za izdelavo FP interferometrov s kratko zračno režo in dolgo aktivno dolžino. Pogosto uporabljen pristop vključuje vgradnjo dveh odrezanih optičnih vlaken v kapilarno cevko [16-18] ali podobne metode, kot je uporaba steklo-keramičnih prevlek [19]. Takšna zasnova običajno vključuje lepljenje vlaken na dveh točkah na vsaki strani skupne kapilare, pri čemer razdalja med točkama določa aktivno dolžino senzorja, medtem ko je zračna reža nastavljena z razmakom med koncema vlaken v kapilari. Ta pristop je enostaven in stroškovno učinkovit, vendar ima nekatere pomanjkljivosti, kot so mehanska trdnost, stabilnost senzorja in visoke zahteve glede kakovosti lepljenja za zagotovitev učinkovitega prenosa raztezka iz merjenega objekta na senzor.

V tem prispevku predstavljamo zasnovo in delovanje naprednega vlakenskega senzorja raztezka, ki temelji na Fabry–Perot interferometriji. Senzor omogoča visoko ločljivost merjenja v območju nano-raztezkov, hkrati pa lahko senzorje kombiniramo s cenovno dostopnimi spektralnimi analizatorji. Senzor se ponša z dolgo aktivno dolžino, ki je ločena od kratke zračne reže, s čimer se pri spektralnem razločevanju doseže dobro razmerje signal/šum, pri merjenju raztezkov pa se doseže velika občutljivost na raztezke. Poleg tega predstavljeni senzorji omogočajo uporabo enorodovnih ali večerodovnih dovodnih vlaken, kar odpira dodatne možnosti za robustno in cenovno ugodno spektralno razločevanje. Predstavljeni rezultati potrjujejo učinkovitost predlaganega pristopa in njegov potencial za široko uporabo v različnih industrijskih aplikacijah.

2 Zasnova senzorja in princip delovanja

Slika 1 predstavlja zasnovo senzorja raztezka, ki je izdelan iz SiO₂ optičnih vlaken in ima mnogo daljšo aktivno dolžino L_0 , kot je dolžina FP zračne reže. Razmejitev L_0 in dolžine zračne reže FP je bistvenega pomena, saj tovrstna konfiguracija s kratko FP režo omogoča dobre optične lastnosti z majhnimi optičnimi izgubami pri tvorjenju optičnih interferenc. Hkrati pa ima senzor mnogo večjo aktivno dolžino, ki neposredno omogoča merjenje raztezka z večjo občutljivostjo, saj se celoten raztezek strukture na dolžini L_0 prenese na spremembo FP zračne reže ΔL_r , ki jo lahko z različnimi interferometričnimi postopki merimo z nanometriško ločljivostjo. Sprememba dolžine zračne reže ΔL_r je povezana z raztezkom ε po izrazu:

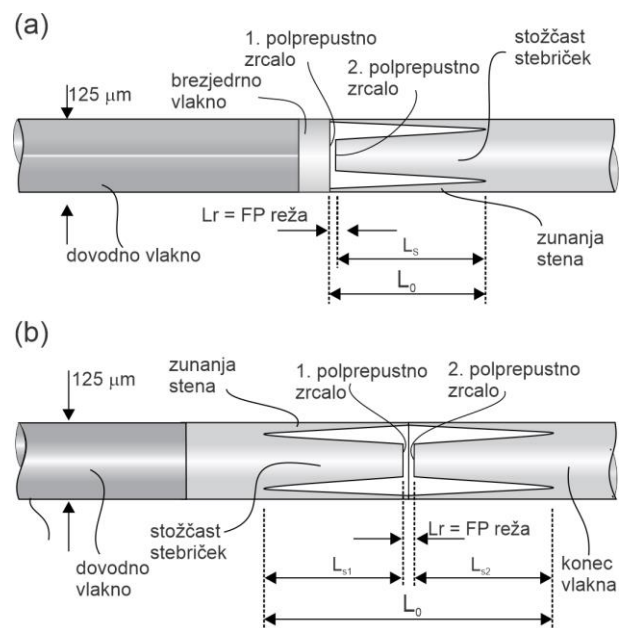
$$\Delta L_r = L_0 \cdot \varepsilon \quad (1)$$

, kjer L_0 predstavlja vsoto dolžin stožčastih stebričkov in zračne reže.

Predstavljeni sta dve različni zasnovi, ki se razlikujeta v možnosti uporabe različnih dovodnih vlaken, različni aktivni dolžini L_0 in kompleksnosti izdelave.

