

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

Abstract of PhD Thesis

**ÚJ TÍPUSÚ SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐK FEJLESZTÉSE
ÉS ALKALMAZÁSA A NAGYENERGIÁS FIZIKÁBAN**

**DEVELOPMENT OF NOVEL FIBER OPTIC SENSORS
AND THEIR APPLICATION
IN HIGH-ENERGY PHYSICS**

Makovec Alajos

Témavezető/Supervisor: Dr. Molnár József



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

UNIVERSITY OF DEBRECEN
PhD School in Physics

Debrecen, 2017

Készült
a Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Magfizika programja keretében
az MTA Atommagkutató intézetben

Prepared at
the University of Debrecen
PhD School in Physics,
and the Institute for Nuclear Research,
Hungarian Academy of Sciences

1. ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

1.1 FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése

A CERN Kompakt Müon Szolenoid detektorának (Compact Muon Solenoid, CMS) legbelső eleme a nyomkövető detektor, amit élettartama növelése érdekében hűtenek. Ez azonban a levegő páratartalmának lecsapódásához, így a nehezen hozzáférhető és drága elektronikus alkatrészek meghibásodásához vezet. Egy ilyen esemény percek alatt nagy károkat okozhatna, amelyek kijavítása a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) leállítását és a CMS szétnyitását tenné szükségessé, ami több évre vetné vissza a nagyenergiás fizikai kutatásokat. Ennek elkerülése érdekében a detektor belső részét hermetikusan lezárják, így ott az alacsony páratartalom biztosított. A nyomkövető detektort körülvevő térrészben ugyanakkor erre nincs lehetőség, így ott fontos a hőmérséklet (T) és a relatív páratartalom (RH) folyamatos mérése. Erre a célra a kereskedelemben kapható érzékelők nem alkalmasak, mert azok nem sugárzásállóak és csak elenyésző hányaduk képes elviselni a 3,8 T erősségű mágneses teret.

A relatív páratartalom és a hőmérséklet mérésére csoportunk két FBG-alapú érzékelőből álló kombinált szenzor (thermo-hygrometer) fejlesztését tűzte ki célul. Az FBG-alapú szenzorok kis méretűek, könnyűek, érzéketlenek az elektromágneses interferenciákra, időtállóak és széles hőmérsékleti tartományban alkalmazhatók. A páratartalom-érzékelő egy poliidimid bevonattal ellátott Bragg-rács. Ennek az eszköznek a választ a relatív páratartalom- és a hőmérsékletváltozás hatására az irodalom a két hatás lineáris szuperpozíciójaként írja le. Emiatt

szükséges volt egy, a páratartalom-érzékelővel termikus kontaktusban elhelyezett FBG-alapú hőmérő alkalmazására is, amellyel a korrekciós tag meghatározható

A várható nagyintenzitású sugárzási környezet hosszantartó hatásának felderítése érdekében vizsgáltuk az FBG-alapú páratartalom-érzékelők és FBG-alapú hőmérők sugárzásállóságát. Célul tűztem ki emellett az FBG-alapú érzékelők által szolgáltatott adatok analízisének megtervezését és az ehhez szükséges szoftverek elkészítését. Az összesen 160 db szenzor kalibrációja időigényes feladatnak ígérkezett, ezért terveim között szerepelt a mérési adatok automatizált feldolgozását lehetővé tevő programcsomag megírása is.

1.2 LPG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése

Különböző részecskék alkotta sugárzási háttér jelenlétében, vagy nagy mágneses tér esetén az FBG-alapú szenzorok jó alternatívát jelentenek az elektronikus érzékelőkkel szemben. Ugyanakkor a páratartalomra vonatkozó érzékenyséjük, S_{RH} rendszerint 1,0-1,5 pm/%, ami egy nagyságrenddel kisebb, mint a hőmérsékletre vonatkozó érzékenyséjük (S_T), melynek jellemző értéke hozzávetőlegesen 10 pm/°C. Az FBG-alapú páratartalom-érzékelőknél ezért elengedhetetlen a párhuzamos és pontos hőmérsékletmérés. Ennek feloldására csoportunk egy önállóan is alkalmazható száloptikai páratartalom-érzékelő fejlesztését tűzte ki célul. Ez megvalósítható az S_{RH} több nagyságrenddel történő növelése mellett. Ehhez vizsgáltuk ~100 nm-es titán-dioxid (TiO_2) és ~300 nm-es ón-dioxid (SnO_2) bevonattal ellátott hosszú periódusú száloptikai ráccsal (Long Period Fiber Grating, LPG) készült érzékelők tulajdonságait. A titán-dioxidot nedvességre érzékeny bevonatként elsőként

