

KRIŽNI SPOJ ENORODOVNIH OPTIČNIH VLAKEN

A.Babnik, A.Suhadolnik, J.Možina

KLJUČNE BESEDE: optična vlakna, enorodovna vlakna, križni spoj, interferometri, koeficient sklopitve, parametri, merjenje karakteristik, eksperimentalne raziskave

POVZETEK: Ključni element interferometra z optičnimi vlakni je križni spoj dveh vlaken. Izdelali smo poliran spoj, ki deluje na principu prehoda svetlobe prek evanescentnega polja. V članku so opisani postopki izdelave ter potek in rezultati meritev osnovnih parametrov spoja. Opisan je tudi postopek za določevanje globine brušenja osnov spoja.

SINGLE-MODE OPTICAL FIBER DIRECTIONAL COUPLER

KEY WORDS: optical fibers, single mode fibers, directional couplers, interferometers, coupling coefficient, parameters, characteristics measurement, experimental research

ABSTRACT: The key element in optical fiber interferometry is fiber directional coupler. The polished coupler based on evanescent field coupling is designed. In this contribution fabrication, measurements and results are described. A technique to measure the thickness of remaining cladding on polished single-mode fiber substrate is also reported.

1. UVOD

Vzporedno z razvojem telekomunikacij po optičnih vlaknih se je pričel tudi razvoj nove družine senzorjev z optičnimi vlakni, ki imajo vrsto prednosti pred konvencionalnimi senzorji za merjenje širokega spektra fizikalnih, kemijskih in drugih veličin^{1/}. Senzorje iz optičnih vlaken delimo na hibridne in izdelane le iz optičnih vlaken^{2/}. Ločimo tudi intenzitetne in fazne senzorje. Slednje odlikuje velika občutljivost, oz. natančnost (interferometri). Zaradi prednosti pred klasičnimi interferometrijskimi merilniki (večja kompaktnost, manjše dimenzije, manjša teža, širše področje uporabe) se vse bolj uveljavljajo interferometrijski merilniki, izdelani iz optičnih vlaken. Pomemben element interferometra je delilec žarka. V klasičnem interferometru opravlja to nalogo polprepustno zrcalo ali podoben element, v interferometru z optičnimi vlakni pa en vhodni žarek razdeli v dva žarka element, imenovan spoj optičnih vlaken. Namen članka je opisati razvoj in izdelavo križnega spoja enorodovnih optičnih vlaken, izdelanega po metodi poliranja^{3/}.

2. TEORETIČNE OSNOVE

Križni spoj optičnih vlaken je optični element z dvema vhodnima in dvema izhodnima vlaknoma (slika 1).

Osnovni parametri, ki karakterizirajo spoj, so^{4/}:

– stopnja sklopitve:

$$CR = \frac{100 P_3}{P_2 + P_3} [\%] \quad (1)$$

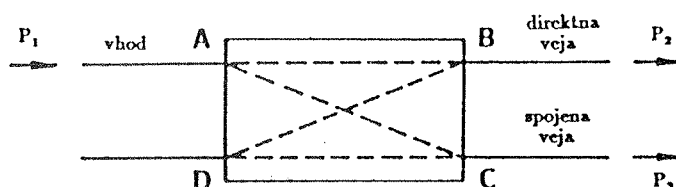
– izgube v spojniku:

$$L_a = -10 \log \frac{P_2 + P_3}{P_1} [\text{dB}] \quad (2)$$

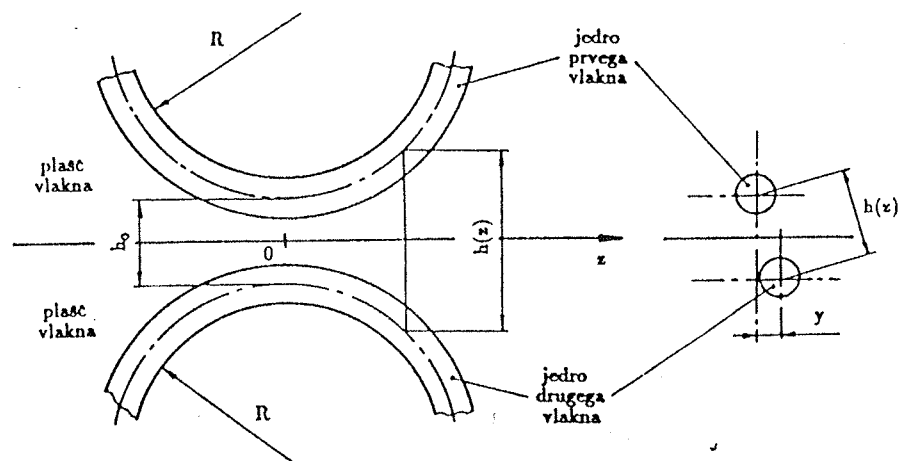
– usmerjenost:

$$D = \frac{P_4}{P_1} 100 [\%] \quad (3)$$

kjer je P_1 vstopna moč svetlobe, P_2 moč v direktni izhodni veji, P_3 moč v spojeni izhodni veji in P_4 moč, ki izhaja iz prostega vlakna na strani vhoda.



Slika 1: Spoj optičnih vlaken - shematsko



Slika 2: Odvisnost razdalje med vlaknoma od razdalje z in bočnega zamika y

Delovanje spoja enorodovnih vlaken je možno razložiti z mehanizmom prestopa svetlobe prek evanescentnega polja^{5/}. To polje se pojavlja v plašču optičnega vlakna kot posledica popolnega odboja svetlobe v optičnem vlaknu na meji jedro-plašč. Svetlobna moč v drugem vlaknu, ki deluje kot motnja za evanescentno polje prvega vlakna, je odvisna od razdalje med jedroma vlaken in od dolžine, na kateri jedro drugega vlakna moti evanescentno polje prvega vlakna. Za primer dveh ravnih vzporednih vodnikov sta moči v izhodnih vlaknih opisani z enačbama^{6/}:

$$P_1 = P_0 \cos^2(cz) \tag{4}$$

$$P_2 = P_0 \sin^2(cz) \tag{5}$$

kjer je: P_0 moč vstopne svetlobe, P_1 moč direktne veje, P_2 moč sklopljene veje, c koeficient sklopitve in z razdalja od pričetka mesta medsebojnega vpliva. Če predpostavimo enakost obeh vlaken in majhno numerično odprtino le teh, lahko zapišemo koeficient sklopitve^{7/}:

$$c = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{u^2}{a^2 V^2} \frac{K_0 \left[w \left(\frac{h}{a} \right) \right]}{K_1^2(w)} \tag{6}$$

kjer je: n_1 lomni količnik jedra, n_2 lomni količnik plašča, λ valovna dolžina svetlobe, a radij jedra vlakna, h razdalja med osema posameznega vlakna, K_n modificirana Besselova funkcija druge vrste reda n , u in w parametra vzdolžnega reda, pri čemer velja: $u^2 + w^2 = V^2$ in V normirana frekvenca $/5/$. V našem primeru sta vlakni ukrivljeni in vzporedno bočno zamaknjeni (slika 2).

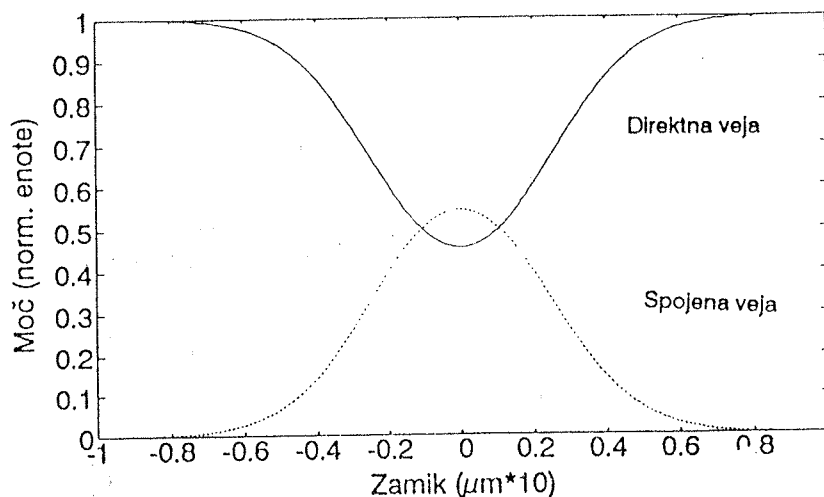
Parametra u in w sta definirana z enačbami, kjer je k valovno število $k = 2\pi/\lambda$ in β konstanta razširjanja ($kn_2 < \beta \leq kn_1$):

