

Přesnost měření v senzorových systémech s optovláknovými Braggovými mřížkami

František Urban¹, Radek Helán², František Urban³

¹ Ústav telekomunikací, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, Technická 12, Brno

² NETWORK GROUP, s.r.o., divize Speciální vláknová technika, Olomoucká 91, Brno

³ Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, Technická 10, Brno

E-mail : urbanjr@nwg.cz, r.helan@nwg.cz, urban@vutbr.cz

Anotace:

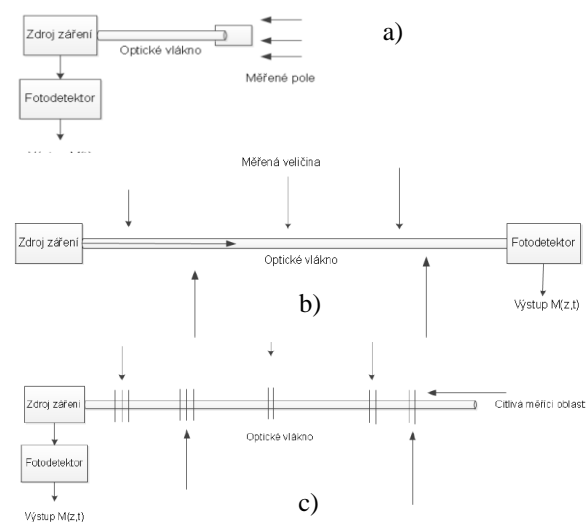
Práce se zabývá aplikací optovláknových Braggových mřížek (FBG) v senzorice a analyzuje faktory, které ovlivňují přesnost vyhodnocování snímaných veličin. Zaměřili jsme pozornost na spektrální měření posunu maxima reflexivity snímací mřížky, které má potenciál dosažení nejvyšších přesností měření. V práci analyzujeme skenovací způsob vyhodnocení spektra a jeho změny jako nejvhodnější metodu pro průmyslové aplikace, která poskytuje širokou volbu přijatelného kompromisu mezi rychlostí vyčítání hodnot spektrálních změn a přesností měření. Veličina, která zásadně ovlivňuje přesnost měření, je šum superponovaný v přijímači na časový signál odezvy reflexivity měřicí mřížky ozařované periodicky přeladovaným úzkopásmovým optickým zdrojem. Práce analyzuje vliv tohoto šumu na měření a zkoumá parametry skenovacího optického zdroje a vlastnosti měřicí mřížky z pohledu dosažitelné přesnosti měření. Pro hodnocení vhodnosti mřížky a parametrů skenování k přesnému měření zavádíme parametr šumová šířka spektra mřížky a šumová šířka skenování spektra mřížky. V práci jsou naznačeny souvislosti technologických kroků výrobního procesu mřížky s odrazivostí mřížky kritickou pro minimalizaci měřících chyb. Význam šířky spektra měřicí mřížky na přesnost měření vedl ke zkoumání možností apodizace mřížek, tedy vytváření mřížkových struktur s podélně proměnným profilem amplitudy změn indexu lomu. Analýza apodizačních profilů a technické možnosti přípravy mřížek s apodizací nás přivedly k řešení čistě apodizovaných mřížkových struktur, které je realizovatelné technikou vícenásobné příčné expozice vlákna interferenčním polem fázové mřížky ozařené výkonným UV laserem. Je představen design mřížky s potenciálem významného zvýšení přesnosti detekce posunu spektra.

1. OPTOVLÁKNOVÁ SENZORIKA

Optická vlákna ve formě zpočátku mnohovidových, později jednovidových vlnodů byla rozvíjena zejména z pohledu jejich aplikace pro přenos dat v průmyslových komunikacích a telekomunikacích. Zakrátko si tato technika vydobyla dominantní místo v těchto aplikacích. Malý měrný útlum, extrémně velká šířka přenosového pásma, imunita vůči ELM a přeslechům, obtížný odposlech, bezpečný přenos byly hlavní motivace rozšíření využití optických vláken v komunikační technice. Teprve mnohem později se do pozornosti výzkumu a vývoje dostávají další vlastnosti optických vláken a vláknových prvků, primárně využívaných pro komunikace, které však vybízely k prozkoumání širší oblasti aplikací. Je to především odolnost optovláknových systémů vůči radioaktivním prostředím a extrémně vysokým teplotám, odolnost vláken vůči vlhkosti a chemicky agresivním prostředím, extrémní časová stálost fyzikálních parametrů vláknových prvků a možnost vytvořit zcela pasivní dielektrickou distribuční a funkční infrastrukturu. Tyto vlastnosti předurčily aplikační rozvoj optovláknových technologií v senzorice. Vznikaly senzorické soustavy, kde nosným prvkem snímané veličiny je některý parametr optického záření. Snímání, tedy převod měřené veličiny na