csoportunk alkalmazta nagy érzékenységű száloptikai páratartalom-érzékelők esetén.

1.3 LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálata

Bár az irodalomban találtunk információt bevonat nélküli LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatairól, LPG-alapú páratartalom-érzékelők érzékenységének dózisfüggését elsőként csoportunk vizsgálta [PhDJ03]. Célunk volt a sugárzásállósági tesztek az MTA Atomki ^{60}Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásával (a továbbiakban forrás) elvégezni, mivel az ott rendelkezésre álló infrastruktúra segítségével lehetőség nyílik a szenzorok besugárzás alatti online kiolvasására. Ez az ionizáló sugárzás LPG-alapú érzékelőkre gyakorolt hatásának olyan tanulmányozását teszi lehetővé, amely az irodalomban példa nélküli.

Az előzetes számítások megmutatták, hogy a szükséges nagy dózisok (több száz kGy) belátható időn belüli eléréséhez az optikai szálakat a fenti forrástól kevesebb, mint 30 centiméterre kell elhelyezni. Ez megkövetelte a besugárzások szimulációval támogatott tervezését, amelyhez a FLUKA Monte Carlo szimulációs programcsomagot kívántam felhasználni.

2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

2.1 FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése

A speciálisan a CMS-ben történő mérésekhez tervezett és gyártott FBG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseit klímakamrában végeztük el CERN-ben 0 és 60% közötti relatív páratartalom-tartományon. Méréseinkkel először mutattuk ki, hogy az irodalom által használt lineáris összefüggés nem írja le

pontosan a poliimid bevonattal ellátott FBG-alapú páratartalom-mérők viselkedését. A szenzorok relatív páratartalomra és hőmérsékletre vonatkozó érzékenységei ugyanis keresztfüggést mutattak, rendre $S_{RH}(T)$ és $S_T(RH)$.

1. TÉZISPONT

A csoportunk által fejlesztett, poliimid bevonattal készült FBG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációjához kidolgoztam egy modellt. Az irodalomban használt lineáris megközelítés helyett ez a módszer figyelembe veszi, hogy az FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén a hőmérsékletre vonatkozó érzékenység (S_T) függ a relatív páratartalomtól és azt is, hogy a relatív páratartalomra vonatkozó érzékenység (S_{RH}) pedig a hőmérséklet függvénye. A lineáris összefüggés alkalmazásához viszonyítva a modell segítségével a fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők mérési bizonytalanságát közel egy nagyságrenddel, $\pm 18,0\%$ -ról $\pm 2,5\%$ -ra csökkentettem. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

Az FBG-alapú kombinált szenzorok sugárzásállóságát ^{60}Co radioizotóp által kibocsájtott gamma fotonokkal vizsgáltuk 210 kGy elnyelt dózisig. Az eredmények szerint a vizsgált érzékelők kalibrációja érvényben marad, ha azokat az ionizáló sugárzás hatására bekövetkező hullámhossz-növekedésre korrigáljuk. A vizsgálatok rámutattak, hogy a teljes elnyelt dózis növekedésével az érzékelők további elnyelt dózisa vonatkozó érzékenysége csökken, ezért csoportunk a felhasznált FBG-alapú érzékelők előzetes besugárzása mellett döntött ($D_{TOT} = 210 \text{ kGy}$).