Senzor na sliki (Slika 1-a) predstavlja enostavnejšo zasnovo z enim stožčastim stebričkom. Senzor je izdelan na dovodnem vlaknu podaljšanim s kratkim segmentom brezjednega vlakna (BV). Zadnja ploskev BV predstavlja prvo polprepustno zrcalo, ki skupaj z drugim polprepustnim zrcalom na koncu stožčastega stebrička tvori FP zračno režo. Prednost različice senzorja predstavljene na sliki (Slika 1-a) je, da omogoča uporabo kateregakoli dovodnega vlakna, saj se posebno vlakno z izjedkanim stožčastim stebričkom uporabi le kot odbojno zrcalo in vodenje svetlobe po posebnem vlaknu skupaj s koničnim stebričkom ni potrebno.

Senzor na sliki (Slika 1-b) je nadgradnja osnovne različice senzorja in je sestavljen iz dveh mikro-obdelanih posebnih optičnih vlaken s stožčastim stebričkom. Ploskvi na vrhu stebričkov predstavljata polprepustni zrcali, ki tvorita FP zračno režo. Prednost tovrstne rešitve je v dvakrat daljši aktivni dolžini L_0 v primerjavi z enostavnejšo različico predstavljeno na sliki (Slika 1-a), ob predpostavki, da za izdelavo senzorja uporabimo enaka mikro-obdelana posebna optična vlakna z isto dolžino stebričkov. Omejitev strukture pa je v zahtevnosti izdelave posebnega vlakna, ki mora imeti tudi valovodne lastnosti, ki jih je potrebno izenačiti z dovodnim vlaknom (mnogorodovna ali enorodovna vlakna). V našem primeru je posebno vlakno (PV) načrtovano z valovodom, ki podpira mnogorodovno valovanje, zato je senzor z dvojnimi PV primeren le v konfiguraciji z mnogorodovnim dovodnim vlaknom.



Slika 1 Shematski prikaz zasnove senzorja: (a) z enojnim posebnim vlaknom, (b) z dvojnimi posebnimi vlakni.

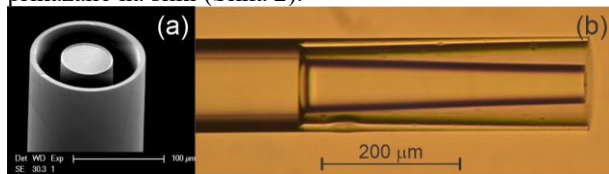
3 Proizvodni postopek

Izdelava obeh senzorjev temelji na uporabi PV, katerega presek je prikazan na sliki (Slika 3-a). Vlakno ima dve dopirani območji: prvo, osrednje območje je dopirano z nizko koncentracijo TiO_2 (približno 3,2 mol %), drugo, obročasto območje, pa je močno dopirano s P_2O_5 (približno 10,5 mol%). Med obema dopiranimi območjema je vstavljena obročna pregrada iz čistega SiO_2 , ki ščiti osrednje dopirano območje pred stranskim (radialnim) jedkanjem. Brez uporabe te obročaste pregrade bi višja hitrost jedkanja osrednjega območja skrajšala dovoljeni čas jedkanja, kar bi posledično zmanjšalo nastanek globokih kanalov okoli centralnega stebrička.

Dopirana področja vlakna se v fluorovodikovi kislini (HF) jedkajo hitreje kot čisti SiO_2 . Hitrost jedkanja je močno odvisna od koncentracije HF v razmerju z isopropilnim alkoholom (IPA) ter od vsebnosti določenega dopanta [20, 21]. Med raziskanimi dopanti [8], združljivimi z obstoječimi postopki izdelave optičnih vlaken, P_2O_5 najbolj poveča hitrost jedkanja, medtem ko dopiranje s TiO_2 le omejeno vpliva na hitrost jedkanja. Steklo dopirano s TiO_2 bistveno ne zmanjša viskoznosti stekla, kar omogoča intenzivnejšo toplotno obdelavo struktur, dopiranih s TiO_2 ; v tem primeru stebrička, za katerega ne želimo, da se med varjenjem upogne/deformira.

Izdelava obeh različic senzorjev je preprosta, saj je potrebnih le nekaj enostavnih korakov kot so rezanje, varjenje, jedkanje in po potrebi raztezanje, da se senzor izdela, kar je dobra osnova za morebitno serijsko proizvodnjo/avtomatizacijo in komercializacijo.

Izdelava senzorja z enojnim posebnim vlaknom je predstavljena na sliki (Slika 3) in se prične s pripravo posebnega vlakna, ki ga pravokotno odrezanega izpostavimo razredčeni 72% HF kislini ($\text{HF}:\text{IPA}=3:7$), da se izjedka v stožčasto oblikovano PV kot je prikazano na sliki (Slika 2).

