

# SENZORI NA BAZI OPTIČKIH VLAKANA I NJIHOVE PRIMENE U GRAĐEVINARSTVU

Ljiljana Brajović

Ključne reči : optička vlakna, fiberoptički senzori, konstrukcijski monitoring, distributivni senzori

## KRATAK SADRŽAJ

Primene fiberoptičkih senzora (FOS) u oblasti građevinarstva se više od dvadeset godina intenzivno proučavaju za potrebe praćenja stanja mostova, hidrotehničkih brana, tunela, zgrada, kao i putne i železničke infrastrukture. Posebno pogodni tipovi FOS za ove namene su senzori sa ugrađenim Bragovim rešetkama i distributivni FOS, a koji su dostupni sada i u obliku različitih komercijalizovanih senzorskih sistema. U ovom radu su objašnjeni principi rada, trenutno dostignut nivo razvoja i merne karakteristika različitih tipova FOS i prikazani su primeri njihove primene u različitim oblastima građevinarstva. Diskutovane su njihove prednosti i ograničenja za primene u građevinarstvu kao i mogućnosti daljih poboljšanja.

## FIBEROPTIC SENSORS AND THEIR APPLICATION IN CIVIL ENGINEERING

Key words: optical fibers, fiberoptic sensors, structural health monitoring, distributive sensors

## ABSTRACT

Applications of fiber optic sensors (FOS) in the field of civil engineering is intensively studied for structural health monitoring of bridges, hydrotechnical dams, tunnels, buildings, piles, as well as road and railway infrastructure. Particularly suitable types of FOS for these purposes are Bragg gratings sensors and distributed FOS, which are already available as a part of commercialized sensor systems. This paper explains the principles of operation, the current level of development and measurement characteristics of different types of FOS and presents the examples of their application in various fields of civil engineering. The advantages and limitations of FOS for civil engineering applications are discussed, as well as the possibilities of further improvements.

## UVOD

Senzori na bazi optičkih vlakana (OV), fiberoptički senzori (FOS) su počeli da se razvijaju sedamdesetih godina dvadesetog veka, kao sporedna oblast u okviru optičkih komunikacija zahvaljujući dostupnosti različitih tipova optičkih vlakana, odgovarajućih izvora i detektora svetlosnih signala, komponentata za njihovo lako sprezanja i razvijenih tehnika obrade signala [1, 2].

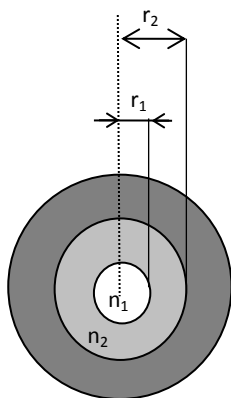
Kao senzori, FOS imaju svoje prednosti u odnosu na klasične električne senzore, kao što su: a) male dimenzije i težina, b) neosetljivost na elektromagnetske smetnje, c) mogućnost primene u prisustvu jakih električnih i magnetskih polja kao i u hemijski agresivnim sredinama, d) prilagodljivost konfiguracije mernom mestu, e) mogućnost ugradjivanja u različite materijale bez remećenja njihove strukture, f) jednostavno prenošenje mernih signala na velika rastojanja, jer se isto OV koristi i kao senzor i kao prenosnik signala g) stabilnost karakteristika tokom dužeg vremenskog perioda i sl. Posebna osobina koju nemaju drugi tipovi senzora je mogućnost jednostavnih konfiguracija kvazi-distributivnih i distributivnih merenja na velikim rastojanjima, gde svaka tačka OV postaje senzor i mogu da se mere parametri duž kilometarskih dužina postavljenog OV.

Svaka od navedenih prednosti je unela nove mogućnosti i unapredjenja u različitim oblastima primene senzora i senzorskih sistema. Sada, posle više od 50 godina njihovog razvoja uvidelo se da cenom ne mogu da budu konkurentni i ne mogu da zamene masovno korišćenje klasičnih električnih i mehaničkih senzora, ali se sve više koriste za merenja koja se ili ne mogu izvršiti klasičnim sensorima ili tamo gde klasični senzori u pogledu tačnosti, stabilnosti, brzine rada imaju znatno lošije karakteristike.

Od kraja dvadesetog veka mogućnost primene FOS u oblasti građevinarstva se intenzivno proučava za praćenja stanja mostova, hidrotehničkih brana, tunela, zgrada, šipova kao i putne i železničke infrastructure. Razvijaju se njihove primene kao površinskih ili ugrađenih senzora za ranu detekciju i praćenje razvoja defekata, pojavu korozije kod armirano-betonskih konstrukcija, praćenje deformacija građevinskih elemenata i struktura. Poslednjih deset godina se izdvajaju neki tipovi FOS koji su posebno pogodni za primene u građevinarstvu kao što su senzori sa ugrađenim Bragovim rešetkama i distributivni FOS, koji su sve više i komercijalno dostupni [3,4].

U ovom radu su objašnjeni principi rada i trenutno dostignut razvoj različitih tipova FOS koji se koriste u oblasti građevinarstava. Opisani su primeri primene u različitim oblastima građevinarstva, diskutovane su njihove prednosti i mane, kao i mogućnosti njihovog daljeg unapređenja.

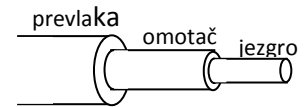
## STRUKTURA I KARAKTERISTIKE OPTIČKIH VLAKANA



Slika.2 Poprečni presek OV

Optička vlakna (OV) su dielektrični cilindrični talasovodi [1, 2, 4]. Ona su najčešće kružnog poprečnog preseka i sastoje se od tri osnovna sloja, a to su jezgro, omotač i primarna zaštita ili prevlaka i na slikama 1 i 2 prikazani su podužni izgled i poprečni presek OV. Jezgro je centralni deo optičkog vlakna, ima poluprečnik  $r_1$ , i načinjeno je od transparentnog materijala (najčešće stakla) indeksa prelamanja  $n_1$ .

Omotač ima poluprečnik  $r_2$  i izrađen je ili od stakla ili od plastike indeksa prelamanja  $n_2$ , koji je manji od  $n_1$ . Jezgro i omotač omogućavaju vođenje svetlosti duž OV, usled pojave totalne refleksije na graničnom sloju jezgro-omotač. Treći sloj, primarna zaštita ili prevlaka, ne učestvuje u vođenju svetlosti kroz OV, ali ima ulogu da doprinosi dodatnoj mehaničkoj čvrstoći OV, kao i da ga štiti od nepovoljnih spoljnih uticaja. Pored osnovne strukture, optička vlakna



Slika.1. Struktura optičkog vlakna

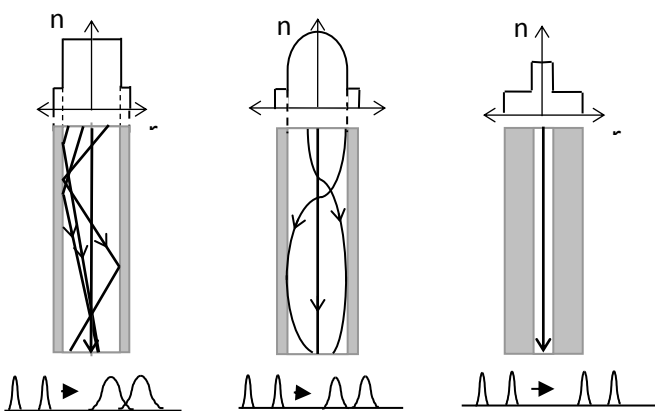
se kao pojedinačna ili snopovi dodatno kabliraju i imaju na taj način dodatne zaštitne slojeve i ojačanja i nazivaju se optički kablovi.

Za opisivanje propagacionih karakteristika optičkog vlakna često se koriste parametri kao što su numerička apertura (NA),  $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  i relativna promena indeksa prelamanja ( $\Delta$ ),  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ .

Prema nameni i masovnosti proizvodnje OV se dele na standardna telekomunikaciona i specijalna. Standardna telekomunikaciona OV imaju kružni poprečni presek i prema broju modova tj. talasa koji se njima vode dele se na multimodna i monomodna, a prema načinu promene indeksa prelamanja duž poprečnog preseka jezgra na ona sa stepenastom promenom indeksa prelamanja kod kojih je indeks prelamanja jezgra konstantan po celom poprečnom preseku jezgra i gradijentna kod kojih je zavisnost indeksa prelamanja od rastojanja od centra jezgra parabolična. Na slici 3 je predstavljena zavisnost indeksa prelamanja jezgra od rastojanja od centra OV za dva tipa multimodnih i monomodno OV, kao i način prenošenja impulsnih svetlosnih signala.

Multimodna OV se izrađuju tako da njihov prečnik jezgra, minimalno iznosi  $50 \mu\text{m}$ , a parametar  $\Delta$  je veći ili jednak 1%. Zahvaljujući većem prečniku jezgra njima se mogu voditi optički signali većeg intenziteta, lakše je nastavljajanje i spajanje ovih OV međusobno i sa drugim optičkim komponentama. Prednost multimodnih gradijentnih OV je u tome da je vremensko kašnjenje između modova mnogo manje i iznosi nekoliko ns/km, dok je kod onih sa stepenastim indeksom prelamanja ono od 30-50 ns/km. Monomodna OV

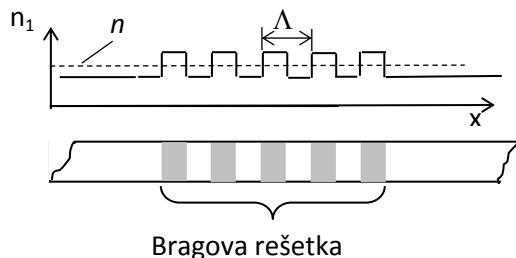
vode samo jednu vrstu talasa. Ovaj talas ili mod se može radi lakšeg opisa njegovog prostiranja aproksimativno predstaviti superpozicijom dva ortogonalno polarizovana talasa. Monomodna OV imaju prečnik jezgra najčešće manji od  $10 \mu\text{m}$ , a parametar  $\Delta$  ima vrednosti od 0,1-1%. Uvođenje svetlosti u monomodna OV i njihovo precizno spajanje i nastavljajanje je teže, ali zato oni vode svetlosne impulse neizmenjenog oblika na velikim dužinama. Ovaj tip OV se najmasovnije proizvodi od svih vrsta, pa su i optičke komponente koje služe za njihovo spajanje i povezivanje postale jeftinije nego



Slika 3. Zavisnost indeksa prelamanja duž prečnika OV, talasni oblik prostirućih zraka i izobličenje optičkih impulsa po prolasku kroz OV za a) multimodno OV sa stepenastom promenom  $n$ , b) gradijentno OV i c) monomodno OV

za multimodna. Pored OV sa staklenim jezgrom razvijaju se i koriste telekomunikaciona OV sa plastičnim ili polimernim jezgrima i omotačem. Kod ovih vlakana prečnici jezgra mogu biti reda milimetra i znatno se lakše spajaju i manje su mehanički osetljiva, ali je zato slabljenje signala duž vlakna veće pa se koriste za prenos signala na kraća rastojanja za razliku od staklenih OV. Kada bi monomodno OV telekomunikacionog tipa bilo idealno kružnog poprečnog preseka i materijali od kojih su načinjeni jezgro i omotač idealno homogeni, vođeni ortogonalni talasi bi imali jednake brzine prostiranja i među njima ne bi bilo faznog kašnjenja, i rezultujući talas bi bio linearno polarizovan. Međutim, u realnosti zbog slučajnih odstupanja od idealnog oblika i nehomogenosti materijala duž OV, javlja se dvojno prelamanje, tj javlja se razlika u brzinama prostiranja ortogonalnih talasa, pa vođeni talas nije više linearno već eliptično polarizovan. Senzorske i telekomunikacione primene monomodnih OV kod kojih je bitno održanje linearne polarizacije talasa tako ne mogu biti potpuno ostvarene, pa se za tu svrhu koriste OV sa već ugrađenim velikim dvojnim prelamanjem daleko većim od postojećeg slučajnog. Ona predstavljaju jedan tip specijalnih OV koja imaju svoje dve glavne optičke ravni duž kojih može polarizovani talas da se uvodi i vodi duž vlakna, a pri tome zadržava stanje svoje polarizacije. To je postignuto specijalnom strukturom OV tako da je ili jezgro ili omotač eliptičnog poprečnog preseka ili jezgro ili omotač podužno imaju neke umetke. Pored ovih proizvode se i specijalna OV sa dva ili više jezgara. Opisana specijalna optička vlakna, kao i neka druga se koriste za posebne tipove FOS, ali zbog svoje znatno veće cene proizvodnje, ona se mnogo ređe koriste od standardnih telekomunikacionih.