optický parametr a přenos k vyhodnocení zajišťuje celooptická, vláknová pasivní platforma. Optická vlákna samotná a optovláknové prvky na nich založené umožňují konstrukce bodových, distribuovaných i semidistribuovaných senzorických soustav, viz obr. 1.

S rozvojem technik spektrální analýzy roste



Obr. 1. a) bodové snímání, b) distribuované snímání, c) semidistribuované snímání.

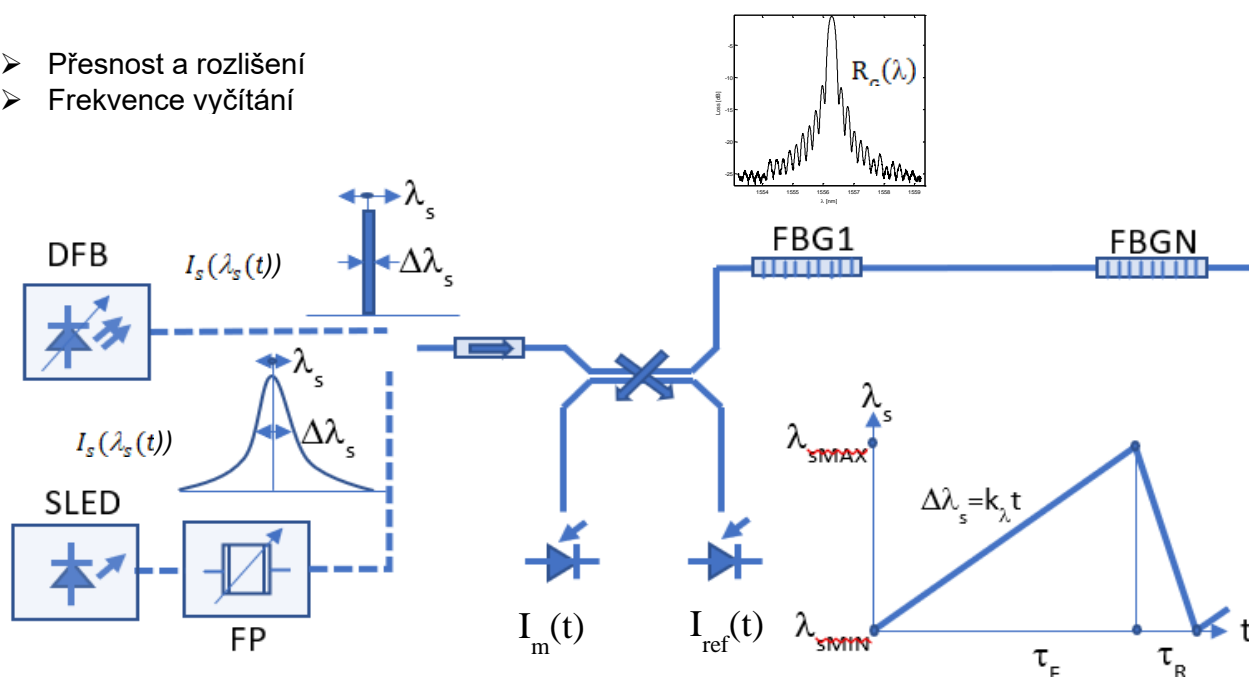
význam využití frekvenčních či spektrálních metod snímání fyzikálních veličin, kdy měřená veličina ovlivňuje buď přímo, změnou vlastností optického vlákna, nebo nepřímo, změnou geometrie či materiálových vlastností struktury optického snímacího prvku, tvar spektra optické odezvy snímání tak, aby ho bylo možno vyhodnotit vlnově – tedy posuvem vlnové délky, popřípadě interferenčně, změnou frekvence interferenčního záznamu apod. Měření vlnové délky či frekvence patří totiž k nejpřesněji měřitelným veličinám a je mnohem méně ovlivňováno při vyhodnocování parazitními procesy a šumem, než je tomu u amplitudově či intenzitně orientovaného snímání. Jedním z prvků vhodných k takovému vlnovému snímání je vláknová Braggova mřížka (FBG). Tento vláknový difrakční prvek může posloužit ke stavbě vláknových bodových a semidistribuovaných snímacích a měřicích systémů pro snímání fyzikálních veličin ovlivňujících samotnou strukturu mřížky nebo pro přeformování záření ve vláknu tak, aby mohlo být, např. na rozhraní vlákna a okolního prostředí, ovlivněno snímanou veličinou. Záření se spektrem ovlivněným odrazem či průchodem měřicí strukturou s FBG je pak spektrálně analyzováno. Často využívaná metoda spektrálního rozkladu prostorové optické vlny na planární difrakční mřížce s detekcí spektrálních sekcí maticovým optickým snímacím prvkem je nákladná a postrádá flexibilitu přizpůsobení k individuálním potřebám měření. Užitečnou průmyslově využitelnou metodou je metoda skenování spektra.