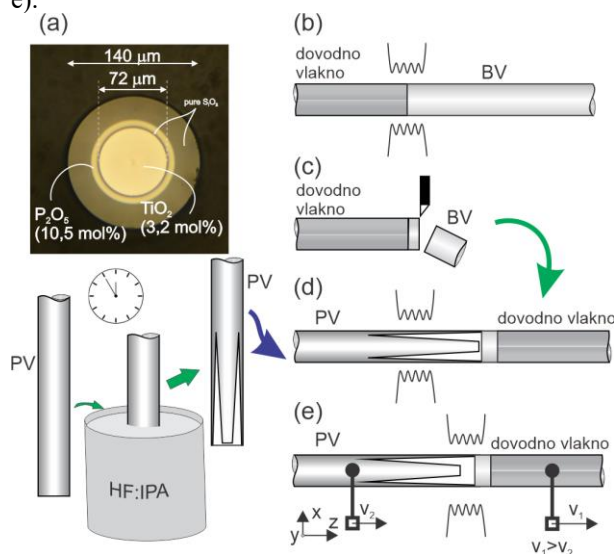


Slika 2 Slika tipičnega izjedkanega PV: (a) slika narejena z elektronskim mikroskopom, (b) slika z optičnim mikroskopom.

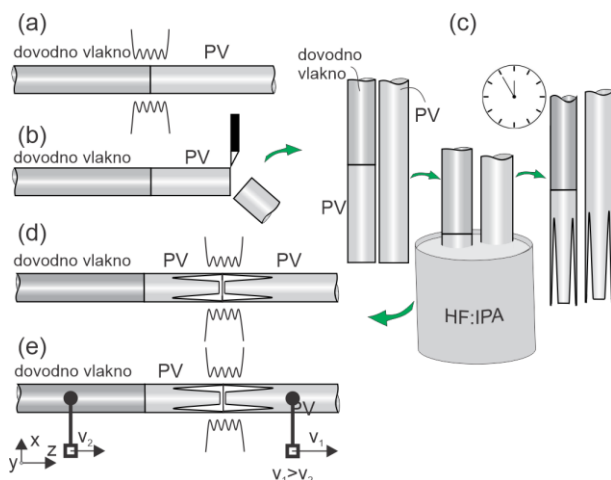
Korak jedkanja se tipično izvaja s hkratnim jedkanjem več desetih PV (Slika 3-a), da skrajšamo porabljen čas na en izdelan senzor v primeru izdelave večjega števila senzorjev. Tipične dolžine stebričkov po jedkanju so med 300 in 500 μm , medtem ko je vrh stebrička poglobljen tipično za 5 do 8 μm , kar je dovolj, da lahko vlakno spojimo/zvarimo z dovodnim vlaknom tako, da med vrhom stebrička in steno dovodnega vlakna ostane zračna reža. Ko imamo vlakno izjedkano, pričnemo s pripravo dovodnega vlakna, tako da ga odrežemo in zvarimo z BV (Slika 3-b). Sledi precizno rezanje s pomočjo ultrasoničnega rezalnika pod optičnim mikroskopom, kjer BV odrežemo približno 50 μm

vstran od vara (Slika 3-c). Segment BV je priporočljiv, ker med varjenjem, kjer se vlakna segrejejo do točke zmehčanja, BV preprečuje da bi se jedro ukrivilo/izbočilo, saj ima jedro zaradi vsebnosti dopantov kot je GeO_2 tipično nižjo temperaturo zmehčanja in višji temperaturni razteznostni koeficient. Izbočenje jedra negativno vpliva na kvaliteto optičnega zrcala, saj je odbojnost maksimalna pri pravokotni mejni ploskvi, z ukrivljanjem pa se odbojnost zmanjša. V naslednjem koraku izjedkano PV zvarimo z dovodnim vlaknom (Slika 3-d) in po potrebi v zadnjem koraku strukturo še na kontroliran način v varilniku Vytran FFS-2000 raztegnemo (Slika 3-e), da nastavimo željeno dolžino FP zračne reže, ki jo prilagodimo potrebam signalnega razločevanja.