$$u = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{7}$$

$$w = a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2} \tag{8}$$

Koeficient sklopitve tako ni več konstantna vrednost v smeri vzdolž poteka optičnih vlaken. Radij ukrivljenja povzroča deformacijo v porazdelitvi električnega polja, kar pokvari cilindrično simetrijo, ki je pogoj, da gornje enačbe veljajo. Če je radij dovolj velik proti medsebojni razdalji jeder, je vpliv zanemarljiv. Gornje izraze je možno uporabiti za opis realnega spoja^{8/}. Moči na izhodnih vlaknih sta tako:

$$P_1 = P_0 \cos^2(c_0L) \tag{9}$$



Slika 3: Teoretični normirani izstopni moči obeh izhodov

$$P_2 = P_0 \sin^2(c_0 L) \quad (10)$$

kjer je:

$$c_0 L = \int_{-\infty}^{+\infty} c(z) dz \quad (11)$$

Pri tem je $c_0 = c(0)$ vrednost koeficienta sklopitve v centru območja spajanja ($z=0$), kjer je razdalja med jedroma minimalna in L efektivna dolžina medsebojnega vpliva, ki zagotavlja enako razmerje moči kot pri spoju vzporednih vlaken z enako medsebojno razdaljo. Ob upoštevanju, da je bočni zamik enak nič in $z^2 \ll h_0 R$, lahko zapišemo^{8/}:

$$L \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{w z^2}{a R}\right) dz = \sqrt{\frac{\pi R a}{w}} \quad (12)$$

Teoretično je efektivna dolžina vpliva neodvisna od razdalje med vlaknoma, odvisna pa je od ukrivljenosti vlakna. Minimalna razdalja med vlaknoma vpliva na koeficient sklopitve. Pri večji razdalji so večje tudi izgube, stopnja sklopitve pa je manjša. Teoretično odvisnost stopnje sklopitve, oz. izstopne moči iz direktnega in spojenega vlakna od bočnega zamika med vlaknoma spojnika, prikazuje slika 3. Odvisnost je izračunana za primer izdelanega spojnika s parametri:

$n_1 = 1,458$, $n_2 = 1,458$, $h_0 = 9\mu\text{m}$, $a = 4,5\mu\text{m}$, $R = 0,1\text{m}$ in $\lambda = 633\text{nm}$.

3. EKSPERIMENTALNO DELO

3.1 Postopek izdelave

V osnovi ločimo tri načine izdelave spoja optičnih vlaken na principu prestopa svetlobe prek evanescentnega polja in sicer s taljenjem^{9,11/}, z jedkanjem^{4,12/} in s poliranjem^{3,10/}. Pri prvih dveh je stopnjo sklapljanja možno nadzorovati med procesom izdelave. Proces izdelave ustavimo, ko dosežemo zahtevano stopnjo sklopitve, ki je pozneje ne moremo več spremeniti. Zaradi možnosti naknadnega nastavljanja parametrov poliranega spoja optičnih vlaken tudi po izdelavi, smo se lotili izdelave le tega kljub njegovi slabši toplotni stabilnosti v primerjavi s taljenim spojem.

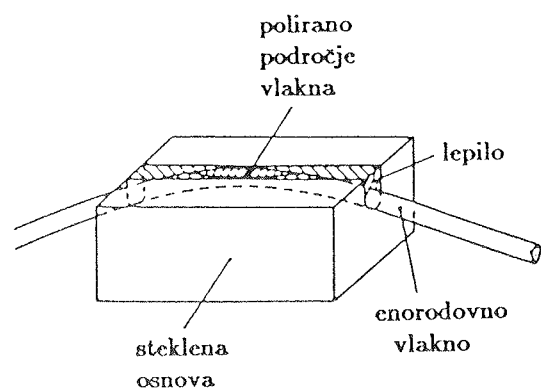
Poliran spoj je sestavljen iz dveh enakih delov. V osnovo je potrebno po daljši strani vrezati utor konveksne oblike z določenim radijem ukrivljenja. Utor smo vrezali z žago, ki ima rezalni rob po notranjem obodu, kar omogoča manjšo debelino žaginega lista v primerjavi z navadnim listom krožne žage. Radij ukrivljenja utora je 10 cm, širina zareze pa 0,5 mm. Material osnove je navadno steklo.