2. SKENOVÁNÍ SPEKTRA A PŮSOBNÍ ŠUMU

Přímé snímání pomocí FBG zahrnuje všechny fyzikální veličiny a působení, které jsou schopny změnit geometrii difrakční struktury mřížky, geometrii struktury vlákna či indexu lomu materiálu vlákna, kde je mřížka zapsána. Především jde o mechanická působení – axiální tahy a tlaky, radiální tlaky, krut a ohyb vlákna s mřížkou, a také o působení teploty – roztahování a smršťování a změna indexů lomů materiálů. Těmito vlivy dochází v FBG k posunu spektra odrazu a průchodu světla. Typicky, FBG zde představuje prvek s vlnově selektivním odrazem, jehož odrazné vlnové spektrum vykazuje jedno výrazné spektrální maximum s šířkou v polovině maxima $\Delta\lambda_{GFWHM}$ od několika desítek pm do několika set pm. Působením snímaných veličin dochází k posunu tohoto spektrálního maxima a posuv vlnové délky maxima odrazivosti určuje hodnotu měřené veličiny. Úkolem vyhodnocovacího systému, tzv. Interogátoru, je tedy zjistit s maximální přesností vlnový posuv maxima odrazného spektra, k čemuž není nezbytná kompletní spektrální analýza. Metoda skenování spektra k tomu využívá lineárně přeladovaný úzkopásmový zdroj optického záření, jímž je, přes optický cirkulátor či obousměrný symetrický dělič záření – splitter, ozařována měřicí mřížka. Odražený časový signál $I_m(t)$ je veden na optický detektor a svým tvarem se podobá křivce spektrální odrazivosti mřížky $R_g(\lambda)$, viz obr. 2 a rovnice (1):

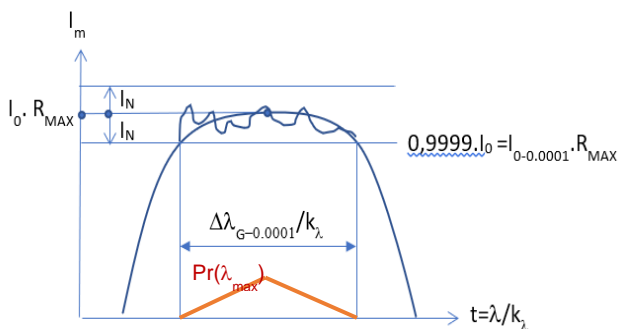
$$I_m(t) = \int_{min}^{max} R_g(\lambda) \cdot I_s(\lambda - \lambda_s(t)) \cdot d\lambda \quad (1)$$