Posebna vrsta i monomodnih multimodnih OV su ona sa ugrađenim Bragovim rešetkama [2, 5]. Kod njih postoji podužno periodično variranje indeksa prelamanja jezgra na dužini do 1 cm ( slika 4) i ova periodična promena indeksa naziva se Bragova rešetka (FBG) i ostvaruje se posebnim optičkim postupkom



Slika 4. Struktura OV sa ugrađenom Bragovom rešetkom

na delu OV gde je prethodno uklonjena zaštita. Ako se svetlost nekog šireg opsega talasnih dužina uvede u ovo OV, ono na mestu rešetke reflektuje svetlost talasne dužine  $\lambda_B$  koja se naziva Bragova talasna dužina i određuje kao

$$\lambda_B = 2 \cdot n \cdot \Lambda \quad (1)$$

gde je  $n$  srednja vrednost indeksa prelamanja jezgra koji podužno varira, a  $\Lambda$  podužni period promene indeksa prelamanja jezgra. Svetlost ostalih uvedenih talasnih dužina se propušta. Intenzitet reflektovane svetlosti zavisi od dužine i perioda rešetke, razlike minimalnog i maksimalnog indeksa prelamanja jezgra, kao i od indeksa prelamanja omotača i dimenzija jezgra.

prelamanja jezgra, kao i od indeksa prelamanja omotača i dimenzija jezgra.

## OSNOVNI TIPOVI FOS

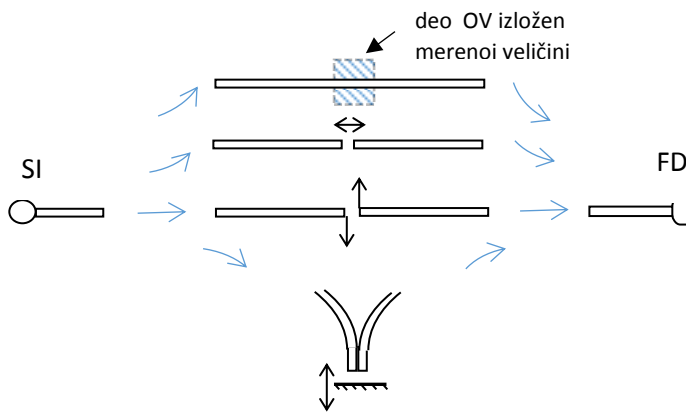
Kod FOS se neke osobine vođenih svetlosnih signala menjaju sa merenom veličinom i to su najčešće intenzitet, polarizacija, fazno kašnjenje između prostirućih talasa, talasna dužina i spektralna raspodela, pa se prema njima vrše podela na različite tipove.

### Intenzitetni FOS

Kod intenzitetnih FOS, se promenom merene veličine menja intenzitet svetlosnog signala koji se vodi kroz OV. Konfiguracija ovih senzora je jednostavna i prikazana na slici 5. Iz najčešće nekoherentnog

svetlosnog izvora (SI), kao što su emitterske diode (LED) ili halogene lampe, svetlost se uvodi u OV (uglavnom multimodno) i vodi se do mesta gde joj se menja intenzitet. Svetlost promenjenog intenziteta se vodi na fotodetektor (FD) koji je uglavnom fotodiode, fototranzistor, CCD senzor i sl. gde se dobija izlazni signal srazmeran intenzitetu primljene svetlosti [1].

Do promene intenziteta svetlosti može doći ili unutar OV ili van njega. Intenzitetni FOS sa promenom intenziteta van OV predstavljaju i najstarije FOS uopšte, pa i u građevinskim primenama. Ovi senzori su se koristili za detekciju nastanka pukotina na nekim kritičnim mestima na građevinskim objektima, tako što bi ugrađeno ili nalepljeno OV na strukturu puklo na mestu nastanka i širenja pukotine što bi dovodilo do naglog pada detektovanog optičkog signala. Umesto od jednog OV, intenzitetni senzori obično se sastoje od predajnog optičkog vlakna koje vodi svetlost do mernog mesta i prijemnog OV koje vodi svetlost izmenjenog intenziteta ka fotodetektoru. Slobodni krajevi OV su tako postavljeni i fiksirani na strukturu ili u njenu blizinu da istežanje strukture ili pojava pukotine i pomeranje osmatranog dela, dovode do longitudinalnog transverzalnog ili ugaonog pomeraja među njima ili njihovih krajeva u odnosu na neku



Slika 5. Princip rada intenzitetnih senzora otvorenog tipa

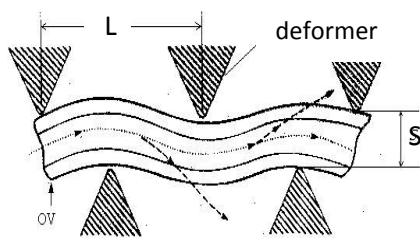
refleksionu ili refrakcionu optičku komponentu (slika 5) i na taj način dolazi do promene intenziteta. Ako se slabljenje optičkog signala vrši unutar OV, tada se senzori zasnivaju na savijanju i mikrosavijanju optičkog vlakna ili se na delu OV omotač zameni nekim materijalom čiji se indeks prelamanja menja sa merenom veličinom. Savijanje OV dovodi do promene uslova totalne refleksije na granici jezgro-omotač i to uzrokuje da se modovi višeg reda ne vode duž jezgra već prelaze u omotač i napuštaju OV. Samim tim dolazi i do pada intenziteta optičkog signala, ali da bi došlo do merljivih padova intenziteta potrebno je da prečnik savijenog dela bude reda nekoliko prečnika

optičkog vlakna. Mikrosavijanja optičkog vlakna su savijanja malog poluprečnika krivine, najčešće periodična i mogu dovesti do znatnog slabljenja optičkog signala, naročito ako se menjaju sa periodom

$$x = \frac{C \cdot \pi \cdot r_1 \cdot n_1}{NA}$$

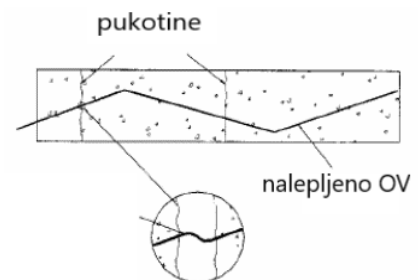
gde je  $C$  konstanta koja zavisi od profila indeksa prelamanja jezgra .

Mikrosavijanje na OV, u opštem slučaju, nastaje primenom neke vrste deformera kao što je prikazano na slici 6, pri čemu slabljenje optičkog signala zavisi od koraka  $L$  deformera i



Slika 6. Mikrosavijanje OV pomoću deformera

poprečnog rastojanja njegove donje i gornje stane,  $S$ . Ovaj princip rada se koristi za merenje pritiska, pomeraja, naprežanja i sl. Praćenje nastanka i širenja pukotina može se pratiti ovim tipom senzora kada se optičko vlakno zalepi po površini strukture u nekom obliku izlomljene linije ili sinusoide. [6]. Pri nastanku pukotine na delu vlakna koje je neposredno



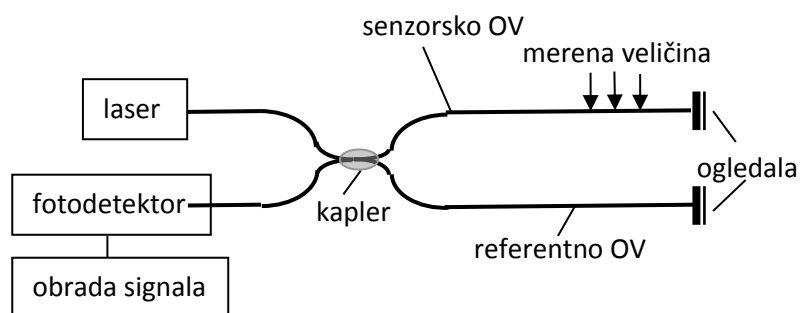
Slika 7. FOS pukotina na bazi mikrosavijanja [6]

obuhvata nastaju mikrosavijanja i dolazi do slabljenja signala (slika 7). Na svakoj nehomogenosti jezgra OV, pa i na onoj izazvanoj mikrosavijanjem ili modifikovanim omotačem dolazi do rasejanja svetlosnih signala unazad. Ovi senzori mogu da se povežu sa OTDR (Optical time domain reflectometry), instrumentima na bazi optičke reflektometrije u realnom vremenu koji mere i vreme povratka zračenja u realnom vremenu na osnovu čega se može odrediti mesto nastanka pukotine [1,4]. Mana intenzitetnih FOS je što je teško održavati konstantni intenzitet upadnog signala, zbog fluktuacija intenziteta svetlosnog izvora, mikrosavijanja na mestima koja nisu merna, kao i na konektorima koji povezuju OV na izvor ili detektor, pa promena intenziteta ne zavisi samo od merene veličine. Korišćenjem dodatnih tehnika, kao što je OTDR koje prate promene signala na susednim manjim deonicama OV se ova mana može popraviti.

### Interferometarski FOS

Kod interferometarskih FOS pod dejstvom merene veličine dolazi do promene faznog kašnjenja između talasa koji se vode optičkim vlaknima i/ili do promene polarizacije talasa. Ovi FOS imaju konfiguracije FO interferometara koje su slične kao kod klasičnih optičkih interferometara. Kako kod interferometara jasnost interferentnih pruga zavisi od koherentnosti svetlosti, to se za ove interferometre koriste uglavnom ili monomodna OV ili specijalna OV među kojima posebno ona sa održanjem polarizacije. Pored OV, važne komponente FO interferometara su kapleri, čija je uloga spajanje i deljenje svetlosnih signala između optičkih vlakana. FO interferometri mogu da se obrazuju na dva ili samo na jednom optičkom vlaknu.

FO interferometri obrazovani na dva optička vlakna rade na principu deljenja svetlosnog snopa iz izvora na dva dela i uvođena svakog snopa u po jedno OV. Tipični interferometarski FOS koji se obrazuje na dva vlakna su Mah-Zenderov (Mach-Zehnder) i Majkelsonov interferometar[1,4]. Konfiguracije senzora bazirane na Majkelsovom interferometru se češće koriste, jer se i izvor i detektor signala nalaze sa iste strane kako je prikazano na slici 8. Jedno od OV je senzorsko i na njega deluje merena veličina, a drugo OV je referentno i na njega ne deluje merena veličina. Po prolasku svetlosti kroz OV, svetlosni talasi se reflektuju od ogledala na kraju vlakna i vraćaju se ka kapleru gde se mešaju i dolazi do njihove interferencije. Intenzitet interferentnog signala zavisi od fazne razlike talasa koji su prešli različite optičke puteve u referentnom i



Slika 8. Majkelsonov FO interferometar

mernom OV, a ona zavisi od razlike dužina koje su prešli i razlike temperatura kojima su bili izloženi..

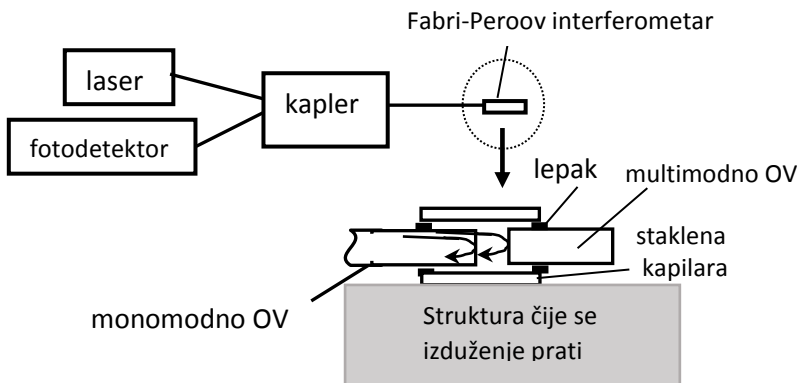
SOFO merni sistem predstavlja praktičnu realizaciju Majkelsonovog interferometra sa slabo koherentnim izvorima, gde se sistem za očitavanje sastoji od dodatnog Majkelsonovog interferometra sa pokretnim ogledalom pri čijem kretanju se na određenim rastojanjima jasno uočaju

osnovni i maksimumi prvog reda u interferentnom signalu. Pomeraj ogledala između nultog i prvog maksimuma predstavlja upravo istežanje senzorskog vlakna. I merno i senzorsko OV su postavljeni u cev koja ima specijalne konektore za vlakna koji imaju ankere da bi mogli da se lakše pričvršćuju ili ugrađuju. Senzorsko OV se postavlja tako da bude zategnuto unutar cevi, a referentno vlakno je opuštano tako da se ne izlaže istežanju. Ovaj sistem je jedan od prvih koji je praktično realizovan za potrebe praćenja istežanja

velikih građevinskih struktura sa sensorima koji su ili pričvršćeni na površinu strukture, ili ugrađeni u betonske strukture tokom njihove izgradnje kako bi se pratilo i proces očvršćavanja betona [4, 7].