2. TÉZISPONT

Elkészítettem a csoportunk által használt offline adatgyűjtő és kalibrációs szoftvercsomagot. A fejlesztett FBG-alapú kombinált

szenzorok kalibrációját korrigálni kell az érzékelőkön az előzetes besugárzás következtében jelentkező hullámhossz-eltolódások értékére. A kalibrációs mérések újbóli elvégzésére a szűkös időkeret miatt nem volt lehetőség. Az általam írt szoftvercsomag azonban lehetővé tette a CMS-be telepített FBG-alapú érzékelők és független csoportok, ideiglenesen üzemelő érzékelői (számunkra referencia) által mért adatok egyszerű, automatizált összevetését. A szoftverek segítségével a szükséges korrekciókat így a telepítést követően is meghatározhattuk még az LHC első hosszú leállása során gyűjtött adatok alapján. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

Összesen 72 darab FBG-alapú kombinált szenzort telepítettünk a CMS-be. A mérési eredményeket a CMS Detektor Szabályozó Rendszerébe (CMS Detector Control System, CMS-DSC) feltöltve tesszük elérhetővé. Az FBG-alapú hőmérők és páratartalom-érzékelők által szolgáltatott adatok jó egyezést mutatnak a CMS-be telepített egyéb mérőműszerek által mért értékekkel [PhDJ01].

2.2 LPG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése

A fejlesztett, LPG-alapú érzékelők kalibrációs méréseit CERN-ben végeztük el. Az előzetes mérések felfedték, hogy a vizsgált LPG-alapú szenzorok rezonancia-völgyeinek nem csak a hullámhossz tengelyen elfoglalt helyzete, de azok félértékszélessége és alakja (szimmetria tulajdonság, mélység) is függ a relatív páratartalomtól és a hőmérséklettől. Az FBG-spektrumoknál használt jelfeldolgozó algoritmus emiatt nem alkalmas az LPG-alapú érzékelők vizsgálatára. A mérések elvégzéséhez ezért előbb egy olyan matematikai módszert kellett kidolgozni, amely a mért rezonancia-völgy alakjától függetlenül képes a Bragg-hullámhossz meghatározására.

3. TÉZISPONT

Négy eltérő matematikai módszert dolgoztam ki az LPG-alapú érzékelők átviteli spektrumán mért rezonancia-völgyek értelmezésére. Az FBG-spektrumoknál általánosan alkalmazott csúcskereső algoritmus a rezonancia-völgy alakjának páratartalom- és hőmérsékletfüggése miatt nem alkalmazható az LPG-alapú érzékelőknél. A kidolgozott módszerek mindegyike alkalmas az LPG-spektrumok értelmezésére és gyors, automatizálható jelfeldolgozást tesz lehetővé. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

4. TÉZISPONT

Vizsgáltam a kidolgozott matematikai módszerek pontosságát: azt, hogy az egyes eljárásokhoz tartozó kalibrációk közül melyik az, amelyik a legkisebb mérési bizonytalanságot adja. Igazoltam, hogy a legjobb eredményt a Tömegközéppont (Rel. Küszöb: ConCon)-módszer (részletes leírása található a doktori értekezés 4.2 alfejezetében) szolgáltatja. Ez a spektrum numerikus deriváltját használja (FFT-simítást követően) a rezonancia-völgy hasznos részének beazonosítására, aminek a tömegközéppontja adja a mért hullámhosszat. Az eljárás jelentősen csökkenti a spektrumon mért zaj hatását. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08]

Az LPG-alapú szenzorok átviteli spektrumához általam írt jelfeldolgozó algoritmus lehetővé tette a TiO_2 és SnO_2 bevonattal ellátott páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseinek elvégzését [PhDP02]. Az eredmények igazolták, hogy mind a két vizsgált anyag alkalmazható hosszú periódusú száloptikai rácsokhoz nedvességre érzékeny bevonatként. A titán-dioxid ugyanakkor nagyobb páratartalomra vonatkozó érzékenységet biztosít, mint az ón-dioxid [PhDJ04]. Minél nagyobb az S_{RH} értéke, annál kevésbé szükséges a mért hullámhossz-eltolódás hőmérsékleti tagjára

korrigálni. Az önállóan is alkalmazható LPG-alapú páratartalom-érzékelőkhöz ezért csoportunk a TiO_2 -ot választotta a sorozatgyártásban készülő szenzorok bevonatául.