Proizvodni postopek z dvojnim posebnim vlaknom je prikazan na sliki (Slika 4) in se začne z varom med dovodnim vlaknom in PV (Slika 4-a), nakar sledi rezanje PV na dolžino, ki mora biti večja od predvidene končne dolžine stebrička; tipične dolžina PV po rezanju je med 1 in 2 mm (Slika 4-b). Tako pripravljena dovodna vlakna skupaj s pravokotno odrezanimi PV potopimo v kislino ter počakamo približno 70 minut (Slika 4-c), da se pri regulirani temperaturi (v našem primeru 10 °C) izjedkajo v željeno obliko s končnim premerom 125 μm in stebričkom v sredini (Slika 2). Nato dovodno vlakno z izjedkanim PV zvarimo skupaj z izjedkanim PV (Slika 4-b). V zadnjem koraku zvarjeno strukturo še po potrebi raztegnemo, da FP režo prilagodimo potrebam signalnega razločevanja (Slika 4-e).

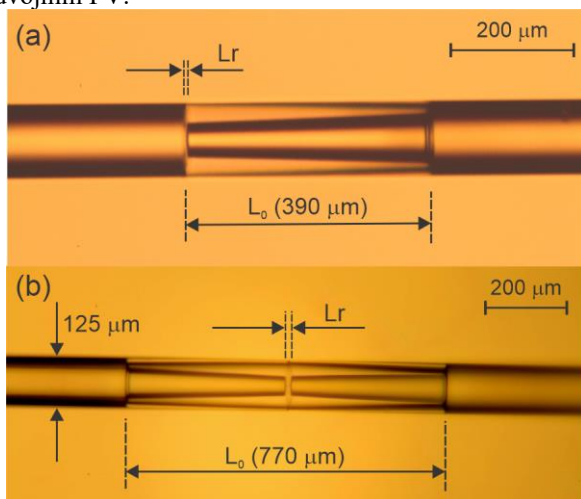


Slika 3 Proizvodni postopek z enojnim posebnim vlaknom.



Slika 4 Proizvodni postopek z dvojnimi posebnimi vlakni.

Slika 5 prikazuje tipičen primer izdelanih senzorjev raztezka v enojni in dvojni konfiguraciji. Aktivna dolžina izdelanih senzorjev je bila $390\ \mu\text{m}$ v konfiguraciji z enojnim PV in $770\ \mu\text{m}$ v konfiguraciji z dvojnimi PV.



Slika 5 Tipične fotografije izdelanih senzorjev pod optičnim mikroskopom: (a) senzor raztezka z enojnim PV, (b) senzor raztezka z dvojnimi PV.

4 Eksperimentalna postavitve

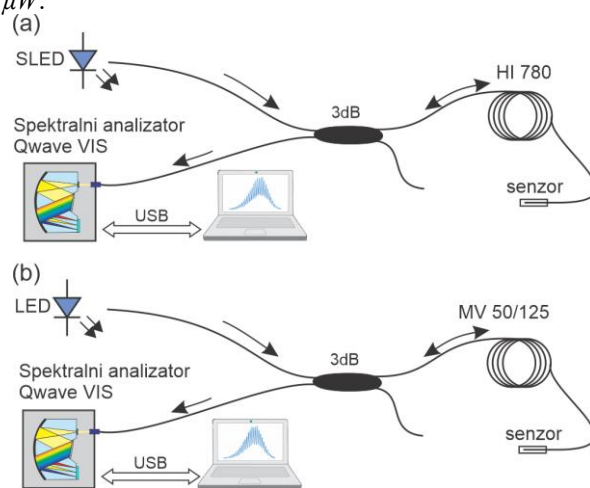
V nadaljevanju bo predstavljen demonstrator za testiranje optičnih senzorjev raztezka. Ločeno bosta predstavljeni dve optični postavitvi in mehanski del demonstratorja

4.1 Postavitev optičnega sklopa

V sklopu raziskav smo izdelali in testirali dve različici predlaganega senzorja s pripadajočimi optičnimi postavitvami predstavljenimi na sliki (Slika 6). Obe različici sta uporabljali enak spektrometer Broadcom QWave VIS (350–880 nm). Gre za spektrometer, ki je splošno namenski, stroškovno učinkovit z deklarirano spektralno ločljivostjo $0,5\ \text{nm}$.