Kod interferometara obrazovanih na jednom OV, talasi koji interferiraju se prostiru istim OV. Jedan tip takvog interferometra je i Fabri-Peroov (Fabry-Perot), FPI, prikazan na slici 9. Na umetku slike uvećano je prikazan i uzdužni presek senzorska glave koja se sastoji jednog monomodnog OV kojim se uvodi svetlost i jednog nepokretnog multimodnog, postavljenih u šuplje vlakno ili bor-silikatnu kapilaru. Krajevi ovih OV, koji delimično reflektuju svetlost i sam vazdušni prostor između njih formiraju takozvanu Fabri-Peroovu šupljinu. Kada se koherentni svetlosni signal uvodi u monomodno OV on se delom reflektuje od kraja monomodnog vlakna, a delom od multimodnog i ovi zraci potom interferiraju. Rastojanje vrhova OV u kapilari je reda  $\mu\text{m}$ . Kada se menja rastojanje između vrhova OV bilo istezanjem kapilare ili njenim izduženjem usled temperature izlazni signal ima sinusnu promenu intenziteta sa promenom rastojanja, što odgovara pojavi tamnih i svetlih pruga. Maksimumi u interferentnom signalu se javljaju ako je širina procepa jednaka neparnom broju polovina talasnih dužina primenjene svetlosti [2, 7, 8].

Osim klasične konfiguracije, FPI se realizuje i kao FLRD (fiber loop ringdown) senzor istezanja. FLRD



Slika.9 Fabri-Peroov interferometar (FPI) otvorenog tipa

senzor ima strukturu petlje od OV u čijem jednom delu je OV prekinuto i na tom mestu se formira mali procep koji se ponaša kao FPI ako je jako uzak. Ako je procep malo širi svetlosni signal prolazi petlju više puta i pri tome njegov intenzitet eksponencijalno opada. Vremenska konstanta opadanja signala zavisi od širine procepa i to predstavlja princip rada senzora istezanja. Za njegovu realizaciju se krajevi OV na procepu posle poliranja uvuku sa dve strane kroz plastičnu ili keramičku ferulu kako bi bili istog pravca [7, 9].

### FOS senzori na bazi upisanih Bragovih rešetki

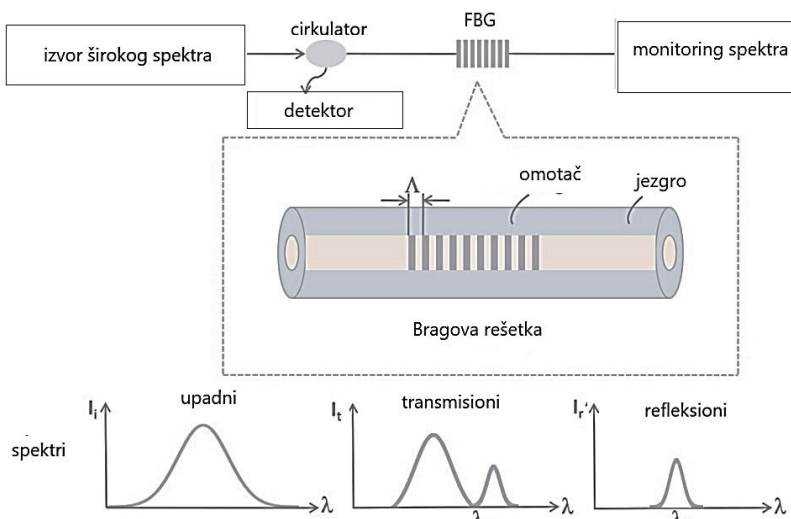
Upisana Bragova rešetka (FBG) se ponaša kao idealan reflektor ili nepropusni optički filter za svetlost talasne dužine  $\lambda_B$ . Princip rada senzora na bazi upisanih Bragovih rešetki je prikazan na slici 10. Na osnovu izraza (1)  $\lambda_B$  se može menjati ili ako se menja indeks prelamanja ili ako se menja korak rešetke, a kako se obe ove veličine menjaju i sa temperaturom i sa istezanjem FBG, to su i najčešće merene veličine ovim sensorima istezanje i temperatura, a ostale veličine kao što su pritisak, ubrzanje, pomeraj, ugao i sila se mere posredno. Promena Bragove talasne dužine pod dejstvom merene veličine naziva se Bragov pomeraj,  $\Delta\lambda_B$  i predstavlja merni signal kod ove vrste senzora i može se predstaviti kao [10, 11]

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot n \cdot \Lambda \cdot \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} \cdot [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})] \right\} \cdot \varepsilon + 2 \cdot n \cdot \Lambda \cdot \left[ \alpha + \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} \right] \cdot \Delta T = S_\varepsilon \cdot \varepsilon + S_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

U jednačini (2),  $\varepsilon$  je relativno istezanje,  $p_{ij}$  su elasto-optički koeficijenti,  $\nu$  je Puasonov koeficijent,  $\alpha$  je temperaturski koeficijent linearnog širenja OV i  $\Delta T$  je promena temperature. Prvi član jednačine predstavlja uticaj istezanja i on se može izraziti jednostavnije preko  $S_\varepsilon$  – osetljivosti senzora na istezanje, a drugi član

preko  $S_T$  - temperaturske osetljivosti. Tipične vrednosti ovih osetljivosti za standardno monomodno OV su  $1,2\text{pm}/\mu\text{s}$  i  $10\text{ pm}/^\circ\text{C}$  [12].

Pored ovog osnovnog tipa rešetki koriste se i CFBG (chirped FBG) kod kojih se period rešetke linearno menja na nekoj dužini i omogućavaju da se meri raspodela naprezanja duž rešetke, kao i Bragove rešetke velikog perioda LFBG (long period FBG) kod kojih dolazi do slaganja prostirućih modova jezgra i omotača i dolazi do njihove rezonance u transmissionom spektru. Talasna dužina i amplitude u transmissionom spektru su jako osetljive na temperaturu, istežanje, savijanje i torziju i zato se intenzivno proučava njihova primena u građevinarstvu [5, 12].



Slika 10. Princip FBG senzora (prema [10])

Jedna od glavnih prednosti FBG senzora je mogućnost upisivanja Bragovig rešetaka duž istog OV, tj. mogućnost kvazidistributivnog merenja. Na taj način se svetlost za veliki broj mernih mesta uvodi samo na jednom kraju OV, a i sistem za prijem i obradu signala sa ovih senzora (interogator) je jedinstven za sve senzore. Kako signali sa različitih rešetki moraju da se jasno razlikuju, upisani koraci Bragovih rešetki se razlikuje za svaku u nizu. Oni su tako odabrani da ne može doći do preklapanja refleksionih spektara upisanih FBG za ceo merni opseg i istežanja i temperatura. Interogatori su

uređaji koji se koriste za očitavanje Bragovog pomereaja sa jedne ili više rešetki. Oni kombinuju određeni tip svetlosnog izvora i detektora, kao i tehnike multipleksiranja signala, najčešće po talasnoj dužini (WDM) i po vremenu (TDM) ili njihovu kombinaciju. Svetlosni izvori su ili širokog spektra talasnih dužina ili laserski izvori koji menjaju postepeno talasnu dužinu u nekom opsegu. Detekcija odgovarajućeg signala može se vršiti spektralnim analizatorima i tada je najsporija, CCD spektrometrima ili primenom optičkih filtara osetljivih na talasnu dužinu i fotodiodama koje su sinhronizovane sa promenljivim laserskim izvorom [6].

### Performanse FBG senzora i interogatora

FBG senzori, kao pojedinačni ili višestruko ugradjeni na isto optičko vlakno, se uglavnom izrađuju kao senzori temperature, istežanja, pomeraja, ubrzanja, nagiba i pritiska.

Kao senzori temperature oni se koriste u opsegu temperatura  $-50^\circ$  do  $80^\circ$  i najčešće su dostupni unutar aluminijumskog ili kućišta od nerđajućeg čelika. Postoje i potpuno dielektrični tipovi sa polimernom i keramičkom zaštitom ili teflonskom za više temperature. Uglavnom im je rezolucija  $0,1^\circ\text{C}$  i tačnost oko 1%, mada postoje i neke specijalne vrste sa tačnošću od 0,1% u određenom temperaturnom opsegu i sa ponovljivošću  $0,5^\circ$  ili  $1^\circ$  pri kratkotrajnim i dugotrajnim merenjima respektivno. Vreme odziva zavisi od tipa i kućišta i može biti od 0,3s do 8,5s.



FBG akcelometri su posebno značajni u primenama kontinualnog praćenja stanja konstrukcija. U osnovnoj strukturi oni se sastoje od male konzole na koju je nalepljen FBG, a koja na jednom kraju ima inercionu masu. Kada se ovaj senzor izloži nekom ubrzanju, kretanje inercione mase savija konzolu i time isteže FBG i dovodi do oscilatornog Bragovog pomeraja [13, 14]. Dimenzije FBG akcelometara su nešto veće od klasičnih električnih. Rezonantna frekvencija i merni opseg zavise sa jedne strane od dužine rešetke, ali i od dimenzija i materijala konzole i inercione mase. Tipični senzori koji se koriste u praćenju stanja konstrukcija rade u frekventnom opsegu do 50 Hz i merni opseg im je  $\pm 10g$ .

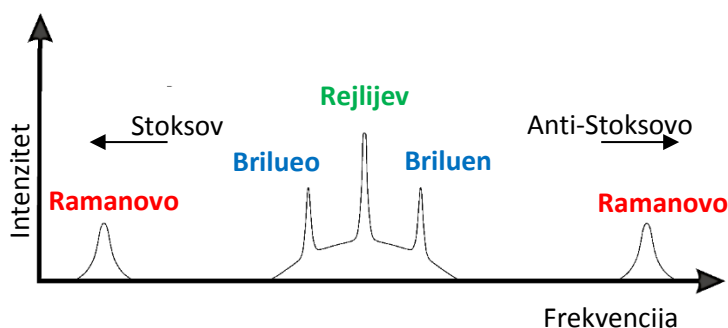
FBG senzori istezanja, tj. optičke merne trake, uglavnom mere relativno istezanje od -3000 do +3000  $\mu\epsilon$  sa tačnošću od 1-2  $\mu\epsilon$ , mada postoje i jedan red tačnije ali u manjem mernom opsegu od -1000 do +1000  $\mu\epsilon$ . Od značaja za građevinske primene su i komercijalno dostupni FBG senzori zaštićeni slojem silikona i ubačeni u neku vrstu nosača ili kućišta unutar koga je FBG već malo zategnut, a kućište prenosi istezanje strukture na mernom mestu. Postoje i FBG senzori najčešće istezanja ili temperature koji su pogodni za ugrađivanje u građevinske materijale, a koji imaju zaštitna kućišta sa nekom vrstom ankera kako bi se sprečilo njihovo pomeranje tokom očvršćavanja materijala i ostvario što bolji prenos naprezanja sa strukture [15, 16].

FBG senzori pomeraja se sastoje od jednog ili više FBG senzora nalepljenih na lak i elastičan nosač koji omogućava prevođenje pomeraja u istezanje FBG-a. Ovi senzori mogu da imaju merni opseg reda desetak mm, najčešće do 12 mm ili do 40 mm, a tačnost im može biti od 0,02% do 0,8% punog opsega merenja i mogu pratiti dinamičke promene rastojanja do 1050mm/s. Imaju primenu kod praćenja širenja pukotina ili merenja relativnog položaja određenih delova konstrukcije. Sličan princip imaju i FBG senzori pritiska kod kojih se najčešće prati pomeraj neke membrane usled promene pritiska i prevodi u istezanje FBG senzora. U okviru istog kućišta se nalazi i kompenzaciona FBG koja se ne isteže već je fiksirana između tačaka koje se ne pomeraju, a doprinosi temperaturskoj kompenzaciji. FBG senzori ugaonog pomeraja ili promene nagiba (inklinometri i tiltmetri) takođe imaju mehaničke komponente kod kojih se promena ugla pretvara u relativno istezanje dva FBG-a koji su postavljeni međusobno pod nekim uglom, tako da se različito istežu ili se jedan isteže a drugi sabija. Ovim sensorima se mere uglovi do  $10^\circ$  [17].

Komercijalni integratori zasnovani na WDM obično imaju 1, 4 ili 16 kanala koji imaju ukupnu širinu spektralnog opsega od 160 nm u ukupnom opsegu talasnih dužina i svaki može da očita 2 do 30 FBG senzora na jednom vlaknu. Frekvencija skeniranja vlakana je od 100 pa do veoma brzih 5000Hz, a merne dužine su do 10km, sa rezolucijom očitavanja promene Bragovog pomeraja od 1 pm. Razlike Bragovih talasnih dužina za susedne FBG senzore su minimalno oko 0,1 nm [18, 19, 20].