Za izdelavo spoja smo uporabili enorodovno optično vlakno, proizvajalca Iskra EO, s premerom plašča 125,5

μm , premerom jedra 9 μm , lomnim količnikom plašča 1,458 in lomnim količnikom jedra 1,4635. Meja enorodovnosti je pri 1245 nm. Vlaknu pred montažo odstranimo oblogo (zaščito) na mestu, kjer ga pozneje vstavimo v žleb. Vlakno zalepimo z epoksidnim lepilom. Tako izdelano osnovo grobo brusimo na strani vlakna, dokler se ne pojavi iz osnove (površine lepila) plašč vlakna. Nadaljujemo s finim brušenjem do globine, ki zagotovi debelino plašča med površino in jedrom v izmeri $\approx 15\mu\text{m}$. Globino brušenja lahko preverjamo na več načinov. Uporabili smo dva in sicer prvega z merjenjem dolžine ovala na ukrivljenem vlaknu, ki ga ravno brusimo^{13/} in drugega z detektiranjem izgub svetlobe, ki prehaja brušeno mesto na vlaknu. Pri slednji metodi smo kot izvor svetlobe uporabili HeNe laser ($\lambda = 633\text{nm}$). Pri tej valovni dolžini ni zagotovljena potrebna enorodovnost v optičnem vlaknu, približali pa smo se ji z ovitjem lansirnega konca vlakna okoli palice z dovolj majhnim premerom ($d \approx 5\text{mm}$).

Naslednja faza obdelave osnov je poliranje, s katerim dosežemo točno razdaljo jedra vlakna od površine in ravno površino osnove. Med poliranjem obdelavo prekinjamo, sestavimo spoj in ob bočnem zamikanju opazujemo maksimalno doseženo stopnjo sklopitve. Ta je namreč odvisna od razdalje med vlaknoma (dvojna debelina preostanka plašča) in od bočnega zamika, ki umetno povečuje to razdaljo. Za izboljšanje optičnega kontakta med vlaknoma nanese med njiju plast tekočine za izenačitev lomnih količnikov. Za zamikanje smo uporabili posebno držalo z mikrometrskimi vijaki, ki omogoča bočni zamik in rotacijo gornjega dela proti spodnjemu. Med zamikanjem osnov morata biti vlakni v prečni smeri vzporedni. Postopek poliranja in vmesnega merjenja ponavljamo, dokler med zamikanjem ne dosežemo ustrezne stopnje sklopitve. Na sliki 4 je prikazana polovica spoja po poliranju. Sledi utrditev obeh polovic spoja z lepljenjem ali mehansko utrditvijo (utrditev z vijaki).

Ker je vlakno trše od osnove, po poliranju štrli iz osnove. Dovolj dober optični kontakt med vlaknoma v sestavljenih osnovah lahko v tem primeru dobimo tudi brez dodajanja tekočine za izenačitev lomnih količnikov, s čimer povečamo toplotno stabilnost spoja.



Slika 4: Izgled polovice spojaosnove po poliranju

3.2 Meritve karakteristik

Na izdelanih osnovah smo izmerili odvisnosti izgub svetlobe na poliranem mestu, od lomnega količnika nanešenih tekočin in od debeline odvzete plasti plašča. Po tej metodi je možno dovolj natančno določiti razdaljo od površine osnove do jedra vlakna^{11/}. Preverili smo tudi odvisnost signala od temperature nanešene tekočine kot vodilo za izdelavo temperaturnega senzorja^{15/}.