2.3 LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálata

5. TÉZISPONT

Elkészítettem az MTA Atomki ^{60}Co forrásának és a besugárzó helyiségnek egy nagy pontosságú geometriai modelljét. Ez a modell input fájlként használható FLUKA-szimulációk során, amelyekkel (többek között) a fejlesztett LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatai tervezhetők. A modell segítségével előzetes szimulációkat futtattam és ezek eredményeit felhasználva megterveztem az LPG-alapú érzékelők besugárzásához használható, alumínium mintatartót. A terveknek megfelelően ebből egy készült el. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

6. TÉZISPONT

Hitelesítettem az MTA Atomki ^{60}Co forrását és a besugárzó helyiséget magában foglaló geometriai modellt. Ehhez a FLUKA-szimulációkból származó dózisteljesítmény-bebecsléseket dozimetriai mérések eredményeivel vetettem össze. Összesen két méréssorozatot végeztem, amelyek során 12 db FWT-60-00-típusú filmdozimétert használtam fel. A filmek kiértékelése CERN-ben történt. A mérési eredmények jó egyezést mutattak a szimulációkból származó bebecslésekkel, emellett igazolták a részletes geometriai modell alkalmazásának fontosságát a vizsgált 25,5 – 41,0 cm forrás-minta távolságokon. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

3. MOTIVATIONS

3.1 Development of FBG Sensors for Relative Humidity Measurements

The Silicon Tracker is the innermost layer of the Compact Muon Solenoid (CMS) detector built on the Large Hadron Collider (LHC) at the European Organization for Nuclear Research (CERN). To increase its lifetime the Tracker must be kept cold during its operation. This, however, could lead to the condensation of humidity resulting in the failure of almost inaccessible and expensive electronic components. Such an event could cause great damages in minutes, the correction of that would require the shutdown of the LHC and the opening of the CMS, which would set back High Energy Physics (HEP) research for several years. In order to avoid the condensation of water molecules, the Silicon Tracker is hermetically sealed thus low humidity is ensured inside. However, this solution is not available in the area around the Tracker where, therefore, the continuous monitoring of Temperature (T) and Relative Humidity (RH) is vital. For this purpose, commercially available sensors are not suitable, because they are not radiation-hardened and only a small number of sensors can operate in a magnetic field of 3.8 T.

Our group decided to develop a thermo-hygrometer consisting of two Fiber Bragg Grating (FBG) sensors to measure Relative Humidity and Temperature inside the CMS. FBG sensors are small, lightweight, insensitive to electromagnetic interference and can be used in a wide temperature range. In case of the FBG humidity sensors polyimide is applied as moisture-sensitive coating. Literature gives the response of such a sensor as linear

superposition of the effects of relative humidity and temperature. Therefore, it was necessary to use an additional FBG thermometer placed in thermal contact with the humidity sensor to determine the temperature contribution of the measurement.

In order to study the long-term effects of high intensity radiation environment, the radiation hardness capabilities of FBG humidity sensors and FBG thermometers were investigated. I also planned to participate in the analysis of data provided by FBG sensors and to produce the necessary software. The calibration of a total of 160 sensors was expected to be a time-consuming task, therefore my plan included to write a software package for automated processing of the collected data.

3.2 Development of LPG Sensors for Relative Humidity Measurements

FBG sensors are good alternatives to electronic devices in radioactive environments or in presence of a high intensity magnetic field. However, the sensitivity to relative humidity (S_{RH}) of FBG humidity sensors is typically 1.0 - 1.5 pm/%, which is an order of magnitude less than their sensitivity to temperature (S_T), with a typical value of 10 pm/°C. For this reason, applying an FBG humidity sensor requires an accurate and parallel measurement of temperature too. To avoid the need for an additional sensor, our group started to develop a fiber optic sensor capable of measuring relative humidity by itself. Such a sensor can be realized by increasing S_{RH} significantly. For this purpose, we studied the measurement capabilities of Long Period Fiber Grating (LPG) sensors with ~100 nm titanium dioxide (TiO₂) and with ~300 nm thin tin dioxide (SnO₂) overlay. TiO₂ was first used by our group

as moisture-sensitive coating for high sensitivity fiber optic humidity sensors.