### Distributivni fiberoptički senzori (DFOS)

Distributivni FOS se baziraju na Rejljevom, Brilluonovom ili Ramanovom rasejanja svetlosti u OV. Rasejanje svetlosti je slučajan statistički proces i dešava se u svim pravcima međutim zbog strukture OV



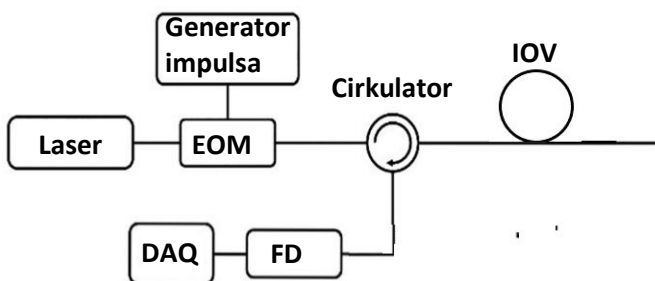
Slika 11. Spektri Rejljevog, Brilluonovog i Ramanovog rasejanog zračenja

rasejana svetlost se prostire u pravcu ose OV i to i u smeru prostiranja upadne svetlosti i u suprotnom. Frekventni spektar rasejane svetlosti je prikazan na slici 11. Centralni maksimum koji odgovara frekvenciji upadnog zračenja, predstavlja Rejljevo rasejanje koje se javlja usled nehomogenosti materijala OV, tj.

slučajnih fluktuacija njegove gustine i indeksa prelamanja i spada u elastičan tip rasejanja. Kada bi materijal OV bio idealno homogen, rasejani talasi bi se javljali samo u pravcu prostiranja, ali pošto to nije slučaj duž OV se javlja i rasejano zračenje unazad. Bliži maksimumi sa leve i desne strane u spektru predstavljaju Brilluonovo zračenje i nastaju usled interakcije upadne svetlosti i akustičkih fonona. Dva udaljenija maksimuma u spektru pripadaju Ramanovom zračenju koje odgovara interakciji upadnog svetlosnog zračenja i vibracija atoma unutar molekula materijala. Brilluonovo i Ramanovo spadaju u neelastična rasejanja, jer dolazi do promene frekvencije rasejanog zračenja u odnosu na upadno. U njihovim spektrima postoje simetrični maksimumi niže (Stoksove komponente) i više frekvencije (anti-Stoksove komponente) [21].

### Distributivni fiberoptički senzori bazirani na Rejljevom rasejanju

Rejljevo rasejanje se javlja na česticama ili drugim uzrocima fluktuacija indeksa prelamanja jezgra, mnogo



Slika 12. Osnovna konfiguracija OTDR-a (prema [21])

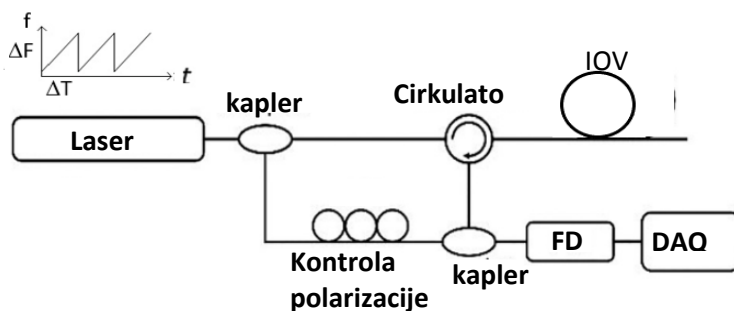
manjih od talasne dužine upadne svetlosti i intenzitet rasejane svetlosti zavisi od talasne dužine  $\lambda$  upadne svetlosti srazmerno  $1/\lambda^4$ . Rejljevo rasejanje unazad predstavlja osnovni proces koji se koristi kod metoda optičke reflektometrije u vremenskom domenu, (OTDR- optical time domain reflectometry) i optičke reflektometrije u frekventnom domenu, OFDR (optical frequency domain reflectometry). Princip rada OTDR-a prikazan je na slici 12. Kratak svetlosni impuls trajanja  $\tau$ , jakog intenziteta koji potiče od visoko koherentnog

laserskog izvora se uvodi preko kaplera (cirkulatora) u ispitivano optičko vlakno (IOV) i detektuje se povratno Rejljevo zračenje kao funkcija vremena povratka signala  $t$  na istom kraju OV. Rastojanje duž vlakna  $x$  odakle dolazi rasejano zračenje je povezano sa vremenom  $t$  preko izraza  $x = \frac{v_g}{2} \cdot t$  gde je  $v_g$  grupna brzina svetlosnih talasa. Razlikovanje događaja u vlaknu koji se dešavaju za vreme trajanja jednog impulsa  $\tau$  nije moguće, tako da se prostorna rezolucija merenja određuje kao pređeni put svetlosnog talasa koji odgovara trajanju jednog impulsa, tj.  $\Delta x = \frac{v_g}{2} \cdot \tau$  i reda je 1m, jer je  $\tau$  najčešće 10 ns. Dinamički raspon izlaznog signala zavisi od trajanja i optičke snage impulsa i osetljivosti fotodetektora (FD). Duže trajanje impulsa smanjuje odnos signal/šum, ali i pogoršava prostornu rezoluciju. Akvizicija signala (DAQ) sa fotodetektora je sinhronizovana sa izvorom upadnih svetlosnih impulsa da bi se precizno odredilo vreme povratka signala i locirao položaj tačke u kojoj se desilo rasejanje.

Ova osnovna konfiguracija OTDR se modifikuje na razne načine kako bi se poboljšala prostorna rezolucija ili brzina očitavanja signala i omogućilo praćenje brzih vremenskih događaja na vlaknu tj. vibracija ili nagle promene temperature. Jednu modifikaciju predstavlja fazno osetljivi,  $\Phi$ -OTDR koji ima sličnu konfiguraciju, ali izvor mora da ima uski linijski spektar i koherentnu dužinu veću od dužine IOV. Jačina detektovanog signala zavisi od međusobne razlike faza svetlosti iz raznih tačaka rasejanja duž OV i kako su centri rasejanja slučajno raspoređeni duž vlakna, izlazni signal  $\Phi$ -OTDR-a ima oblik slučajne oscilacije. Ona ostaje ista tokom vremena u slučaju da ništa ne dovodi do promena u procesu rasejanja svetlosti i služi kao referentni signal, Ako na nekom mestu na IOV dođe do promena usled istezanja ili temperature, relativne faze rasejanih svetlosnih signala se menjaju. Dobijeni signal se upoređuje sa referentnim i određuje se mesto koje odgovara promeni. U zavisnosti od metode uporedjenja signala zavisi i

opseg frekvencija pri vibracijama koje mogu biti detektovane, a što može biti i do 20kHz [21]. Zbog primene na detekciju akustičkih pojava ova vrsta distributivnih senzora spada u distributivne akustičke senzore (DAS). Koherentni OTDR (C-OTDR) se takođe koristi za detekciju akustičkih pojava. Kod njega se svetlost laserskog izvora sa linijskim spektrom preko kaplera uvodi u dva OV. Svetlosni signal iz prvog OV se impulsno moduliše i vodi u IOV, a svetlost koja se uvodi u drugo OV služi kao lokalni oscilator. Interferencijom rasejanog zračenja i referentnog dobija se karakteristična interferenciona slika sa slučajnim rasporedom svetlih i tamnih mesta (spekle) koja se menja ako je IOV izloženoj nekom akustičkom talasu [22].

Za razliku od OTDR, merenja čija je prostorna rezolucija reda 1m, optička reflektometrija u frekventnom domenu (OFDR) omogućava relativno visoku prostornu rezoluciju i dobar dinamički opseg. Konfiguracija



Slika 13. Osnovna konfiguracija OFDR, prema [21]

ovakvog distributivnog senzora je predstavljena na slici 13. Svetlost iz kontinualnog laserskog izvora, se frekventno moduliše tako da se frekvencija linearno menja kao  $f = f_0(1 + \beta t) = f_0 \left(1 + \frac{\Delta F}{\Delta T} t\right)$ , u toku intervalu  $\Delta T$ , i u opsegu frekvencija  $\Delta F$ . Ona se uvodi u OV i preko kaplera deli na dva signala, merni i referentni. Merni signal se uvodi u IOV i povratna rasejana svetlost se kombinuje sa referentnim signalom i oni se koherentno detektuju. Pošto su merni i referentni signal

potiču od istog izvora merni signal predstavlja verziju referentnog signala, ali koja vremenski kasni. Kada se ovi signali dovedu na fotodetektor usled ovog kašnjenja i promene frekvencije tokom vremena javlja se rezultujući signal koji ima frekvenciju izbijanja  $f_i$  i ona se može odrediti preko Furijeove transformacije detektovanog signala. Uzimajući u obzir da vreme kašnjenja između signala,  $\Delta t_{IOV}$  odgovara dvostrukoj udaljenosti  $2 \cdot x$  tačke rasejanja od upadnog kraja OV i ova udaljenost se može odrediti preko frekvencije izbijanja  $f_i$  na osnovu  $f_i = 2\beta \Delta_{IOV} = 2\beta x \frac{n}{c}$  [21]. Prostorna rezolucija ovog sistema zavisi od promene  $\Delta F$  kao  $\Delta x = c/2n\Delta F$ . Kod ovog sistema najbolje bi bilo da se koriste laserske diode sa podesivom frekvencijom, koje menjaju talasnu dužinu u opsegu od nekoliko desetina nm za postizanje mikrometerske prostorne rezolucije. Međutim, zbog velike cene ovakvih izvora, češće se primenjuju različite varijante moduliranih laserskih izvora gde se dobijaju manje, za praktične primene odgovarajuće rezolucije reda cm.

Posebno unapredjenje OFDRa predstavlja OBR (Optical backscatter reflectometry) senzor kod koga se povratni rasejani talas po interferenciji sa referentnim talasom razlaže na dva ortogonalno polarizovana talasa i vrši se detekcija oba posebnim fotodetektorima. Dodatnom obradom signala postiže se bolja prostorna rezolucija reda manjeg od mm, a očuvana je merna senzorska dužina [23].

### Distributivni FOS bazirani na Brillouinovom rasejanju

Kada se svetlosni talas uvede u OV svetlost rasejana unazad se generiše usled interakcije upadnog svetlosnog signala i akustičkih fonona u OV. Ovaj tip rasejanja se naziva spontano Brillouinovo rasejanje SBS (spontaneous Brillouin scattering). Spektar Brillouinovog rasejanja ima oblik Lorencove funkcije i frekvencija na kojoj ima maksimum se razlikuje za oko 11 GHz u odnosu na frekvenciju upadne svetlosti (za talasnu

dužinu od  $1,55\mu\text{m}$  i standardno telekomunikaciono OV). Ova razlika frekvencija se naziva Brilluonov frekventni pomeraj (BFS - Brillouin frequency shift) i obeležava se sa  $f_B$  i odgovara frekvenciji termički indukovanih akustičkih fonona u materijalu jezgra. Može se odrediti preko izraza

$$f_B = \frac{2 n v_a}{\lambda_p} \quad (3)$$

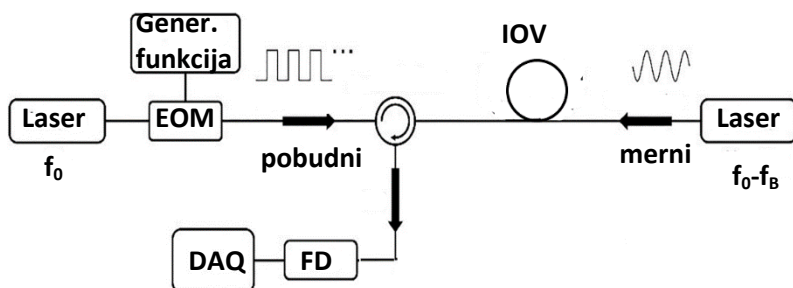
gde su:  $n$ - indeks prelamanja jezgra,  $v_a$  – brzina akustičkih fonona i  $\lambda_p$  - talasna dužina pobudnog talasa. Kako i  $n$  i  $v_a$  zavise od temperature i relativnog istežanja OV vlakna i BFS se menja sa relativnim istežanjem oko  $1\text{MHz}/0.002\%$  i sa promenom temperature oko  $1\text{MHz}/\text{K}$ .

Kod spontanog Brilluonovog rasejanja uglavnom se detektuje Stoksovo rasejanje koje nije velikog intenziteta. Da bi se ostvarilo stimulirano Brilluonovo rasejanje akustički talasi na kojima dolazi do rasejanja se generišu na bazi elektro-strikcionog efekta, tj. sabijanja materijala pod dejstvom električnog polja. Ovo se ostvaruje uvođenjem dva svetlosna talasa, jednog pobudnog frekvencije  $f_0$  i drugog mernog, frekvencije  $f_0-f_B$  sa različitim krajevima IOV koji interferiraju. Varijacije intenziteta rezultujućeg talasa na frekvenciji izbivanja, u ovom slučaju  $f_B$ , dovode do periodičnih varijacija gustine materijala i promena indeksa prelamanja jezgra i stvara se indukovani akustički talas koji pojačava termalno indukovane akustičke talase. Na taj način dolazi do pojačanog rasejanog zračenja, stimulisanog Brilluonovog zračenja na ovako indukovani talasima. U zavisnosti od smera kretanja indukovanog akustičkog talasa frekvencija rasejanog zračenja može biti za  $f_B$  i veća i manja od frekvencije pobudnog talasa.