- Přesnost a rozlišení
- Frekvence vyčítání



Obr. 2. Vyhodnocování FBG senzorů skenováním spektra

Míra podobnosti signálu $I_m(t)$ křivce odrazivosti mřížky $R_g(\lambda)$, je ovlivněna dvěma faktory. Prvním je možná změna intenzity skenovacího zdroje $I_s(\lambda_s(t))$ s vlnovou délkou při přeladování. Tento faktor lze eliminovat vztažením detekovaného signálu k referenční hodnotě intenzity zdroje $I_m(t)/I_{ref}(t)$, viz obr. 2. Druhým faktorem je šířka skenovacího spektra $\Delta\lambda_{SFWHM}$, která může zvětšit i zmenšit šířku maxima signálu $I_m(t)/I_{ref}(t)$, ale nezpůsobí, v obvyklé situaci se symetrickým skenovacím spektrem, odchylku maxima od polohy dané křivkou $R_g(\lambda)$. Časový signál $I_m(t)$ je při detekci vždy zatížen šumem, který může změnit časovou polohu maxima a způsobit tak chybu měření, viz obr. 3. Analýza ukazuje, že při prakticky využívaných intenzitách skenovacího záření v řádu 10 dBm je převažujícím šumem výstřelový šum detektoru z přijímaného optického signálu. Jeho velikost dává očekávatelný poměr signálu k šumu na detektoru měřeného signálu $I_m/I_N=10^4$. Pravděpodobnost nalezení maxima tedy bude nenulová v intervalu z času přepočtené vlnové délky $\Delta\lambda_{SN}=\Delta\lambda_{GS}\cdot 0.0001$, viz obr. 3. Tento interval udávající meze možných chyb ve vyhodnocení maxima reflexivity měřicí FBG označujeme jako tzv. šumovou šířku pásma měření. Pro velmi úzkopásmový skenovací optický zdroj s $\Delta\lambda_{SFWHM} \leq 1$ pm je křivka $I_m(t)$ přepočtená na vlnovou délku totožná s $R_g(\lambda)$ a hodnotu $\Delta\lambda_{GS}\cdot 0.0001=\Delta\lambda_{G}\cdot 0.0001=\Delta\lambda_{GN}$ označujeme jako šumovou šířku spektra mřížky. Jak je ukázáno na obr. 3, hustota pravděpodobnosti nalezení maxima $Pr(\lambda_{max})$ v signálu $I_m(t)$ se šumem je téměř trojúhelníkovou funkcí vlnové délky a určuje

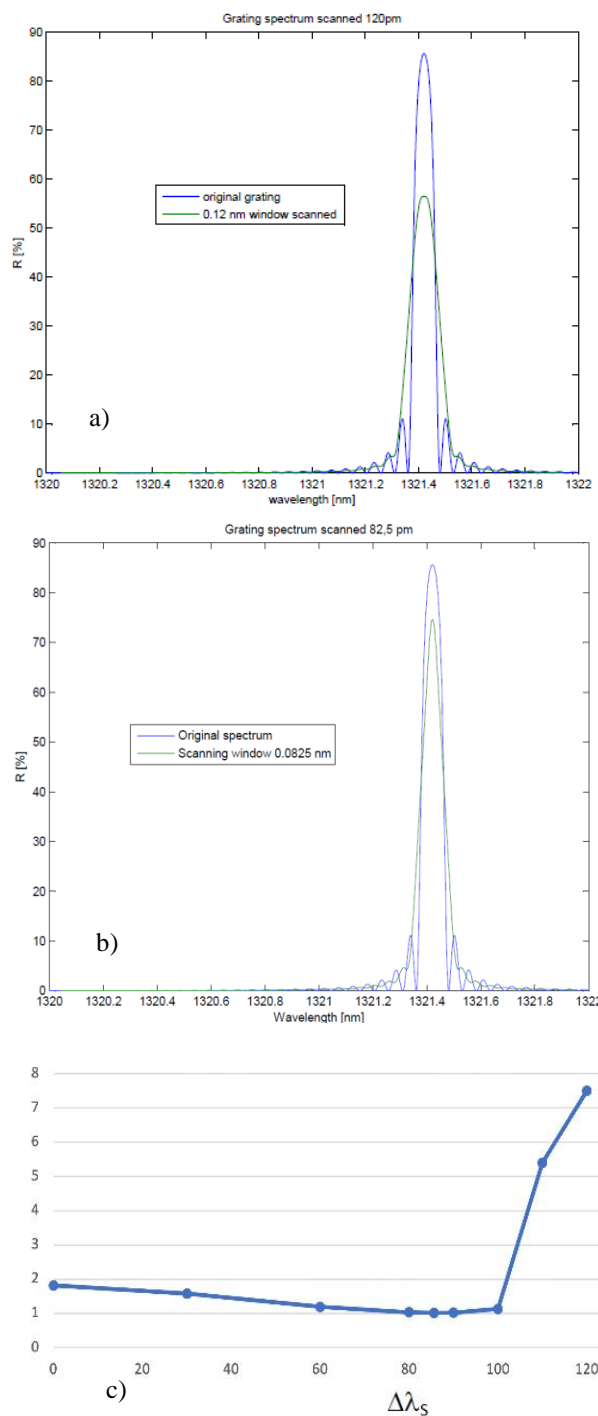


Obr. 3. Signál, šum a chyby měření

tak střední hodnotu nalezeného maxima, která se neodchyluje od originální polohy maxima $R_g(\lambda)$, a určuje RMS hodnotu odchylky detekovaného maxima od jeho střední hodnoty:

$$\sigma = \Delta\lambda_{G=0.0001} / (2 \cdot \sqrt{6}) \quad (2)$$

Jak se ukazuje, šířka spektra skenovacího zdroje může významně ovlivnit tvar detekované časové funkce $I_m(t)$, a tedy i šumovou šířku pásma měření. Výsledky analýzy tohoto faktoru ukazuje obr. 4. Zde jsou vidět rozdíly v průběhu funkcí $I_m(\lambda)$, $R_g(\lambda)$ pro zvolený typický design měřicí mřížky s uniformní



Obr. 4. a) Průběhy $I_m(\lambda)$, $R_g(\lambda)$ pro mřížku s $\Delta\lambda_{GFWHM}=82,5$ pm a skenovací zdroj s $\Delta\lambda_S=120$ pm, b) Průběhy $I_m(\lambda)$, $R_g(\lambda)$ pro mřížku s $\Delta\lambda_{GFWHM}=82,5$ pm a skenovací zdroj s $\Delta\lambda_S=82,5$ pm, c) Šumová šířka pásma měření $\Delta\lambda_{SN}$ [pm] při skenování spektra mřížky s šířkou spektra $\Delta\lambda_{GFWHM}=82,5$ pm a skenovacím zdrojem s šířkou spektra $\Delta\lambda_S$ [pm]

periodickou strukturou modulace indexu lomu s amplitudou $\Delta n = 1,25 \cdot 10^{-4}$ a délkou $L=11$ mm. Mřížka s odrazivostí v maximu $R_{max}=85,6$ %

vykazuje šířku spektra $\Delta\lambda_{\text{GFWHM}} = 82,46 \text{ pm}$. Mřížka sama má šumovou šířku spektra $\Delta\lambda_{\text{GN}} = 1,82 \text{ pm}$. Skenováním této mřížky spektrem zdroje s $\Delta\lambda_{\text{S}} = 120 \text{ pm}$, obr. 4 a), se ukazuje, že dojde k rozšíření sejmuté křivky $I_{\text{m}}(\lambda)$ a k více než trojnásobnému zvýšení šumové šířky pásma měření na hodnotu $\Delta\lambda_{\text{SN}} = 7,4$. Při skenování mřížky velmi úzkým spektrem zdroje s $\Delta\lambda_{\text{S}} \leq 1 \text{ pm}$ je šumová šířka pásma měření shodná s šumovou šířkou spektra měřicí mřížky $\Delta\lambda_{\text{SN}} = \Delta\lambda_{\text{GN}} = 1,82 \text{ pm}$. Pozoruhodná situace nastane v případě skenování měřicí mřížky zdrojem s šířkou spektra shodnou s šířkou spektra mřížky, viz obr. 4 b). Zde dojde ke zúžení sejmuté křivky $I_{\text{m}}(\lambda)$ a k téměř dvojnásobnému snížení šumové šířky pásma měření na hodnotu $\Delta\lambda_{\text{SN}} = 1,19 \text{ pm}$. Průběh šumové šířky pásma měření na skenovací šířce spektra zdroje $\Delta\lambda_{\text{S}}$ ukazuje obr. 4 c). Odtud je zřejmý závěr analýzy, že optimální výsledky v nalezení maxima odrazivosti mřížky skenováním jejího spektra dosáhneme při volbě šířky spektra skenovacího zdroje totožné s šířkou spektra měřicí mřížky $\Delta\lambda_{\text{S}} = \Delta\lambda_{\text{GFWHM}}$. Příjemná suboptimální situace nastane pro skenování úzkospektrálním zdrojem $\Delta\lambda_{\text{S}} \leq \Delta\lambda_{\text{GFWHM}}$. V situaci při skenování zdrojem s širším spektrem než je spektrum měřicí mřížky $\Delta\lambda_{\text{S}} > \Delta\lambda_{\text{GFWHM}}$ dochází k prudkému nárůstu chyb měření.