3.3 Radiation Hardness Investigation of LPG-based Sensors

Although in the literature we found information on radiation hardness study for uncoated LPG sensors, the dose dependence of S_{RH} of LPG humidity sensors was first investigated by our group [PhDJ03]. Our goal was to carry out the radiation hardness investigation of LPG sensors using the high intensity ^{60}Co source of MTA Atomki (hereinafter referred to as source), because the infrastructure available there enables the online readout of sensors during their irradiations. This allows studying the effect of ionizing radiation on LPG sensors that is unprecedented in the literature.

Preliminary calculations have shown that the fiber optic sensors should be positioned less than 30 centimeters from the above mentioned source to reach the required high doses (hundreds of kGy) within reasonable time. This required the use of simulations to design the irradiation campaigns to which I planned to use the FLUKA multi-particle transport code.

4. NEW SCIENTIFIC RESULTS

4.1 Development of FBG Sensors for Relative Humidity Measurements

Calibration measurements of the FBG humidity sensors designed and manufactured specifically for CMS were carried out in a climate chamber at CERN in the range of 0 to 60% relative humidity. Our measurements pointed out that the linear approximation used by the literature is not suitable to describe the

behaviour of the polyimide coated FBG humidity sensors, because their sensitivity to relative humidity and temperature were cross-linked, $S_{RH}(T)$ and $S_T(RH)$ respectively.

THESIS POINT 1

I have developed a model for the calibration of polyimide coated FBG sensors. Instead of the linear approach used in the literature, this method takes into account that the temperature sensitivity (S_T) of the FBG humidity sensors depends on relative humidity and also that the sensitivity to relative humidity (S_{RH}) is a function of temperature. Compared to the application of the linear approach, my model reduced the measurement uncertainty of the developed FBG humidity sensors by nearly one order of magnitude, from $\pm 18.0\%$ to $\pm 2.5\%$. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

The radiation induced change of the RH sensitivity of the developed FBG thermo-hygrometers was tested with gamma photons emitted by ^{60}Co radioisotope up to 210 kGy absorbed dose. According to the results, calibrations of the tested sensors remain valid if they are corrected for the wavelength shifts induced by ionizing radiation. The studies showed that the radiation induced change of the RH sensitivity of the sensors to further absorbed doses decreases with the increase of the total dose already absorbed. Therefore our group decided to pre-irradiate all the FBG sensors ($D_{TOT} = 210$ kGy).

THESIS POINT 2

I have developed the offline data acquisition and calibration software package used by our group. The calibration of the developed FBG thermo-hygrometers must be corrected for the wavelength shifts occurred due to the prior irradiation of the sensors. The calibration measurements, however, could not be

repeated due to the tight time frame. My software package allowed a simple and automated comparison of the data measured by our FBG sensors with the data measured by other devices (reference) installed in the CMS and operated by independent groups. With the help of these programs, the necessary corrections could be determined after installation of the sensors using the data collected during the first long shutdown of LHC. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

We have installed a total of 72 FBG thermo-hygrometers in CMS. The collected data are published by uploading them to the CMS Detector Control System (CMS-DSC). The data provided by FBG sensors show good agreement with the values measured by other devices installed in CMS [PhDJ01].

4.2 Development of LPG Sensors for Relative Humidity Measurements

Calibration measurements of the developed LPG sensors were carried out at CERN. Preliminary results of these tests have revealed that not only the position of the resonance valleys (attenuation bands), but also their FWHM (Full-Width Half-Maximum) values and shapes (symmetry, depth) depend on the relative humidity and temperature. The signal processing algorithm commonly used for FBG spectra is therefore not suitable for testing LPG sensors. To carry out the measurements, it was necessary first to develop a mathematical method capable of determining a Bragg wavelength for each measured resonance valley independently of their shapes.