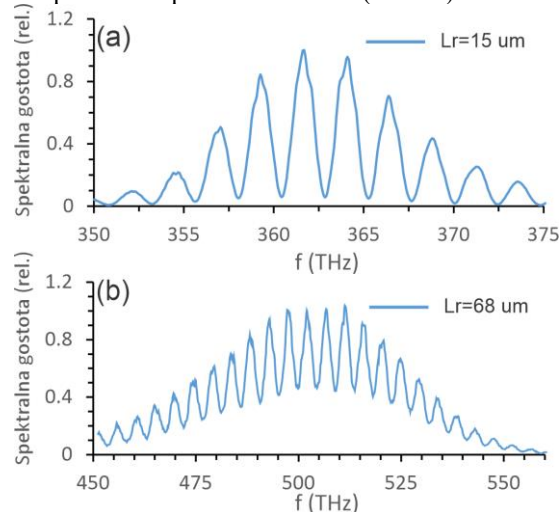
Prva različica na osnovi enojnega PV temelji na enorodovnem dovodnem vlaknu HI780. Senzor je bil poleg spektrometra povezan še z optičnim delilnikom in z visoko-svetlečo diodo SLED, ki deluje v področju valovnih dolžin $820\ \text{nm}$, ima spektralno širino (FWHM) približno $30\ \text{nm}$ ter izhodno optično moč $1\ \text{mW}$.

Druga različica temelji na mnogorodovnem dovodnem vlaknu $50/125\ \mu\text{m}$ za delovanje v vidnem področju. Senzor izdelan z mnogorodovnim vlaknom je bil povezan preko mnogorodovnega delilnika z istim spektrometrom in običajno LED diodo (Luxeon PC Amber), namenjeno razsvetljavi in avtomobilskim aplikacijam. Osrednja valovna dolžina LED je bila $590\ \text{nm}$, medtem ko je bila spektralna širina (FWHM) skoraj $80\ \text{nm}$. Amber dioda smo s pomočjo po meri izdelanih mehanskih delov sklopili v mnogorodovno vlakno $50/125$, kar je rezultiralo v izhodni moči približno $14\ \mu\text{W}$.



Slika 6 Optični progi za enorodovno in mnogorodovno konfiguracijo.

V obeh primerih so uporabljene konfiguracije omogočale zajem odbitih optičnih spektrov. Primeri obeh spektrov so prikazani na sliki (Slika 7).



Slika 7 Odbitni optični spekter v frekvenčnem področju: (a) enorodovna postavitev s senzorjem z enojnim PV, (b) mnogorodovna postavitev s senzorjem z dvojnimi PV.

Dolžine FP zračnih rež so bile nastavljene na $68 \mu\text{m}$ (senzor z enojnim PV) in $15 \mu\text{m}$ (senzor z dvojnim PV), kar je v kombinaciji z uporabljenimi optičnimi viri ustrezalo spektralnemu razločevanju z Broadcom spektralnim analizatorjem Qwave VIS.

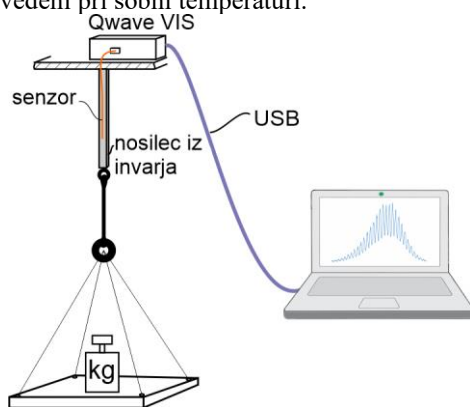
V obeh primerih sta bila odbita optična spektra obdelana na enak način. Optični spekter vsakega sensorja je bil najprej pretvorjen iz valovne dolžine v frekvenčno domeno. Nato je bila na pridobljenem spektru izvedena hitra Fourierjeva transformacija (FFT), pri čemer se je iskala frekvenčna komponenta z največjo absolutno vrednostjo v FFT. Faza Φ te komponente z največjo absolutno vrednostjo v FFT predstavlja fazo sinusoidne spektralne karakteristike prebranem optičnem spektru in jo je mogoče povezati s spremembo dolžine Fabry-Perot zračne reže ΔL_r po naslednjem izrazu:

$$\Delta L_r = \Delta\Phi \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \quad (2)$$

Kjer $\Delta\Phi$ predstavlja spremembo faze, λ pa osrednjo valovno dolžino uporabljenega optičnega vira. Ta metoda z FFT omogoča učinkovito in nizko-šumno določanje položaja interferenčnega vzorca FPI v prebranem optičnem spektru, kot je na primer opisano pri signalnem razločevanju večparametričnih FPI senzorjev [22].

4.2 Mehanski del demonstratorja

Statistične karakteristike in ločljivosti obeh eksperimentalno izdelanih sistemov za merjenje raztezka sta bili izmerjeni z obešanjem kalibriranih uteži na konec vrvice, ki je bila povezana z invarjevim nosilcem, kot je prikazano na sliki (Slika 8). Vsi testi so bili izvedeni pri sobni temperaturi.