3. APODIZACE MĚŘÍCÍCH FBG

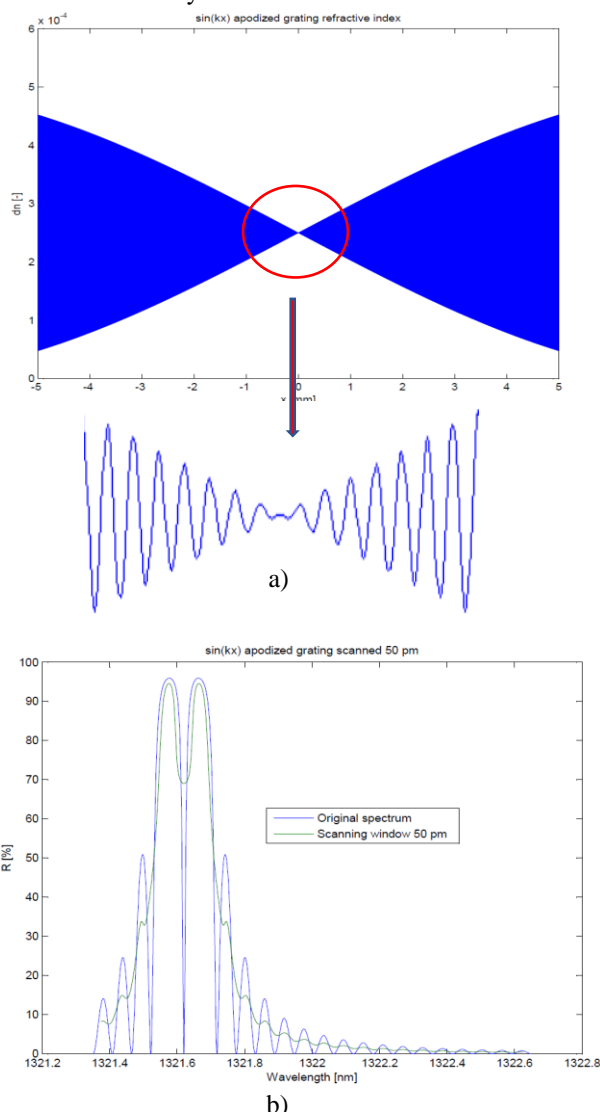
Apodizace Braggových mřížek, neboli technika dosahující proměnnou modulaci indexu lomu v materiálu jádra podél struktury mřížky ve vlákne, je známa pro schopnost upravit spektrální charakteristiku odrazivosti zejména potlačením postranních maxim. Pro tuto svou schopnost je v praxi využívána zejména v přenosových systémech ale i v senzorce. Z rozsáhlého souboru simulací a experimentů jsme došli k závěru, že snaha dosáhnout pomocí apodizace snížení šumové šířky spektra měřicí mřížky $\Delta\lambda_{\text{GN}}$ vede jen k dílčím zlepšením oproti situaci s uniformní mřížkou, a i tak jen za cenu zhoršení potlačení postranních laloků v odrazném spektru.

Apodizační technikou vícenásobné příčné expozice vlákna interferenčním polem fázové mřížky ozářené výkonným UV laserem však lze upravit reflexní spektrum mřížky i jiným směrem. Využitím této techniky je možné dosáhnout vytvoření mřížky s apodizačním profilem indexových změn $\Delta n(x)$:

$$\Delta n(x) = n_c + \Delta n_{\text{ph}}(1 + \sin(A \cdot \pi x / L) \cdot \sin(2\pi x / \Lambda_G)) \quad (3)$$

Tento profil, jak ukazuje obr. 5 a), vykazuje fázový skok $\pi \text{ rad}$ v centrální oblasti mřížky. Díky němu se v reflexním spektru mřížky, viz obr. 5 b), vytvoří velmi ostrý a úzký pokles odrazivosti s minimem