THESIS POINT 3

I developed four different methods (valley-finder algorithms) for processing the measured transmission spectra of LPG sensors. The

peak-finder algorithm commonly used for FBG spectra cannot be applied to LPG sensors because of the humidity and temperature dependence of their response. All of the developed methods allow fast, automated signal processing of LPG spectra. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

THESIS POINT 4

I analyzed the accuracy of the developed methods in order to identify the one which gives the smallest measurement uncertainty. I verified that the best result corresponds to the method called Center of Mass (Rel. Threshold: ConCon) (detailed description can be found in subsection 4.2 of the PhD thesis). This uses the numeric derivative of the spectrum (after FFT smoothing) to identify the relevant part of the resonance valley. The Bragg wavelength is then calculated based on the center of mass of this relevant part. The method significantly reduces the effect of noise observed on the spectra. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

The calibration measurements of the LPG sensors coated with TiO₂ and SnO₂ were carried out using the developed signal processing algorithm [PhDP02]. The results demonstrated that both of the test materials could be used for LPG sensors as moisture-sensitive coating. However, titanium dioxide provides a higher sensitivity to humidity than tin dioxide [PhDJ04]. The higher the value of S_{RH} , the smaller is the relative effect of the temperature contribution to the measurement. Therefore, our group chose TiO₂ as material of the coating for the LPG sensors.

4.3 Radiation Hardness Investigation of LPG-based Sensors

THESIS POINT 5

I have created a high-precision geometry model of the high intensity ⁶⁰Co source of MTA Atomki and the irradiation vault. This

model can be used as an input file for Monte Carlo simulations via the FLUKA code, which can be used for planning the radiation hardness tests of LPG sensors, for instance. I designed an aluminium sample holder for the irradiation tests of LPG sensors based on the results of the FLUKA simulations I performed using the above mentioned model. The sample holder was manufactured according to the design. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

THESIS POINT 6

I validated the geometry model of the irradiation facility with the high intensity ^{60}Co source of MTA Atomki via comparing the dose rates predicted by the FLUKA simulations and the results of dosimetry measurements. Two series of measurements were performed using twelve FWT-60-00 dosimetric films. The films were evaluated at CERN. The measured doses were in a good agreement with the predicted values I obtained from FLUKA simulations. The results also demonstrated the importance of applying a detailed geometry model in the FLUKA simulations for the cases when the samples were irradiated at the sample to source distances between 25.5 and 41.0 cm. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

5. A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ KÖZLEMÉNYEK / PUBLICATIONS RELATED TO THE PHD THESIS

- [PhDJ01] BERRUTI G. M., PETAGNA P., BUONTEMPO S.,
IF:1.31 MAKOVEC A., SZILLASI Z., BENI N.,
(2015) CONSALES M., A. CUSANO (2016): One year of
FBG-based thermo-hygrometers in operation in the
CMS experiment at CERN, *SCI Journal of
Instrumentation*, 11 (3), P03007
- [PhDJ02] MAKOVEC A., BERRUTI G., CONSALES M.,
IF: 1.399 GIORDANO M., PETAGNA P., BUONTEMPO S.,
BREGGIO G., SZILLASI Z., BENI B., CUSANO A.
(2014): Radiation hard polyimide-coated FBG
optical sensors for relative humidity monitoring in
the CMS experiment at CERN, *Journal of
Instrumentation*, 9 (3), 3040 p.
- [PhDJ03] CONSALES M., BERRUTI G., BORRIELLO A.,
IF: 3.292 GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGGIO G.,
MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A.
(2014): Nanoscale TiO₂-coated LPGs as
radiation-tolerant humidity sensors for high-energy
physics applications, *Optics Letters*, 39 (14), 4128-
4131 pp.
- [PhDJ04] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A.,
IF: 2.209 GIORDANO M., BUONTEMPO S., MAKOVEC
A., BREGGIO G., PETAGNA P., CUSANO A.
(2014): A Comparative Study of Radiation-Tolerant
Fiber Optic Sensors for Relative Humidity
Monitoring in High-Radiation Environments at
CERN, *IEEE Photonics Journal*, 6 (6), 0601015 p.
- [PhDP01] BERRUTI G., CONSALES M., GIORDANO M.,
IF: - BUONTEMPO S., BREGGIO G., MAKOVEC A.,
PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Radiation

tolerant FBG thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *IEEE Proceedings. New York*, 0, 3 p.