Polirano stran osnove omočimo s tekočino, katere lomni količnik poznamo. V lansirni konec vlakna svetimo s He-Ne laserjem in detektiramo izhodni signal. Meritev ponovimo s tekočinami z različnimi lomnimi količniki. Zanimive so predvsem meritve, ko je lomni količnik tekočine enak, oz. večji od lomnega količnika plašča optičnega vlakna. Merilni sistem je prikazan na sliki 5. Rezultate meritev smo primerjali z rezultati iz literature^{14/}, kjer so razdalje jedra vlakna od površine osnove merili na prečno prerezanih osnovah. Rezultati meritev so prikazani na sliki 6.

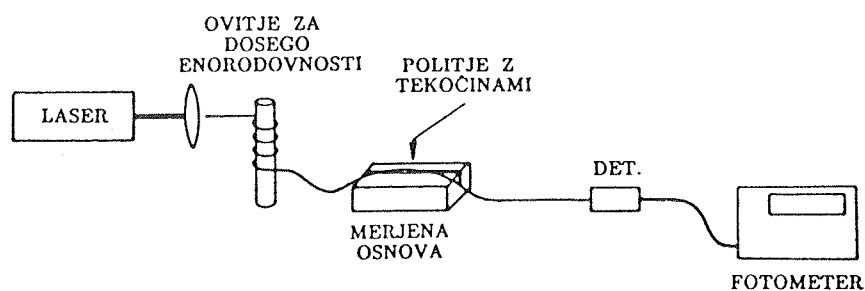
Na izdelanih spojih optičnih vlaken smo opravili meritve stopnje sklopitve in izgube. Spoj, ki smo ga zlepili, je zagotavljal razmerje izstopnih moči svetlobe 4:1 (CR=0,2) in ocenjene izgube 20 dB, mehansko utrjen

spojnik pa razmerje izstopnih moči 1:1 (CR=0,5) in izgube 10 dB.

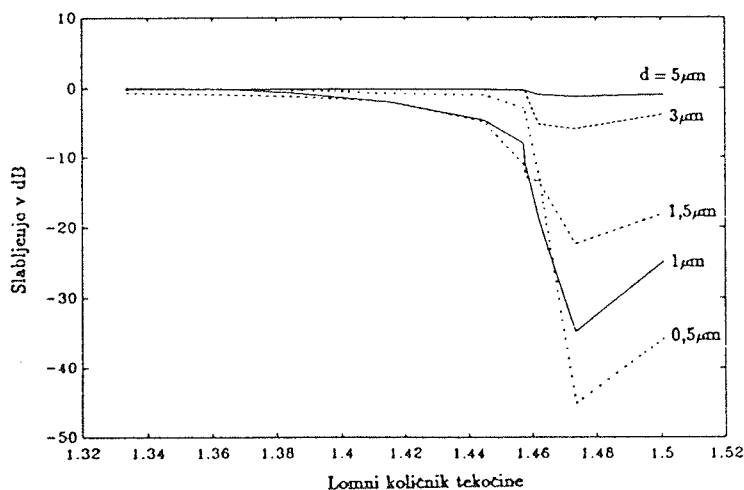
Izmerili smo tudi velikost prestopne svetlobne moči iz direktnega v sklopljeno vlakno v odvisnosti od bočnega zamika. Zamik vlaken smo računalniško upravljali prek koračnega motorja, hkrati pa detektirali oba izhodna signala (slika 7). Meritve smo izvajali pod različnimi pogoji (različna dvojica osnov, dodatek tekočine za izenačitev lomnih količnikov). Dva signala sta prikazana na sliki 8.