Slika 8 Eksperimentalna postavitev.

Vsi senzorji so bili pritrjeni na palico kvadratnega preseka velikosti $8,25 \times 8,25 \text{ mm}$, izdelano iz materiala Super Invar, dolžine 110 mm . Palica je bila pritrjena na vrhu in postavljena v navpični položaj, medtem ko je bila na njen spodnji del pritrjena tanka, prožna vrstica iz kevlarja, prilagojena za obešanje različnih uteži, kot je prikazano na sliki (Slika 8).

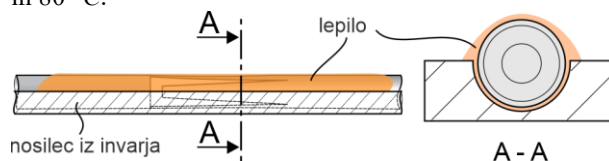
Presek palice je bil izbran tako, da je vsak kilogram uteži povzročil raztezek palice $1 \mu\epsilon$. Razmerje med maso obešene uteži in povzročeno deformacijo v invarjevi palici je mogoče izraziti z dobro znanim razmerjem med raztezkom in mehansko napetostjo:

$$\epsilon = \frac{\delta}{E} = \frac{F}{A \cdot E} = \frac{m \cdot g}{A \cdot E} \quad (3)$$

kjer je ϵ povzročeni raztezek v nosilcu, δ mehanska napetost povzročena z maso uteži, m masa uteži, A presek invarjevega nosilca, g gravitacijski pospešek in E Youngov modul elastičnosti za invar. Za izračunane vrednosti raztezkov smo v eksperimentalnem sistemu uporabili naslednje vrednosti: $E = 145 \text{ GPa}$, $A = 68,06 \text{ mm}^2$ in $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Na osnovi povezave med maso uteži in povzročeno deformacijo/raztezkom smo nadzorovali spreminjanje raztezka testnega invarjevega nosilca v območju $n\epsilon$ z uporabo kalibriranih uteži.

Pritrditev senzorjev na invarjev nosilec je bila izvedena z uporabo lepila Vishay M-Bond AE-10 Strain Gage Adhesive. Instalacija senzorja je prikazana na sliki (Slika 9), je vključeval plitek (približno $70 \mu\text{m}$ globok) utor s polkrožnim prerezom in širino približno $130 \mu\text{m}$, ki je bil izdelan na površini invarjevega nosilca. Nosilec je bil nato predhodno aksialno stisnjen tako, da je povzročil $30\text{--}100 \mu\epsilon$ tlačnega raztezka v palici. Utor je bil nato napolnjen z lepilom, senzorji oz. vlakna so bila potisnjena v utor, pri čemer je bil odstranjen odvečni lepilni material. Po začetnem strjevanju epoksija pri sobni temperaturi je bilo izvedeno še strjevanje pri 80°C za najmanj 60 minut. Po odstranitvi prednapetosti iz invarjeve palice je bila palica s senzorji dodatno izpostavljena približno 5 temperaturnim ciklom med 30 in 80°C .



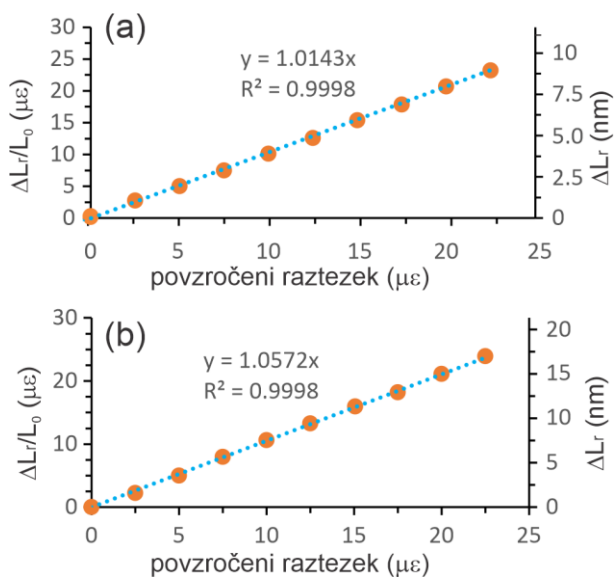
Slika 9 Shematski prikaz pritrditve senzorja v plitek utor v nosilcu iz invarja.