Distributivni FOS ovog tipa se mogu podeliti u dve veće grupe, na FOS kod kojih se svetlost uvodi samo na jednom kraju mernog optičkog vlakana, tj. reflektometrijske senzore (BOTDR), i na FOS kod kojih se svetlosni talasi uvode na oba kraja mernog optičkog vlakna, i u njih spadaju sistemi sa analizom signala (BODTA) i sistemi sa korelacijom signala (BOCDA) [21, 24].

Osnovni princip na kome se bazira konfiguracija reflektometrijskih senzora je Brilluonova reflektometrija u vremenskom domenu (BOTDR - Brillouin optical time reflectometry) koja je po svojoj osnovnoj strukturi slična OTDR-u. Detekcija rasejanog signala se vrši pomoću dve osnovne tehnike, direktne i heterodinske. Direktna je jednostavnija, ali zahteva da se Brilluonovo rasejanje prvo optički razdvoji od Rejljevog. Kod heterodinske detekcije jedan deo upadnog pobudnog signala sa uskim spektrom se koristi kao referentni signal i ima ulogu lokalnog oscilatora. Dolazi do mešanja rasejanog signala i referentnog, pri čemu se dobija rezultujući signal sa koga se elektronski očitava signal izbivanja, a preko njega i BFS. Heterodinska detekcija kod BOTDR doprinosi boljoj osetljivosti merenja i omogućava distributivno merenje istežanja na velikim rastojanjima reda desetina km sa tačnošću od  $5\mu\epsilon$ . Zbog impulsnog pobudnog signala BOTDR ima rezoluciju oko 1m.

BODTA (Brillouin optical time domain Analysis) i BOCDA (Brillouin optical correlation-domain analysis) se baziraju na stimulisanom Brilluonovom rasejanju i dobijeni signal je velikog intenziteta. Njihova mana je što svetlost mora da se uvodi na dva kraja IOV, što je nekad teško praktično izvesti na velikim mernim dužinama, a pogotovu što system ne može da radi ako dođe do prekida OV [25]. BODTA je tehnika koja se najviše koristi kod komercijalnih distributivnih merenja i njena osnovna konfiguracija je predstavljena na slici 14.



Pobudni laserski signal frekvencije  $f_0$  se impulsno moduliše pomoću elektro-optičkog modulatora (EOM) i uvodi u IOV pomoću cirkulatora. Simultano se na suprotnom kraju uvodi merni talas sa kontinualnog lasera na frekvenciji  $f_0-f_B$ . Kada je razlika optičkih frekvencija

Slika 14. Osnovna konfiguracija BODTA (prema [21])

pobudnog impulsnog i kontinualnog mernog signala jednaka lokalnom Brilluenuovom pomeraju na nekom mestu, merni signal je pojačan i na tom mestu se javlja stimulirano Brilluenuovo zračenje. Menjanjem frekvencije mernog signala u nekom opsegu mogu se odrediti Brilluenuovi pomeraji u različitim tačkama duž vlakna. Ako je merno optičko vlakno izloženo u okolini neke tačke promeni temperature  $\Delta T$  i promeni u relativnom izduženju  $\Delta \epsilon$  doći će do promene Brilluenuovog pomeraja za

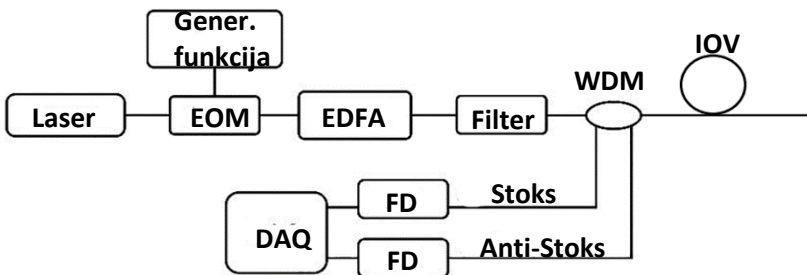
$$\Delta f_B = C_{BT} \cdot \Delta T + C_{B\epsilon} \cdot \Delta \epsilon \quad (4)$$

gde je  $C_{BT}$  temperaturski koeficijent, a  $C_{B\epsilon}$  koeficijent na istežanje mernog OV za Brilluenuovo rasejanje. Ovi koeficijenti za standardno telekomunikaciono vlakno SMF-28 iznose 1,26MHz/K i 0,056/ $\mu\epsilon$ . Postoji mnogo varijanti konfiguracije BODTA kod kojih se umesto dva koristi jedan laserski izvor i za pobudni i merni signal, kao i onih gde se umesto jednog pobudnog impulsa koristi kodovana povorka impulsa i kontrola polarizacije da bi se poboljšao odnos signal/šum i prostorna rezolucija merenja.

Kod konvencionalnih BOTDR i BOTDA sistema, tačnost merenja BFS opada ako je širina pobudnih impulsa manja od vremena života fonona, što je oko 10 ns i odgovara prostornoj rezoluciji od oko 1m. Zato je predložena konfiguracija BOCDA (Brillouin optical correlation-domain analysis) tj. analiza Brilluenuovog zračenja na bazi korelacije, kod koje su i pobudni i merni laserski talas kontinualni i kontrolom razlike njihovih frekvencija, stimulirano Brilluenuovo rasejanje može se indukovati u bilo kom delu IOV. Kada je na nekom mestu duž IOV ostvareno da je razlika frekvencija ova dva talasa jednaka BFS izlazni signal koji odgovara rasejanom zračenju se značajno povećava i dobija se korelacioni maksimum u izlaznom signalu. Prostorno distributivno merenje se ostvaruje linearnim povećavanjem frekvencije mernog laserskog izvora. Ovom tehnikom se postiže prostorna rezolucija od 5 cm na mernim dužinama od 10 do 15km [25].

#### Distributivni FOS bazirani na Ramanovom rasejanju

Ramanovo rasejanje je neelastično rasejanje kod koga upadna svetlost pobuđuje vibraciona stanja molekula i rasejani fotoni se emituju na izmenjenoj frekvenciji. Ramanov frekventni pomeraj (RFS) je razlika frekvencija pobudnog i rasejanog signala i u spektru rasejanog zračenja se javljaju i Stoksova i Anti-Stoksova komponenta. Promena temperature utiče na tri načina na karakteristike rasejanog signala, i to i na veličinu RFS i na intenzitet i na širinu spektralnog maksimuma zračenja. Distributivni senzori temperature (DTS) bazirani na ovom rasejanju koriste varijacije u intenzitetu rasejanog signala sa temperaturom. Kod ovog DFOS osetljivost na istežanje ili pritisak je praktično zanemarljiva, a značajno su osetljiviji na promene temperature. Kao mehanizam merenja koristi se pojava da odnos intenziteta Anti - Stoksovog i Stoksovog povratnog zračenja ima zavisnost od temperature na koju ne utiču ni snaga upadnog zračenja, a ni efikasnost uvođenja svetlosnog signala. Intenzitet Anti - Stoksovog maksimuma  $I_{AS}$  je mnogo osetljiviji na promene temperature nego intenzitet Stoksovog  $I_S$  i njihov odnos u zavisnosti od temperature može se predstaviti



Slici.15 Osnovna konfiguracija ROTDR (DTS),(prema [21])

izrazom (4) [26].

$$R(z) = \frac{I_{AS}}{I_S} = \left( \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 e^{\frac{hf_R}{k_B T}} \quad (4)$$

U izrazu (4),  $\lambda_S$  i  $\lambda_{AS}$  predstavljaju talasne dužine Anti - Stoksovog i Stoksovog rasejanog zračenja,  $h$  je Plankova konstanta,  $f_R$  je Ramanov frekventni pomeraj,  $k_B$  je Bolcmanova konstanta i  $T$  apsolutna temperatura na rastojanju  $z$  duž OV.

Ramanovi OTDR (ROTDR) senzori su najviše ispitani i korišćeni DTS senzori i njihova konfiguracija je prikazana na slici 15. Izvor pobudnih talasa je laser velike snage čija se frekvencija kontroliše signal generatorom i zatim se moduliše u povorku impulse. Snaga optičkih impulse se pojačava pomoću pojačavača na bazi Er dopiranih OV, a neželjene frekvencije u spektru se filtriraju. Za izdvajanje Rejljevog od Ramanovog povratnog zračenja kao i razdvajanje Stoksovog i AntiStoksovog povratnog zračenja koristi se WDM tehnika multipleksiranja. Svaka komponenta zračenja se zatim detektuje pomoću avalanskih fotodiode.

## PRIMENE FOS U RAZLIČITIM OBLASTIMA GRAĐEVINARSTVA

Najčešća primena FOS u građevinarstvu je za nadzor stanja objekata ili *structural health monitoring* (SHM). Ona obuhvata merne tehnike kojima se vrši akvizicija podataka relevantnih za otkrivanje oštećenja i procenu upotrebljivosti raznih vrsta struktura i najčešće se primenjuje, za određivanje stanja zgrada i kapitalnih infrastrukturnih objekata, kao što su mostovi, tornjevi, brane, tuneli i sl. Veličine koje se prate su vibracije, relativna deformacija, mesto nastanka i širenje pukotina, pojava korozije, promena nagiba, pomeraj delova konstrukcije, ali i temperatura, vlažnost, brzina vetra i ostali uticaji spoljašne sredine koji dugoročno utiču na stanje objekta. Primeri nekih primena FOS su prikazani u nastavku ovog poglavlja.

### Merenje temperature

Merenje raspodele temperature na građevinskim objektima je od velikog značaja, jer su mnoge osobine građevinskih materijala temperaturno zavisne, a promena temperature može da se koristi i za indirektno merenje nekih veličina. Zbog postojanja potrebe za velikim brojem mernih tačaka na strukturnim objektima najviše se ispituje primena DTS baziranih na Ramanovom rasejanju, ali se koriste i druge vrste FOS. U radu [27] je predstavljen ugrađeni Fabri-Peroov senzor za merenje temperature u hidratacionim procesima pri očvršćavanju betona tokom vremena. Rađena su ispitivanja za betone sa različitim odnosom vode i cementa od 0,4 do 0,6 i dobijeno je da su maksimalne temperature od 51,41 do 55,08°C, sa tačnošću od 0,2°C. Isti senzori su po prestanku procesa očvršćavanja korišćeni za merenje temperaturnih razlika na površini i unutar betona radi predviđanja pojave pukotina usled temperaturskih naprežanja [10, 27].

U hidrologiji se kvazidistributivni i distributivni senzori temperature koriste za praćenje pojave podzemnih voda, kao i njihovog mešanja sa drugim vodotokovima ili sa zemljištem,. U radu [28] su upoređene tri vrste FOS senzora za ovu primenu: FBG senzori temperature, DFOS temperature koji se bazira na C-OTDR metodi i DTS bazirani na Ramanovom rasejanju. Pokazano je da DTS imaju nedovoljnu prostornu rezoluciju za merenje na kraćim deonicama, ali da sve tri vrste senzora imaju tačnost od 0,2°C što je veoma dobro za ovu primenu.

Kod merenja vlažnosti tla metodama koje se zasnivaju na povezanosti vlažnosti sa toplotnom provodnošću vlažnog tla, često se koriste DTS. Postoje dve kategorije ovakvih senzora, jedni koji se baziraju na aktivno zagrevanim optičkim kablovima (Actively Heated Fiber Optics - AHFO) i pasivni DTS sistemi. Za AHFO metod se koristi optički kabl koji ima u svom sastavu metalnu žicu koja se priključuje na električni izvor i ima ulogu grejača i paralelno postavljeno OV. Oni se nalaze unutar zajedničke plastične cevi u kojoj mogu slobodno da klize čime se sprečava naprežanje OV. Optičko vlakno postavljeno u ispitivano tlo se na taj način impulsno zagreva i meri se promena temperature  $\Delta T$  duž vlakna za vreme ili po

prestanku zagrevanja. Kako vlažno zemljište bolje odvodi toplotu od isušenog,  $\Delta T$  je povezana sa sadržajem vode i može se povezati sa nekim od parametara koji govore o masenom ili zapreminskom udelu vode u zemljištu. Metode merenja i modelovanje se baziraju na merenju maksimalne promene temperature  $\Delta T_{\max}$  ili kumulativne temperature koja se dobija integraljenjem zavisnosti promene izmerene temperature od vremena  $\Delta T(t)$  po vremenu i to u intervalu od početka do kraja trajanja jednog ciklusa u impulsnom zagrevanju.

U cilju optimizovanja vremenske dužine trajanja zagrevanja, kao i snage korišćenih grejača, u [29] je opisano ispitivanje tri kombinacije ovih veličina pri čemu je praćena maksimalna promena temperature preko DTS. Kao kontrolni senzori korišćeni su kapacitivni senzori vlažnosti tla. Pokazano je da se da veća snaga grejača daje bolju tačnost merenja masenog udela vode i da je za istu snagu grejača bolja tačnost dobijena pri dužem trajanju zagrevanja. U istraživanjima opisanim u [29, 30]. ista metoda je primenjena sa OV postavljenim na tri različite dubine unutar zemljišta. Posle kalibracije ovih FOS postavljanjem dielektričnih senzora vlažnosti određena je specifična zavisnost promene temperature od dubine postavljanja senzora. Pokazalo se da srednja kvadratna greška merenja zapreminskog udela vode varira u zavisnosti od dubine između 0,028 i 0,037  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , a najveće slaganje rezultata sa električnim sensorima je dobijeno za dubine od 5 cm i od 20 cm.