4. ZAKLJUČKI

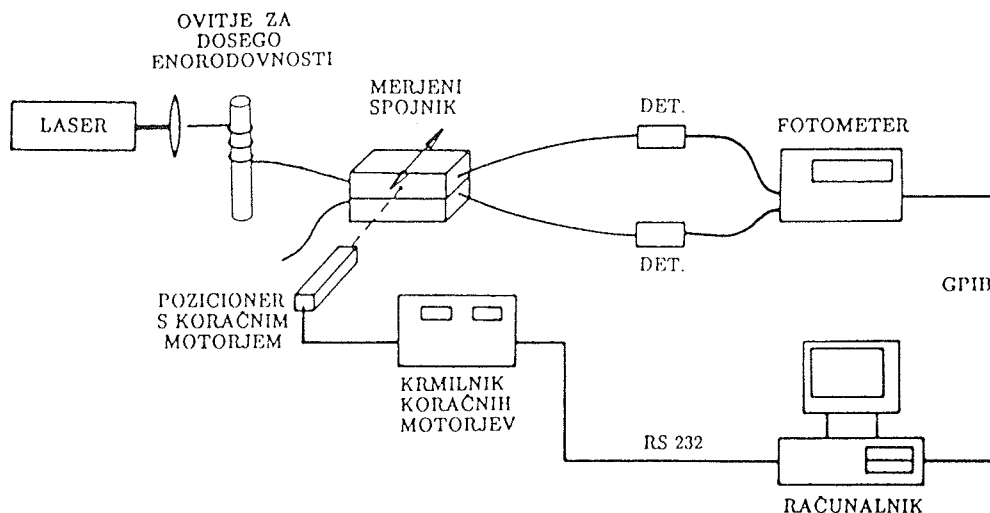
V članku smo opisali izdelavo poliranega križnega spoja enorodovnih optičnih vlaken, ki je eden ključnih elementov interferometra z optičnimi vlakni. Na izdelanih spojih smo opravili meritve stopnje sklopitve in izgub. Preverili smo zmožnost spreminjanja stopnje sklopitve in določili globino brušenja osnov z opazovanjem izgub svetlobe, ki uhaja iz poliranega mesta vlakna. Izdelana sta dva spoja, ki imata stopnji sklopitve 0,5, oz. 0,2 ter izgubami 10, oz. 20 dB.



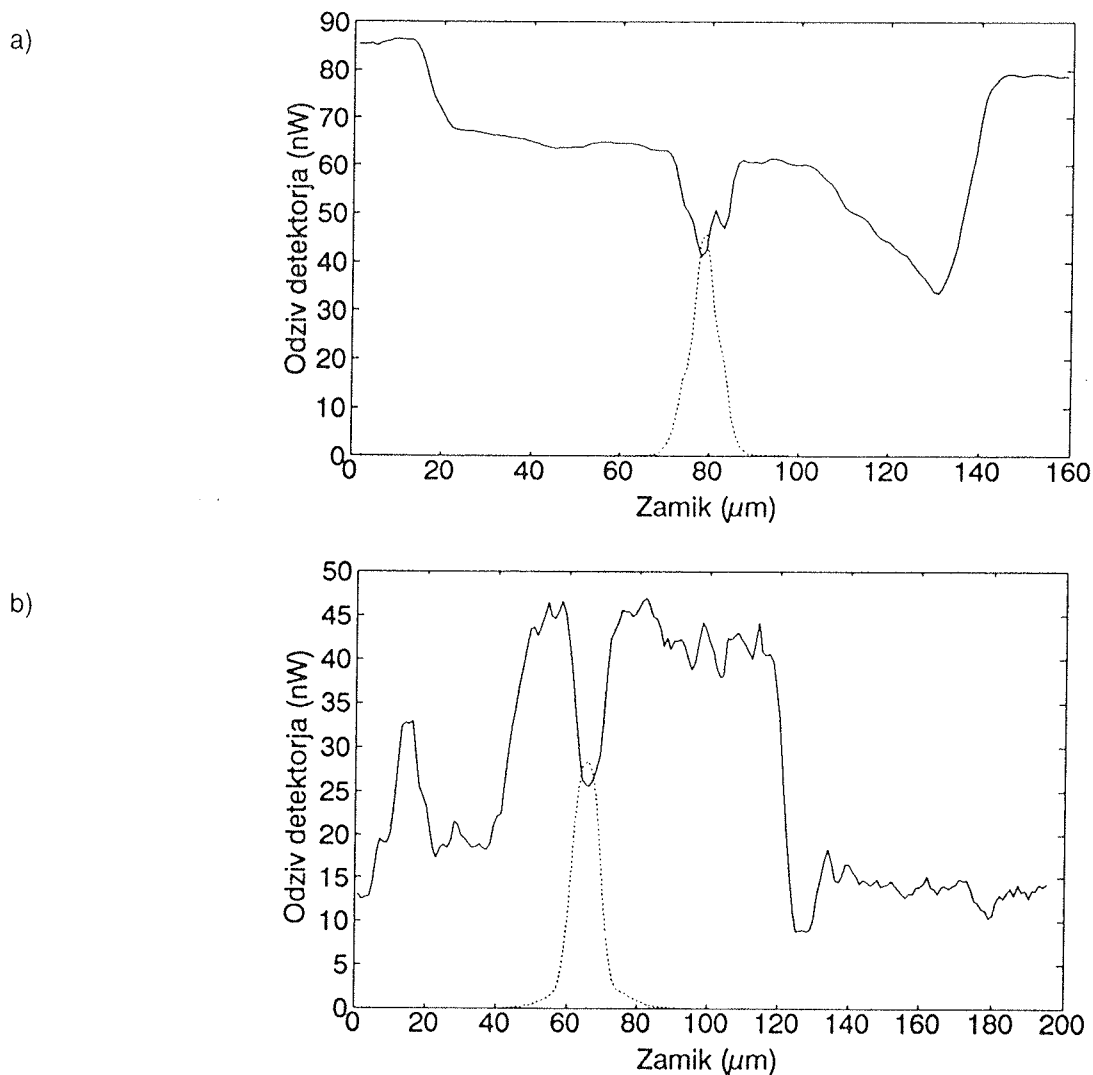
Slika 5: Merilni sistem za določitev razdalje jedra od površine osnove d