5 Eksperimentalni rezultati

Slika 10 prikazuje statične karakteristike obeh sistemov pri obremenjevanju invarjevega nosilca z raztezki v območju od 0 do $22,5 \mu\epsilon$. Raztezek je mogoče izračunati iz izmerjene spremembe dolžine FP reže ΔL_r po naslednji enačbi:

$$\epsilon = \frac{1}{k} \frac{\Delta L_r}{L_0} = \Delta\Phi \frac{1}{k} \frac{\lambda}{4\pi L_0} \quad (4)$$

Kjer je L_0 aktivna dolžina senzorja (dolžina stebričkov skupaj s FP režo), ΔL_r pa sprememba optične dolžine FP reže, medtem ko k predstavlja faktor občutljivosti (gauge factor), ki je določen z načinom pritrditve senzorja in njegovo geometrijo. Slika 8 prikazuje izmerjene spremembe dolžine votline ΔL_r in razmerje $\Delta L_r/L_0$ kot funkcijo uporabljenega raztezka za vse različice senzorjev. Vsi testirani senzorji so imeli faktorje občutljivosti med vrednostmi 1.01 in 1.06 , kar potrjuje zelo dober prenos raztezka med invarjevo palico preko lepila do senzorja. Vse statične karakteristike izkazujejo linearno odvisnost.

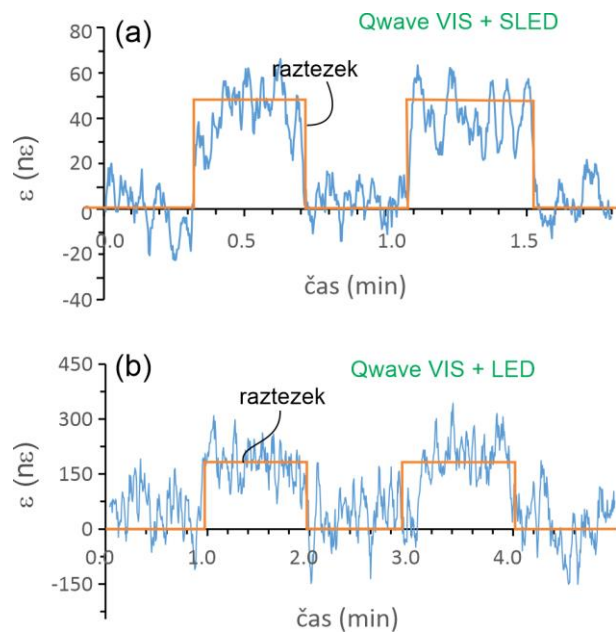


Slika 10 Statični karakteristiki za dva različna senzorja: (a) enorodovna postavitev s senzorjem z enojnim PV, (b) mnogorodovna postavitev s senzorjem z dvojnimi PV.

Ločljivost merilnega sistema je bila določena pri frekvenci vzorčenja 1 Hz, s cikličnim obremenjevanjem invarjevega nosilca (prek Kevlarove niti) z različnimi majhnimi utežmi. Ločljivost sistema je bila nato ocenjena kot raztezek, potreben za ustvarjanje izhodnega signala z amplitudo, ki je približno enaka srednji kvadratni vrednosti (RMS) amplitude šuma na izhodu sistema. Rezultati ločljivosti za oba testirana senzorja so prikazani na sliki (Slika 11).

Približno 50 nε ločljivost je bila demonstrirana s kombinacijo enorodovnega vlakna, povezanega s SLED virom, in spektrometrom Broadcom QWave VIS.

S cenovno ugodnejšim merilnim sistemom na osnovi mnogorodovnega vlakna, senzorja z dvojnimi PV in cenene LED diode, ki se uporablja za razsvetlavo v avtomobilskih aplikacijah (VIS-LED), ter spektrometrom Broadcom QWave VIS, pa je bila dosežena ločljivost raztezka v področju 200 nε.



Slika 11 Prikaz ločljivosti obeh različnih senzorjev: (a) enojni senzor z uporabo SLED- 820 nm, in Broadcom QWave VIS spektrometer (ocenjena ločljivost 50 nε), (b) z uporabo nizkocenovne LED diode v kombinaciji z mnogorodovnim vlaknom in Broadcom QWave VIS spektrometrom (ocenjena ločljivost 200 nε).

6 Zaključek

V članku sta predstavljena dve konfiguraciji miniaturnih, povsem optičnih vlakenskih Fabry-Perot senzorjev raztezka. Izdelava obeh senzorjev je preprosta in temelji na posebnem optičnem vlaknu, ki s postopkom mikro-obdelave na osnovi selektivnega jedkanja omogoča razmejitev aktivne dolžine senzorja in dolžine zračne reže, kar prispeva k veliki občutljivosti senzorja, hkrati pa so optične izgube pri formaciji optičnih interferenc minimalne. Oba koncepta predstavljata učinkovito rešitev v aplikacijah, ki zahtevajo visoko ločljivost (v področju nε) in stroškovno učinkovito obdelavo signalov, saj lahko senzorje s kratkimi FP resonatorji kombiniramo z nizko-ločljivimi optičnimi spektralnimi analizatorji.