v nulové odrazivosti uprostřed hlavního maxima spektra odrazivosti. Skenováním takovéto mřížky lze určit polohu středu spektra s výrazně vyšší přesností než u neapodizovaných, případně klasicky apodizovaných mřížek. Obrázek obr. 5 b) ukazuje skenovanou funkci $I_{\text{m}}(\lambda)$ při skenování spektrem s $\Delta\lambda_{\text{S}} = 50 \text{ pm}$. Analýza ukazuje, že mřížková šumová šířka spektra detekce centrálního minima ve spektru klesá k hodnotě $\Delta\lambda_{\text{GN}} = 0,063 \text{ pm}$ a šumová šířka pásma měření $\Delta\lambda_{\text{SN}}$ k této hodnotě monotónně klesá se zmenšováním šířky spektra skenovacího zdroje. Pro $\Delta\lambda_{\text{S}} = 1 \text{ pm}$ dosahuje hodnoty $\Delta\lambda_{\text{SN}} = 0,087 \text{ pm}$ a RMS chyby měření $\sigma = 0,016 \text{ pm}$. Tato vynikající hodnota je však vykoupena vyšší složitostí detekce minima uprostřed hlavního laloku maxima odrazivosti mřížky.

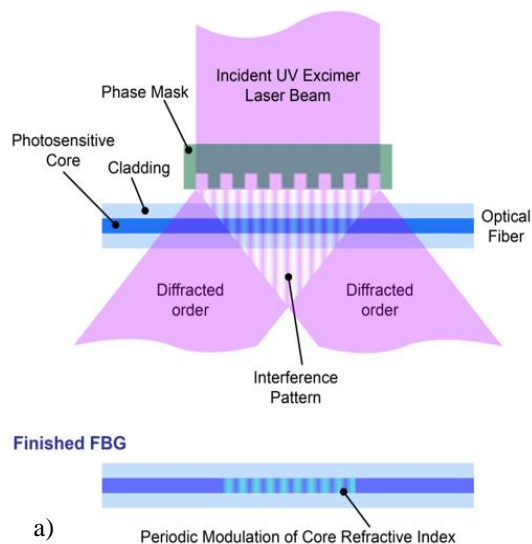


Obr. 5. a) profil $\Delta n(x)$ apodizované mřížky s fázovým skokem, b) spektrum apodizované mřížky s fázovým skokem $R_{\text{g}}(\lambda)$ a detekovaná funkce $I_{\text{m}}(\lambda)$

4. Technologické souvislosti

Výroba uniformních i apodizovaných FBG sestává z řady technologických kroků, které vzájemně, v některých případech i zpětně ovlivňují vlastnosti vyráběné struktury. Pro zápis difrakčních struktur je používán výkonný excimerový UV pulsní laser a expozice pomocí fázové masky metodou bočního osvětlení vlákna. Principiální schéma zápisu mřížky ukazuje obr. 6. a).

Phase Mask FBG Writing Schematic



b)

Obr. 6. Expozice FBG bočním osvětlením vlákna UV laserem přes fázovou masku. a) princip, b) expoziční pracoviště

Expozici předchází a následují další nezbytné technologické kroky. Prvním je zvyšování fotocitlivosti optických vláken v hydrogenačních komorách, tzv. hydrogenace vlákna. Zde je optické vlákno vystaveno dlouhodobému působení plynného