Pasivni DTS za ove primene samo prate promene temperature tla u zavisnosti od jaćine sunćevog zraćenja kojem je deo tla na mestu merenja vlažnosti izložen. Oni ne zahtevaju dodatne elektrićne izvore za zagrevanje, međutim u slučajevima kada su dnevne promene temperature tla male tokom dana, ne može se dobiti dovoljna tačnost.

### *Merenje vlažnosti tla*

Merenje vlažnosti tla taćkasto ili kvazidistributivno se određuje i korišćenjem FBG senzora temperature i vlažnosti koji su kao parovi smešteni u zajednićko kućište sa poroznom membranom koja omogućava da vodena para iz zemljišta prođe do senzora, a sa druge strane štiti senzor od oštećenja. Senzor vlažnost predstavlja FBG senzor koji kao omotać ima specijalni poliimidni sloj koji menja svoj indeks prelamanja sa vlažnošću. Ovaj tip senzora može meriti relativnu vlažnost tla do 37% [29].

Drugi tip FOS senzora vlažnosti opisan u radu [31], ima sonde koje mogu da se ubodu u tlo a sastoje se od aluminijumskog cilindrićnog kućišta sa zašiljenim vrhom od tvrde plastike. U njemu su postavljeni podužno po sredini FBG senzori temperature upisani duž jednog OV i presavijeni žićani provodnik koji se koriste za kontrolisano grejanje sonde u trajanju od 5 min snagom od oko 2,2 W/m. Senzori imaju tačnost merenja zapreminskog udela vode od 0.018  $\text{m}^3/\text{m}^3$  što je bolje nego kod odgovarajućih elektrićnih senzora, ali za dugotrajna merenja na terenu kućište ovog FOS bi moralo biti ojaćano.

### *Merenja na branama*

Pojava propuštanja (curenja) vode kroz branu je jedan od važnih uzroka njenog oštećenja pa i pucanja, pa se intenzivno istraćuje i primena kvazidistributivnih i distributivnih FOS za njeno otkrivanje i praćenje. Kada voda teće kroz poroznu strukturu brane zbor razlike u toplotnoj provodnosti i specifićnoj toploti vode i poroznog materijala raspodela temperaturskog polja unutar i po površini brane se menja u okolini mesta curenja. U [32] je opisano korišćenje distributivnih senzora temperature za indirektno praćenje ovog curenja. Postoje dve metode na kojima se ovo merenje zasniva. Prva je gradijentna metoda i bazira se na detektovanju razlika u temperaturama na površini brane, koja je više izraćena ako je putanja tog poroznog kanala blića.

Ovaj metod zavisi od spoljašnjih uslova, doba godine i klime i ponekad su temperaturske razlike male što smanjuje osetljivost i tačnost *merenja*. Drugi metod se zasniva na zagrevanju okoline senzora stabilnim izvorom toplote da bi se povećala temperaturske razlika oko mesta gde postoji curenje. Najčešće je zagrevanje električnim putem, preko proticanja struje kroz žicu koja se nalazi u okviru optičkog kabla ili pored njega i ona predstavlja linijski izvor toplote. Pored njega može se koristiti i tačkasti izvor toplote, tj. grejač malih dimenzija koji greje samo mali deo vlakna ili FBG senzora. Ova metoda se zasniva na tome da se tokom grejanja prati porast temperature ili po isključivanju da se prati pad temperature i na osnovu toga se određuje područje na kome je ta promena drugačija.

Detektovanje linije zasićenja vodom kod kosina opisano je u radu [33]. Korišćen je DTS sistem koji ima maksimalnu mernu dužinu 2 km, prostornu rezoluciju 1m, tačnost merenja temperature  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  i rezoluciju  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Korišćen je optički kabl sa linijskim zagrevanjem i praćena je promena temperature duž kabla tokom vremena. Kada se zagreva kabl pri stabilnom nivou vode u zemljištu javlja se kriva promena temperature od vremenom koja ima tri karakteristična dela, prvi je nagli porast, zatim brža rastuća vremenska promena i treći deo je manje rastuća promena koja teži nekoj asimotskoj vrednosti. Na mestima koji su u zoni zasićenja tla vodom ovaj porast je manji nego kod zemljišta koje je suvo ili nezasićeno vodom. Ako se koristi merno OV koje prelazi iz zone zasićenja u nezasićenu zonu prema dobijenoj razlici temperatura duž njega jasno može da se uoči granica između ova dva sloja.

### *Merenje sila u zategnutim užadima i kablovima*

Užad izrađena od čelika ili ojačanih kompozitnih polimernih materijala se koriste u različitim građevinskim strukturama. U svim primenama oni se izlažu velikim silama zatezanja i njihovo oštećenje ili pucanje može dovesti do urušavanja konstrukcije.

Za merenje istezanja u kablovima uglavnom se koriste FBG, interferometarski FP otvorenog tipa i distributivni senzori.

Pri upisivanju FBG u standarsno monomodno telekomunikaciono OV potrebno je ukloniti zaštitu, a zatim je ponovo vratiti na jedan od tri načina: a) tj. nanošenjem istog zaštitnog sloja tako da se prvobitni prečnik OV ne menja, b) da se na vraćenu prvobitnu zaštitu doda i sloj od ojačanog polimernog kompozita radi zaštite od oštećenja i c) da se dodatna zaštita vrši metalnim cevima koje mogu na površini imati i neke vrste ankera. Prvi tip senzora se za potrebe merenja pomoću lepka pričvršćuje na uže prateći žlebove. Drugi tip je dovoljno ojačan da se postavi u središnji deo užeta u toku njegove izrade i bude deo takozvanog senzorskog kabla, dok se treći tip pomoću posebne spone ili stezača pričvršćuje na površinu užeta. U slučaju užadi koja se koriste za prednaprezanje betonskih elemenata prva dva načina su sigurnija, jer ne može doći do odvajanja FBG senzora od kabla, a kod slobodnih zategnutih užadi kod mostova primenjuju se sva tri metoda.

Način prenosa stvarnog istezanja užeta na FBG senzor je prvi problem koji se javlja, jer je zbog postojanja zaštitnih slojeva ili stezača, istezanje FBG senzora manje od istezanja užeta. Maksimalno relativno istezanje OV bez zaštitnog sloja je 1,5 puta manje nego kod čeličnog užeta, ali i 1,7 puta manje od OV sa polimernom zaštitom, tako da praktično FBG senzori pokrivaju potpuni opseg relativnog istezanja užeta. Veza između stvarnog i izmerenog istezanja se u literature razmatra eksperimentalno i kroz mehanička modelovanja svih ovih slučajeva [7, 34].

Drugi važan aspekt je da se ugradnjom ili pričvršćenjem FBG senzora na uže osigura da ne dodje do remećenja mehaničke čvrstoće užadi. Kod prvog metoda zbog malog prečnika senzorskog OV (od 2 do 5 mm) ovo je postignuto, mada se zbog lepljena FBG na uže smanjuje njegova efektivna dodirna površina sa



betonom. Kod drugog tipa centralni deo užeta je ustvari ojačan optički kabl sa FBG sensorima, i ako je njegova mehanička otpornost vlakna sa FBG manja, onda i celo uže ima efektivno manju zateznu otpornost. Treći tip senzora zbog dimenzija stezača može da promeni sile trenja između betonskog kanala i postavljenog užeta i uticati na gubitke usled prednaprezanja. Dužina FBG senzora takođe ima uticaj na tačnost merenja, jer senzori mere usrednjeno naprezanje po celoj mernoj dužini, što nije dobro kod neravnomernog istezanja, a i senzori veće dužine ne mogu lako da se provlače kroz zakrivljene kanale u betonu.

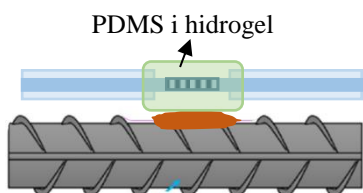
Od interferometarskih senzora za merenje sila koriste se SOFO i FP senzori otvorenog tipa koji se pričvršćuju na užad pomoću stezača i potrebno je voditi računa da stezač ne ošteti senzor, ali i da ne dođe do proklizavanja između kabla i senzora. Ovi senzori imaju malu temperatursku osetljivost za razliku od FBG, ali se preporučuje da se temperatura uporedo meri i na neki drugi način zbog bolje interpretacije rezultata.

Velika prednost potpuno distributivnih senzora je da se obična monomodna telekomunikaciona OV mogu koristiti kao senzori bez nekog posebnog tretmana,. Kako je njihova senzorska dužina od 1- 100 km moguće je za sva merna mesta na nekoj konstrukciji koristiti jedno OV, mada sa povećanjem dužine OV povećava I verovatnoću njegovog oštećenja. Distributivni senzori se povezuju na užad ili tako da se lepe celom dužinom ili u određenim tačkama ili su ojačani polimernim kompozitima i upleteni između žica u okviru užeta u automatizovanom procesu. Kontinualno lepljenje je potrebno kod neuniformnog naprezanja užeta, a tačkasto se primenjuje za merenje usrednjenog naprezanja po deonicama. Ručna instalacija distributivnih senzora je mukotrpa i dugotrajna, pa se sve više radi na robotima ili specijalnim mašinama koje bi se za ovo koristile. Zbog istovremene osetljivosti i na istezanje i temperaturu, vrši se je razdvajanje ovih uticaja. To se može postići postavljanjem još jednog nezategnutog DFOS- a, najčešće postavljanjem OV koje može slobodno da se pomera umutar zaštite. Drugi način je da se na istom OV koriste dva tipa distributivnih mernih tehnika, na primer OTDR sa Rejljevim rasejanjem i BOTDR koji imaju različite koeficijente osetljivosti na temperaturu i istezanje, pa se na osnovu praktično dva merenja iz sistema dve jednačine mogu dobiti i temperatura i istezanje, na različitim delovima užeta [7].

### *Detekcija pojave korozije u prednapregnutom betonu*

Oštećenje objekata ili njihovo propadanje znatno pre projektom predviđenog vremena javlja često ako se nalaze u agresivnim sredinama ili okružene korozivnim hemikalijama. FOS spadaju u senzore koji se intenzivno proučavaju za detekciju i napredovanje korozije u betonskim konstrukcijama. FOS korozije se mogu podeliti u tri grupe : na one koji detektuju hemijske reakcije koje se dešavaju tokom korozije, one koji detektuju koroziju čelične armature i treći tip koji detektuju širenje betona usled korozije armature. Među FOS korozije, prednost imaju FBG senzori, jer se i uvođenje svetlosti i očitavanje mernog signala vrši samo na jednom kraju OV [35].

Pre primene FBG senzori se moraju prethodno pripremiti za direktno praćenje hemijske reakcije koja se



Slika 16. FBG sa nagriženim omotačem i zaštitom od PDMS i hidrogela, (prema [35]).

odvija oko OV ili u omotaču optičkog vlakna Omotač OV oko FBG se mora ukloniti (nagrizanjem koncentrovanom azotnom kiselinom ) i jezgro se praktično izlaže okolnoj sredini, ali se prethodno ovaj deo vlakna pričvrsti na aluminijumsku pločicu da ne bi pukao. Zbog temperaturske kompenzacije i kompenzacije istezanja koje nije vezano za koroziju najčešće se koristi više FBG na istom OV, od kojih se nekima skida, omotač, a druge služe kao kompenzacione. Jedan od načina zaštite jezgra po uklanjanju omotača je i napananje tankog sloja gvožđa na njega koje može da korodira i tako menja efektivni indeks prelamanja

FBG-a. Da bi se poboljšala mehanička zaštita senzora i povećala njegova oseljivost, na nagizeni omotač se nanosi zaštitni sloj od polidimetilsiloksena (PDMS) koji se lako deformiše i prilagođava podlozi i prenosi širenje armature na mestu korozije na FBG. Dodavanjem i sloja pH- osetljivog hidrogela koji različito bubri u različitim pH sredinama kako je prikazano na slici 16, FBG mogu da razlikuju i da li je okolna sredina vazduh, kisela ili bazna.

U ranoj fazi pojave i širenja korozije formiraju se produkti koji imaju zapreminu i 2-6 puta veću od originalno korišćenog čelika. Zato se razvijaju metode za detektovanje zapreminskog širenja čelične armature. Jedan način je omotavanje više FBG senzora na istom vlaknu oko armature i pričvršćivanja epoksidnim lepkom. Pri ispitivanju ovih FOS ubrzanom korozijom armaturnih elemenata uspostavljena je analitička zavisnost između promene Bragove talasne dužine i prečnika i gubitaka u prečniku čelične armature.