Slika 6: Slabljenje signala v odvisnosti od lomnega količnika tekočine in razdalje jedra vlakna do površine osnove d , $\lambda = 633 \text{ nm}$



Slika 7: Merilni sistem za meritev stopnje sklopitve



Slika 8: Izmerjen potek izhodne moči pri bočnem zamiku, $\lambda = 633 \text{ nm}$, vlakno S3C014WD
 — direktna veja
 ---- spojena veja
 a) $h_{dej} = 9 \mu\text{m}$, brez vmesne tekočine
 b) $h_{dej} = 12 \mu\text{m}$, gel z $n = n_{\text{pllaš}}$ kot vmesna tekočina

5. LITERATURA

1. B. Culshaw: Optical Fiber sensors, Vol. 1, Artech House, Boston, 1988
2. E. Udd: Fiber Optic Sensors, A WileyInterscience publication. New York, 1991
3. R. Berg, G. Kotler, H. J. Shaw: Electron. Lett., Vol. 16, 1980
4. F. Liao, J. T. Boyd: Appl. Optics, Vol. 20, 1981.
5. A. W. Snyder, J. D. Love: Optical Waveguide Theory, Capman and Hall, London, 1983
6. D. Marcuse: Bell Syst. Tech. J., Vol. 50, 1971.
7. R. Vanclooster, P. Phariseau: Physica, Vol. 47, 1970.
8. M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw: IEEE J. Quant. Electr., Vol. 18, 1982.
9. M. H. Slonecker: Proc. Optical Fiber Conf.'82, Paper WBB7, Optical Society of America, 1982.
10. J. D. Beasley, D. R. Moore, D. Stowe: Proc. Optical Fibers Conf.'83, Paper ML5, Optical Society of America, 83.
11. I. Yokohama, J. Noda, K. Okamoto: J. Light Tech., Vol. 5, 1987.
12. A. D. Kersey, A. C. Lewin, D. A. Jackson: Electron Lett., Vol. 20, 1984.
13. O. Parriaux, S. Gidon, A. A. Kuznetsov: Appl. Optic, Vol. 20, 1981
14. M. J. Digonnet, J. R. Feth, L. F. Stokes: Optics Lett., Vol. 10, 1985.

15. A. Suhadolnik, A. Babnik, J. Možina: SD91, Zbornik referatov, Portorož 1991

Aleš Babnik, dipl.ing.
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Murnikova 2
61000 Ljubljana

as.mag. Alojz Suhadolnik
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Murnikova 2
61000 Ljubljana

prof.dr. Janez Možina
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Murnikova 2
61000 Ljubljana

Prispelo: 28.10.91

Sprejeto: 25.11.91