Financiranje

Zahvaljujemo se Javni agenciji za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) za podporo pri tem delu v okviru raziskovalnega projekta P2-0368.

Literatura

- [1] M. Ramakrishnan, G. Rajan, Y. Semenova *et al.*, "Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials," *Sensors*, 16(1), (2016).
- [2] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, D. C. Johnson *et al.*, "Narrow-Band Bragg Reflectors in Optical Fibers," *Optics Letters*, 3(2), 66-68 (1978).

- [3] C. E. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella *et al.*, "Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications," *Sensors*, 18(9), (2018).
- [4] G. Gagliardi, M. Salza, S. Avino *et al.*, "Probing the Ultimate Limit of Fiber-Optic Strain Sensing," *Science*, 330(6007), 1081-1084 (2010).
- [5] Q. W. Liu, T. Tokunaga, and Z. Y. He, "Realization of nano static strain sensing with fiber Bragg gratings interrogated by narrow linewidth tunable lasers," *Optics Express*, 19(21), 20214-20223 (2011).
- [6] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*, "Fiber grating sensors," *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1442-1463 (1997).
- [7] N. Tanaka, Y. Okabe, and N. Takeda, "Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates," *Smart Materials & Structures*, 12(6), 940-946 (2003).
- [8] Y. Jiang, "Fourier-transform phase comparator for the measurement of extrinsic fabry-perot interferometric sensors," *Microwave and Optical Technology Letters*, 50(10), 2621-2625 (2008).
- [9] B. Yu, A. B. Wang, and G. R. Pickrell, "Analysis of fiber Fabry-Perot interferometric sensors using low-coherence light sources," *Journal of Lightwave Technology*, 24(4), 1758-1767 (2006).
- [10] F. B. Shen, and A. B. Wang, "Frequency-estimation-based signal-processing algorithm for white-light optical fiber Fabry-Perot interferometers," *Applied Optics*, 44(25), 5206-5214 (2005).
- [11] E. Pinet, "Fabry-Perot Fiber-Optics Sensors for Physical Parameters Measurements in Challenging Conditions," *Journal of Sensors* 9(2009).
- [12] C. Belleville, and G. Duplain, "White-Light Interferometric Multimode Fiberoptic Strain Sensor," *Optics Letters*, 18(1), 78-80 (1993).
- [13] J. S. Sirkis, D. D. Brennan, M. A. Putman *et al.*, "In-Line Fiber Etalon for Strain-Measurement," *Optics Letters*, 18(22), 1973-1975 (1993).
- [14] E. Cibula, and D. Donlagic, "In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR," *Optics Express*, 15(14), 8719-8730 (2007).
- [15] T. Wei, Y. K. Han, H. L. Tsai *et al.*, "Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser," *Optics Letters*, 33(6), 536-538 (2008).
- [16] K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar *et al.*, "Quadrature Phase-Shifted, Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors," *Optics Letters*, 16(4), 273-275 (1991).
- [17] J. Zhang, G. D. Peng, L. Yuan *et al.*, "Composite-cavity-based Fabry-Perot interferometric strain sensors," *Optics Letters*, 32(13), 1833-1835 (2007).
- [18] Y. N. Zhang, Y. J. Li, T. Wei *et al.*, "Fringe Visibility Enhanced Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Using a Graded Index Fiber Collimator," *Ieee Photonics Journal*, 2(3), 469-481 (2010).
- [19] A. Sakamoto, and J. Nishii, "Fiber Fabry-Perot interferometer with precision glass-ceramic jacketing," *Ieee Photonics Technology Letters*, 17(7), 1462-1464 (2005).
- [20] S. Pevec, E. Cibula, B. Lenardic *et al.*, "Micromachining of Optical Fibers Using Selective Etching Based on Phosphorus Pentoxide Doping," *Ieee Photonics Journal*, 3(4), 627-632 (2011).
- [21] J. Kochan, T. Wintgens, R. Hochstrat *et al.*, "Impact of wetting agents on the filtration performance of polymeric ultrafiltration membranes," *Desalination*, 241(1-3), 34-42 (2009).
- [22] S. Pevec, and D. Donlagic, "Multiparameter fiber-optic sensors: a review," *Optical Engineering*, 58(7), (2019).