Distributivni BOTDR i BODTA, kao i OFDR senzori korozije najčešće mere povećanje obima čeličnih šipki i armatura na mestima korozije ili pojave pukotina u betonu izazvanih korozijom. Oni se najčešće sa nekim korakom obmotavaju oko armature i lepe u određenim tačkama duž armature. i praktično mere istezanje nastalo na mestu korozije i omogućavaju određivanje mesta pojave. Osetljivost merenja zavisi od zategnutosti OV između tačaka lepljenja i vrste zaštitnog sloja OV.

Interesatan je i hibridni sistem opisan u [36] koji kombinuje BODTA i FBG senzore koji su namotani oko betonskog elementa. Pokazano je da BODTA može da prati širenje betona i pukotina usled korozije, a da FBG senzor precizno detektuje vreme i mesto nastanka ovih pukotina.

### *Merenja na mostovima*

Zbog značaja mostova i autoputeva kao velikih infrastrukturnih objekata veliki broj različitih tipova FOS se koristi i eksperimentalno i komercijalno za praćenje njihovog stanja pri čemu se mere njihove mehaničke karakteristike ( i statičke i dinamičke), kao i karakteristike okolne sredine kao što su temperatura vlažnost, pH vrednost i koncentracija hlora.

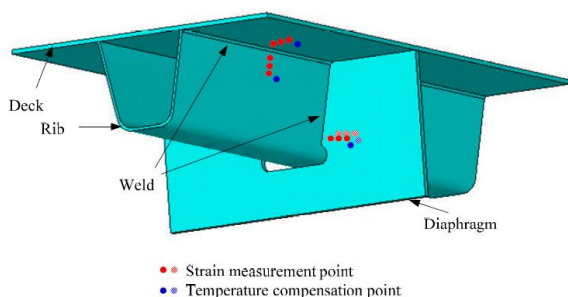
Prvi komercijalni senzori na mostovima bili su interferometarski SOFO senzori i sada već postoji iskustvo njihove upotrebe duže od 20 godina. Senzori su imali velike merne dužine i merili usrednjeno istezanje i tokom izgradnje mostova, a naročito pri njihovom korišćenju [4].

Praćenje dinamičkih karakteristika, kao što su rezonantna učestanost, modovi oscilovanja i faktori prigušenja oscilacija je od velikog značaja za procenu stanja strukture mosta. U radu [37] je prikazana primena FBG inklinometara za njihovo određivanje. Ovi senzori su merili uglove do 8° sa rezolucijom od 0,05% punog opsega, a upotrebljeni interrogator je zahvaljujući frekvenciji skeniranja do 1kHz omogućio praćenje promene nagiba u frekventnom opsegu do 250Hz.

Četvorogodišnja ispitivanja na pešačkom mostu pomoću postavljenih FBG sa dugačkom mernom dužinom

od 60 cm i BOTDA distributivnog senzora prikazana su u [38]. Obe vrste senzora su postavljeni u beton u toku izgradnje mosta, tako da je praćeno ponašanje betonske konstrukcije mosta od početka njegove upotrebe i detektovana je pojava prvih pukotina.

U radu [39] opisan je sistem za praćenje napreznja u okolini zavarenih spojeva čeličnog mosta koja su indukovana temperaturnim promenama ili odvijanjem saobraćaja na mostu tokom njegove izgradnje i kasnijeg korišćenja. Na 16 mernih mesta postavljena su po tri



Slika 17 Položaj FBG senzora istezanja i FBG senzora temperature na zavarima čeličnog mosta, [39]

FBG senzora istezanja merne dužine 15mm na rastojanjima 5mm, 15mm i 20 mm od zavara i po jedan kompenzacioni FBG senzor temperature kako je prikazano na slici 17. Korišćen je interogator sa 16 kanala sa po četiri FBG senzora na svakom kanalu i ova merenja su omogućila određivanje faktora koncentracije napona u okolini zavara.

### *Primena FOS u tunelima*

Distributivni i kvazidistributivni FOS se koriste u tunelima za praćenje naprezanja u različitim fazama izgradnje, ali i kasnije za monitoring tunela tokom korišćenja.

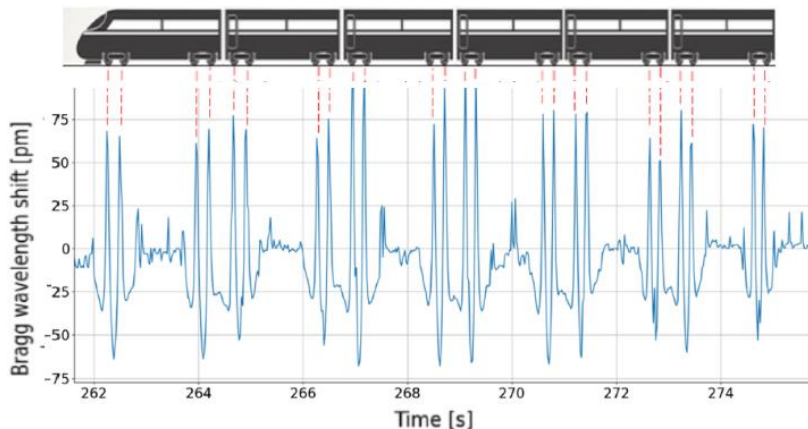
U istraživanjima prezentovanimu u radovima [40, 41] opisan je merni sistem na bazi OFDR distributivnog senzora za praćenje očvršćavanja betonske obloge tunela. Prethodno je u okviru kružnog rešetkastog nosača preko koga se nanosi beton postavljeno OV dugo 230m na taj način da prolazi i kroz oblasti bliže steni, i kroz oblasti bliže otvoru tunela. Ovaj senzor je pratio promene temperature i istezanja i rezultati su upoređivani sa merenjima pomoću termoparova i pomoću pretvarača na bazi strune. Merenje je vršeno od početka očvršćavanja betona i trajalo nekoliko nedelja i obuhvatilo je i nastavak radova na izgradnji. Ovim sistemom su već 12 sati po izradi najvišeg dela tunela izmerena kompresiona naprezanja. Senzor je omogućio da se precizno lokalizuju maksimalno naprezanje u oblozi u svakom trenutku, ali da se prati kroz vreme nastanak i razvoj deformacija.

U radu [40] je opisan DFOS sistem za praćenje uticaja izgradnje stambene zgrade iznad tunela metroa koji se bazira na OFDR metodi i koristi zalepljeno OV dugačko 50m. Ono je zalepljeno po poprečnom preseku tunela i ispod koloseka na mestu očekivanih najvećih naprezanja i deformacija, a jedan deo OV je podužno postavljen na oblogu duž tunela. Detektovana su nesimetrična naprezanja po poprečnom preseku tunela kao i kompresiona naprezanja u oblozi tunela za vreme iskopavanja temelja zgrade, kao i istezanja obloge pri kasnijem građenju zgrade.

### *Primene FOS na železničkim strukturama*

FOS senzori se sve više razvijaju za primene na železnici, a među njima posebno FBG i distributivni senzori. FBG senzori se vrlo uspešno primenjuju [12] za brojanje osovina vozova i monitoring težine vozova u toku kretanja, za detekcije defekata na točkovima, kao i za generalno praćenje naprezanja u šinama i podlozi. Postoji dosta prostora za usavršavanje ovih senzora kako bi se masovno koristili kao standardizovani senzori. Jedna od bitnih primena koja se razvija je i dinamičko merenje opterećenja. Za dosadašnje primene korišćena su dva tipa interogatora oni sa velikom osetljivošću i rezolucijom očitavanja talasne dužine od 1 pm, ali sa frekvencijom očitavanja do 10 Hz, i drugi sa brzom akvizicijom većom od 1 kHz, ali slabijom rezolucijom očitavanja promene talasne dužine od oko 100pm. U radu [12] je i opisan sistem namenjen dinamičkom merenju ugiba i naprezanja u šinama, kao i većeg broja parametara koji se mogu indirektno odrediti. Korišćeno je 5 FBG senzora istezanja postavljenih paralelno neutralnoj osi šine sa spoljne strane glave i nožice, jedan ispod drugog na različitim visinama kao i po dva FBG istezanja sa gornje i donje strane stopala šine. Ovi FBG senzori pri laboratorijskim ispitivanjima nisu imali nikakvu dodatnu mehaničku zaštitu i dvikomponentnim lepkom su zalepljeni na šinu, a zatim su povezani na interogator i slobodni delovi OV i konektori su dodatno fiksirani i zaštićeni lepljivom trakom. Laboratorijski testovi bazirani na savijanju u tri tačke sa postepenim dodavanjem sile su pokazali da najveću osetljivost na primenjenu silu od 32 pm/t imaju

senzori sa donje strane stopala, a da senzor koji se nalazi na neutralnoj osi šine nije uopšte osetljiv na primenu sile i kao takav bi mogao da se koristi za kompenzovanje uticaja temperature. Da bi se senzori pripremili za postavljanje na pruzi u koloseku i koristili za merenja pri kretanju voza napravljene su



Slika 18. Karakteristični signali sa FBG senzora istezanja pri prolasku vozova (prema [12])

specijalne dvoslojne podloge u okviru kojih su fiksirani FBG senzori, a zatim su te podloge sa sensorima, kao celina, postavljene sa donje strane stopala. Prethodno je dodatnim laboratorijskim testovima određena osetljivost od 24pm/t za ovu vrstu FBG senzora sa zaštitnom podlogom. Senzori su povezani sa posebno razvijenim interogatorom na bazi VCSEL kome se modulirano može menjati talasna dužina u opsegu od 10nm oko osnovne na 1550 nm. Na slici 18 su prikazani karakteristični signali pri prelasku pojedinačnih osovina voza iznad jednog

FBG senzora. Pokazano je da se ovim sistemom mogu brojati osovine i prepoznavati prema rastojanjima vrste vozova. Što se tiče merenja težine iznad osovine potreban je veliki broj merenja na terenu da bi se utvrdila osetljivost sistema kao i efikasniji algoritmi za određivanje maksimuma u signalu.

U radu [42] je opisan sličan system, koji može da meri brzinu i ubrzanje vozova i prati dinamičko opterećenje. On se sastoji od više FBG senzora istezanja i temperature. Svi FBG senzori su povezani na red na isto OV koje služi i za komunikaciju. FBG senzori istezanja su postavljeni pod uglovima  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  i  $90^\circ$  u odnosu na neutralnu osu na nožici, kao i sa donje strane stopala šine na položaje koji su u sredini između pragova i na različitim rastojanjima od pragova. Merenje je trajalo godinu dana, pri prolasku vozova koji su se kretali velikim brzinama od 200 do 300km/h. Senzori su prvo zalepljeni na šinu dvokomponentnim lepkom a zatim povezani međusobno preko konektora, pa na OV koje je vodilo signal ka interogatoru. Dodatno su zaštićeni silikonom i lepljivom trakom. Utvrđeno je da su svi senzori ostali neoštećeni do kraja ispitivanja. Pokazano je da se sensorima na neutralnoj osi može meriti i temperatura šine, a da merenje dinamičke sile može da se vrši, ali sa nedovoljnom tačnošću, zbog različitog prenosa opterećenja sa šine na FBG zbog lepka. Smatra se da se kalibracija senzora pored laboratorije mora obaviti i na terenu sa vozovima poznatih brzina i sa poznatim opterećenjima pre nego što se sistem koristi za dugotrajna merenja na pruzi.

U radu [43] je prikazana primena FBG za praćenje promena na specijalnim komponentama na pruzi kao što su skretnice i jezičci na njima, izolovani šinski spojevi i vezice za njih i sl, čije oštećenje može dovesti do ispada vozova i uzrokovati teške nesreće. Za ove svrhe je korišćena mreža od 16 FBG senzora istezanja i temperature upisanih na četiri OV koja su preko kaplera povezana na isti laserski izvor koji linearno menja talasnu dužinu.

Primena distributivnih FOS na železnici počinje da uzima primat u odnosu na ostale FOS zbog mogućnosti praćenja različitih parametara koloseka na velikim dužinama. U radu [44] opisani su realizovani DFOS pod nazivom FOAD koji predstavljaju distributivne senzore istezanja bazirane na Rejljevom rasejanju. Oni se koriste za detekciju i praćenje akustičkih talasa koji se stvaraju različitim događajima u okolini optičkog vlakna neposredno ukopanog uz kolosek. Ovi akustički događaji nastaju u toku kretanja

voza, loma šine usled udara, prilikm dodira točka i šine, pada kamenja na šinu ili nedozvoljenog prisustva ljudi na pruzi.