H_2 o vysokém tlaku a vysoké teplotě. Dochází k prosycení SiO_2 skla protony H^+ a vzniku fotocitlivosti. Po expozici UV zářením jsou H^+ centra pevně zabudována do vazeb $Si-O-OH$ a generují změnu indexu lomu. Proces je však ovlivněn vysokými teplotami, které souvisí s technologickými kroky výroby. Odstraňování primární ochrany vláken horkým vzduchem je prvním z nich s výrazně negativním účinkem, neboť předchází expozici a je prováděn po hydrogenaci vlákna. Po expozici je nutná obnova akrylátové, popř. polyimidové primární ochrany vláken. V telekomunikačních aplikacích vláken a FBG je běžnou praxí používání akrylátové primární ochrany vláken tepelně vytvrzovanou vrstvou a poddajnou vrstvou o největším průměru 250 μm . Přesto, že je vytvrzování prováděno v teplotách do 200°C způsobuje pokles indukované modulace indexu lomu ve struktuře mřížky. V senzorických aplikacích je preferována primární ochrana vlákna vrstvou polyimidu. Tato vrstva je tvrdá a houževnatá a vlákno s mřížkou lze přes tuto vrstvu fixovat k podpurným konstrukcím senzorů bez ztráty citlivosti a se spolehlivým zajištěním přenosu mechanických sil z těla senzoru na mřížku. Zde se vytvrzování odehrává při teplotách od 250 do 300°C a devastace struktury mřížky roste. Další dva následné procesy vystavující vyráběnou mřížku vysoké teplotě jsou teplotní stabilizace v termo komoře a kalibrace v teplotních lázních – oba procesy desítky hodin v teplotách 100 – 200°C. Všechny tyto procesy znamenají postupné a nevratné změny struktury mřížky a s tím spojené změny vlastností FBG. Ta méně nepřijemná je snižování maximální odrazivosti mřížek. Závažnější z hlediska apodizace jsou změny profilu mřížky rozdílným průběhem indexu lomu – projevují se změnami tvaru reflexního spektra. Experimentální výzkum v této oblasti nás přivedl k poznání, že degradaci struktury mřížky lze omezit postupným vrstvením polyamidové ochrany v několika krocích s mezilehlým kratším vytvrzením jednotlivých tenkých vrstev. Přičemž výraznou roli v tomto procesu hraje skladba tloušťek nanášených vrstev. K optimalizaci procesu vrstvení polyimidu byly využity struktury mřížek z obr. 5, kde se výrazně projevily teplotně degradační vlivy výrobních kroků. Proces obnovy primární ochrany mřížky polyimidem byl postupně formován až do stavu, kdy jsme schopni rozdělit vrstvení až do pěti postupných kroků s postupným nezávislým vytvrzováním každé vrstvy. Zařízení, které k tomu účelu postupně vzniklo na pracovišti výroby FBG senzorů divize SFO firmy NETWORK GROUP, s.r.o. ukazuje obr. 7.

5. ZÁVĚR



Obr. 7. Technologické zařízení k obnově primární ochrany vláken polyimidem pro průmyslové senzory s FBG

Práce se zabývá souvislostmi návrhu měřících vláknových mřížek pro sensoriku se skenovacím způsobem vyhodnocení spektra měřících mřížek a s technologickými operacemi při přípravě mřížek, s cílem zvýšení přesnosti měření fyzikálních veličin optickými FBG systémy. Posouzením vlivů šumu při vyhodnocovacím procesu jsme stanovili podmínky pro volbu parametrů skenovacího optického zdroje k dosažení optimálního výsledku měření s minimalizací RMS chyb. Možnosti apodizace měřících mřížek nás přivedly ke struktuře apodizačního profilu s centrálním fázovým skokem, která v odrazném spektru vykazuje ostré minimum ve středu hlavního odrazného maxima. Využitím této struktury mřížky ke snímání lze dosáhnout potlačení RMS chyb měření až dvacetinásobně oproti uniformním mřížkám. Tato složitější konstrukce mřížky se však ukázala citlivá na rušivé faktory ve výrobě, které byly lokalizovány převážně v procesu vytvrzování obnovované polyimidové primární ochrany vlákna po expozici mřížky. Nezbytná optimalizace tohoto procesu vedla ke zdokonalení postupu povrstvování obnaženého vlákna polyimidem.

1. LITERATURA

1. J. K. Sahota, N. Gupta, and D. Dhawan, "Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review", *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, no. Vol.59, pp. 1-35, 2020.
2. K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview", *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, no. Vol. 15, pp. 1263 - 1276, 1997.
3. J. M. L. Higuera, L. R. Cobo, A. Q. Incera, and A. Cobo, "Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring", *608 JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, no. Vol. 29, pp. 587 - 608, 2011.
4. H. D. Lee, G. H. Kim, T. J. Eom, M. Y. Jeong, and C. -S. Kim, "Linearized Wavelength Interrogation System of Fiber Bragg Grating Strain Sensor Based on Wavelength-Swept Active Mode Locking Fiber Laser", *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. NO. 12, no. Vol. 33, pp. 2617 - 2622, 2015.
5. L. K. Cheng, W. Vliegenhart, and T. Habisreuther, "Optical Fiber Grating based Technologies and Their Applications: from Nuclear Fusion to Medical".
6. J. P. Carvalho, "Optical Sensing: Fiber Structures and Interrogation Techniques", PHD Thesis, Porto, 2013.
7. Urban jr, R. Helan, F. Urban sr., "Sensoric Fiber Bragg Grating design for scanning interrogation" in *Proceedings of the 8th International Conference on Sensors and Electronic Instrumental Advances SEIA' 2022*, pp. 38-44, 2022.