U radu [45] je opisan FOS sistem baziran na C-OTDR koji se koristi za praćenje i kontrolu kretanja vozova duž nekog koloseka. Pobudni optički impulsni signal čija širina može da se podesi od 50 do 200 ns i čiji je period ponavljanja od 50 do 300 $\mu$  se šalje sa visoko koherentnog lasera talasne dužine 1550 nm. Standardno telekomunikaciono OV je postavljeno na rastojanju 5m od pruge na dubini od 30 do 50 cm i na dužini od 40 km. Povratno Rejljevo infracrveno zračenje se vraća sa različitih nehomogenosti duž OV i na fotodetektoru na koji se dovodi se javlja stabilna interferentna slika sa naizgled slučajnim rasporedom tamnih i svetlih polja (spekle). Ovo zračenje je pojačano kada se vraća sa delova OV koji su izloženi nekom udarnom tipa vibracija, a koje dovode do promene indeksa prelamanja OV na tim mestima i uzrokuju i vremenske i frekventne promene u interferentnoj slici. Analiziranjem ovih sekvenci korišćenjem vejevleta i određenih matematičkih klasifikatora moguće je odrediti tip, jačinu i mesto izvora ovih vibracija sa prostornom rezolucijom od 1 m..

#### *Primene senzora sa plastičnim OV*

Zbog prečnika jezgra reda 1 mm, jednostavnog uvođena svetlosti i velikog maksimalnog relativnog istežanja intenzivno se ispituje se mogućnost primene plastičnih OV za merenja u građevinarstvu.

Korišćenje i karakterizacija distributivnog senzora za detekciju pukotina na bazi plastičnih OV je prikazana u radu [46]. Po skidanju zaštite OV su lepljena pod različitim uglovima u odnosu na očekivani pravac pukotina i praćen je povratni rasejani signal OTDR metodom. Ovaj jednostavan distributivni senzor sa odličnom ostljivošću može da detektuje nastanak pukotine kao i da prati širenje pukotina do 7,8 mm, što je mnogo više nego sa staklenim OV.

Jednostavan intenzitetni senzor sa plastičnim OV prikazan je u radu [47]. Na OV su napravljeni poprečni useci malo kraći od poluprečnika, na svakih 5 cm dužine. Izuvijano OV se ugrađuju u tečan beton. Ovaj senzor ima konfiguraciju intenzitetnog senzora sa nekoherentnim izvorom i fotodetektorom. Izlazni optički signal je u početku konstantan ili čak blago raste, dok je beton u plastičnoj fazi i useci OV su ispunjeni vodom, a zatim počinje da opada sa početkom očvršćavanja. Pored opisane prve oblasti, jasno se uočavaju još tri karakteristične oblasti opadanja optičkog signala koje odgovaraju različitim fazama očvršćavanja betona povezanih sa razvijanjem toplote i gubitkom vlage. Ovaj senzor može da prati potpuni tok očvršćavanja koje može da traje i više nedelja, što je mnogo duže od konvencionalnih senzora koji obično prate prvih 10 sati.

## ZAKLJUČAK

U poslednjih dvadeset godina mnoga istraživanja su vršena u oblasti razvoja i primene FOS u građevinarstvu. Određeni tipovi senzora su se izdvojili kao posebno pogodni za ove primene kao što su Fabr-Peroovi interferometarski senzori, senzori na bazi upisanih Bragovih rešetki i distributivni senzori. Od prednosti FOS u odnosu na klasične senzore za građevinarstvo su značajne one koje se tiču njihovih malih dimenzija i težine, otpornosti na elektromagnetske smetnje, dugotrajnu merna stabilnost, a posebno na jedinstvenu mogućnost kvazidistributivnih i distributivnih merenja na velikim dužinama i površinama strukturnih objekata. Moguće je praktično istovremeno pratiti različite parametre na velikom broju mernih mesta pri čemu se očitavanje mernih signala vrši samo na jednom kraju OV.

Pored toga što su razvijeni FOS i merni sistemi za mnoge primene, a neki od njih i komercijalizovani, postoji još mnogo prostora za unapređenje. Potrebno je optimizovati optičke kablove za specifične primene, kako po broju vrsti i rasporedu OV, zaštitnim i ojačavačkim slojevima tako, i oblikom koji omogućava bolju osetljivost FOS kao i brzo i atomizovano postavljenje senzora na merna mesta. Zaštita senzora pri ugradnji ili postavljanju na strukturu treba da se poboljša korišćenjem novih ili tehnološki unapređenih materijala kako bi se sprečilo njihovo oštećenje pri ugradnji i tokom korišćenja i kako mogli da se koriste desetinama godina za monitoring objekata. Sa druge strane prenos pritiska, istezanja, sile i sa strukture na senzor zbog ove zaštite dovodi do drugačijeg ponašanja u terenskim uslovima u odnosu na laboratorisku kalibraciju. Uviđa se da se moraju pored laboratorijske osmisлити procedure kalibracije na samom terenu, kao i bolji načini modelovanja karakteristika senzora u realnim uslovima. Standardizacija FOS senzora za građevinske primene je sledeći veliki korak i dovela bi do lakše i masovnije primene i do bolje obučenosti osoblja koje postavlja i održava ove senzorske sisteme. Iako se dosta proučava međusobna senzitivnost većine FOS na temperaturu i istezanje, i razvijene su mnogi načini da se ona ublaži, postoji još prostora da se raznim kombinacijama tipova senzora, kao i razvojem novih tipova optičkih vlakana npr. sa više jezgara ovo poboljša. Za obradu signala pored vremensko frekvencijskih metoda mogu se primeniti i raznovrsne tehnike mašinskog učenja. Ekonomski aspekt je takođe veoma važan i cena FOS treba da bude konkurentna u odnosu na klasične senzore kako bi se masovnije primenjivali.

## ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je finansirano od Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije kroz istraživački projekat br. 200092.

## LITERATURA

- [1] Dakin J., Culshaw B. *Optical Fiber Sensors: Principles and Components*, Artech House Telecommunication Library, 1988.
- [2] Georgijević V. et al. Predavanja iz fizike, Građevinska knjiga, Beograd 2005.
- [3] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han, *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review*, The Scientific World Journal 2014, 2014.
- [4] C.K.Y Leung, K.T. Wan, D. Inaudi, et al., *Review: optical fiber sensors for civil engineering applications*. Materials and Structures 48, 2015.
- [5] J. K. Sahota, N. Gupta, D. Dhawan, *Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review*, Optical Engineering 59(6), 2020.
- [6] B. Gholamzadeh, H. Nabovati, *Fiber Optic Sensors*, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering 2(6), 2008.
- [7] Y. Yao, M. Yan, Y. Bao, *Measurement of cable forces for automated monitoring of engineering structures using fiber optic sensors: A review*, Automation in Construction 126, 2021.
- [8] D. Inaudi, et al. *Fabry-Perot Fiber Optic Sensors for Civil and Geotechnical Monitoring of Large Structures*. Structural Health Monitoring-an International Journal (2019)
- [9] M. Ghimire, C. Wang, K. Dixon, M. Serrato, *In situ monitoring of prestressed concrete using embedded fiber loop ringdown strain sensor*, Measurement 124, 2018.

- [10] T. Wu, G. Liu, S. Fu, F. Xing, *Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure*. Sensors. 20(6), 2020.
- [11] J. Kumar, R. Mahakud, S. Kumar et al. *Analysis and experiment on simultaneous measurement of strain and temperature by etched and un-etched FBG pair*, Results in Optics 5, 2021.
- [12] B. Van Esbeen, C. Finet, R. Vandebrouck, D. Kinet, et al, *Smart Railway Traffic Monitoring Using Fiber Bragg Grating Strain Gauges*. Sensors 22, 2022.
- [13] Baldwin C., J. Niemczuk, J. Kiddy, T. Salter (2004): *Review of Fiber Optic Accelerometers*. <http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/fiberoptaccel.pdf>.
- [14] K. Yüksel, D. Kinet, V. Moeyaert, G. Kouroussis, et al, *Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers*, Smart Materials and Structures. 27, 2018.
- [15] <https://www.hbm.com/en/4599/new-light-optical-fiber-sensors/>
- [16] <https://smartec.ch/en/products/?filters=fiber-optic-sensing>
- [17] Y. Zheng, Z. W. Zhu, Q. X. Deng, F. Xiao, Theoretical and experimental study on the fiber Bragg grating-based inclinometer for slope displacement monitoring, Optical Fiber Technology 49,
- [18] M. Amanzadeh, S. M. Aminossadati, M. S. Kizil, A. D. Rakić, *Recent developments in fibre optic shape sensing*, Measurement 128, 2018.
- [19] <https://lunainc.com/micron-optics-now-luna-innovations>
- [20] <https://fibergratings.com/products/fbg-sensors/>
- [21] P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. Chorpening, M. Buric, P. Ohodnicki, *Distributed optical fiber sensing: Review and perspective* Applied. Physics Review 6, 2019.
- [22] J. King, D. Smith, K. Richards, P. Timson, R. Epworth and S. Wright, *Development of a coherent instrument*, Journal of Lightwave Technology, 5,(4), 1987.
- [23] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, K. Hotate, *Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR)*, OPTICS EXPRESS 16 (16), 2008.
- [24] S. Singh, R. Gangwar, N. Singh, *Nonlinear Scattering Effects In Optical Fibers*, Progress In Electromagnetics Research, PIER 74, 2007.
- [25] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, *Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme*, OPTICS EXPRESS 17(11), 2009.
- [26] Y. Muanenda, C. J., Oton F. Di Pasquale, Application of Raman and Brillouin Scattering Phenomena in Distributed Optical Fiber Sensing, Frontiers in Physics 7, 2019.
- [27] X. Zou, A. Chao, Y. Tian,; N. Wu et al, *An experimental study on the concrete hydration process using Fabry–Perot fiber optic temperature sensors*. Measurement 45, 2012.
- [28] S. Drusová, W. Bakx, P. J. Doornenbal, R. M. et al, *Comparison of three types of fiber optic sensors for temperature monitoring in a groundwater flow simulator*, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 331, 2021.
- [29] M. Leone, *Advances in fiber optic sensors for soil moisture monitoring: A review*, Results in Optics 7, 2002.
- [30] D.N. Vidana Gamage, A. Biswas, I.B., Strachan, V.I., Adamchuk,. Soil water measurement using actively heated fiber optics at field scale, Sensors (Switzerland), 18 (4), 2018.
- [31] D. Cao, H. Fang, F. Wang, H. Zhu, M. Sun, *A fiber bragg-grating-based miniature sensor for the fast detection of soil moisture profiles in highway slopes and subgrades*. Sensors 18 (12), 2018.
- [32] X. Fang Y. Zeng, F. Xiong, et al. *A review of previous studies on dam leakage based on distributed optical fiber thermal monitoring technology*, Sensor Review 41(4), 2021.

- [33] F. Li, W. Qin, H. Hu, *Experimental Investigation Monitoring the Saturated Line of Slope Based on Distributed Optical Fiber Temperature System*, Advances in Materials Science and Engineering, 2022.
- [34] J. Kim, H. Kim, S. Choi, S. Park, *Measurement of Prestressing Force in Pretensioned UHPC Deck Using a Fiber Optic FBG Sensor Embedded in a 7-Wire Strand*, Journal of Sensors, 2016.
- [35] F. Tang, G. Zhou, H. N. Li, E. Verstryngge, *A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures*, Construction and Building Materials 313, 2021.
- [36] J. Mao, J. Chen, L. Cui, W. Jin, C. Xu, Y. He, *Monitoring the Corrosion Process of Reinforced Concrete Using BOTDA and FBG Sensors*. Sensors 15, 2015.
- [37] F. Xiao, G. S. Chen, J.L.Hulsey, *Monitoring Bridge Dynamic Responses Using Fiber Bragg Grating Tiltmeters*. Sensors 17(10), 2017.
- [38] B. Glišić, D.Hubbell, D. Sigurdardottir , Y. Yao, *Damage detection and characterization using long-gauge and distributed fiber optic sensors*, Optical Engineering 52(8), 2013.
- [39] X. W.Ye, Y. H. Su, P.S. Xi, *Statistical Analysis of Stress Signals from Bridge Monitoring by FBG System*. Sensors 18, 2018.
- [40] M.F. Bado, J.R. Casas, *A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring*. Sensors 21, 2021,
- [41] C.M. Monsberger, W. Lienhart, A.Kluckner, *Continuous strain measurements in a shotcrete tunnel lining using distributed fibre optic sensing*. Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring, Manchester, UK, 10–13 July 2018.
- [42] M. L. Filograno, P. Corredera, A. Rodríguez-Barriosat al , *Real Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors*, IEEE Sensors Journal 12(1), 2012.
- [43] S. J. Buggy, S. W. James, S. Staines, et al, *Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors*, Measurement Science and Technology, 27(5), 2016.
- [44] FRA Technical report, (2018), *Fiber Optic Availability and Opportunity Analysis for NorthAmerican Railroads*
- [45] A. V. Timofeev, D. V. Egorov, V. M. Denisov, *The Rail Traffic Management with Usage of C-OTDR Monitoring Systems*, International Journal of Computer and Information 9(7), 2015.
- [46] J. Zhao, T. Bao, R. Chen, *Crack monitoring capability of plastic optical fibers for concrete structures*, Optical Fiber Technology 24, 2015.
- [47] P.S. André, H. Varum, P. Antunes, L. Ferreira, M.G. Sousa, *Monitoring of the concrete curing process using plastic optical fibers*, Measurement 45(3), 2012.