[PhDP02] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A.,
IF: - GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G.,
MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A.
(2014): Radiation tolerant humidity sensors based on nano-scale TiO₂-coated LPGs for high-energy physics applications, *IEEE Proceedings. New York*, 0, 3 p.

[PhDP03] BERRUTI G., CONSALES M., CUSANO A.,
IF: - PETAGNA P., BORRIELLO A., GIORDANO M.,
BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A.
(2014): Fiber optic sensors for relative humidity monitoring in high energy physics applications, *IEEE Proceedings. New York*, 0, 4 p.

[PhDP04] BERRUTI G., CONSALES M., CUTOLO A.,
IF: - CUSANO A., BREGLIO G., BUONTEMPO S.,
GIORDANO M., MAKOVEC A. (2014): Radiation tolerant fiber optic thermos-hygrometers for aerospace applications, *IEEE Proceedings. New York*, 0, 610-615 pp.

[PhDP05] BERRUTI G., CONSALES M., GIORDANO M.,
IF: - BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A.,
PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Radiation hard fiber optic thermos-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *Proc. SPIE 9157*, 91579H p.

[PhDP06] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A.,
IF: - GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G.,
MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A.
(2014): High-sensitivity humidity sensors based on TiO₂-coated long period fiber grating for high-energy physics applications, *Proc. SPIE 9157*, 91573M p.

- [PhDP07] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A.,
IF: - GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G.,
 MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A.
 (2014): Radiation tolerant fiber optic humidity
 sensors for high energy physics applications, *Le
 Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs,
 Franck. EWSHM*, 1465-1472 pp.
- [PhDP08] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A.,
IF: - GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G.,
 MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A.
 (2014): High-sensitivity metal oxides-coated long-
 period fiber grating sensors for humidity monitoring
 in high-energy physics applications, *Proc. SPIE
 9141*, 914114 p.

6. A DOKTORI ÉRTEKEZÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ KONFERENCIA ELŐADÁSOK / TALKS RELATED TO THE PHD THESIS

- [PhDC01] MAKOVEC A., BERRUTI G., PETAGNA P.,
 SZILLASI Z., BENI N. et al. (2013): Radiation hard
 polyimide-coated FBG optical sensors for relative
 humidity monitoring in the CMS experiment at CERN,
*Siena, Italy: 13th Topical Seminar on Innovative
 Particle and Radiation Detectors.*
- [PhDC02] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation
 tolerant FBG thermo-hygrometers for relative humidity
 detection in the CMS experiment at CERN, *Trani, Italy:
 3rd Mediterranean Photonics Conference.*
- [PhDC03] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation
 tolerant humidity sensors based on nano-scale
 TiO₂-coated LPGs for high-energy physics
 applications, *Trani, Italy: 3rd Mediterranean Photonics
 Conference.*

- [PhDC04] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Fiber optic sensors for relative humidity monitoring in high energy physics applications, *Naples, Italy: 2014 Fotonica AEIT - Italian Conference on Photonics Technologies*.
- [PhDC05] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation tolerant fiber optic thermos-hygrometers for aerospace applications, *Benevento, Italy: IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace*.
- [PhDC06] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation hard fiber optic thermos-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *Santander, Spain: 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*.
- [PhDC07] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): High-sensitivity humidity sensors based on TiO₂-coated long period fiber grating for high-energy physics applications, *Santander, Spain: 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*.
- [PhDC08] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation tolerant fiber optic humidity sensors for high energy physics applications, *Nantes, France: 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*.
- [PhDC09] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): High-sensitivity metal oxides-coated long-period fiber grating sensors for humidity monitoring in high-energy physics applications, *Brussels, Belgium: SPIE Photonics Europe*.



Nyilvántartási szám: DEENK/149/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Makovec Alajos
Neptun kód: FS6Z8N
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10027717

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

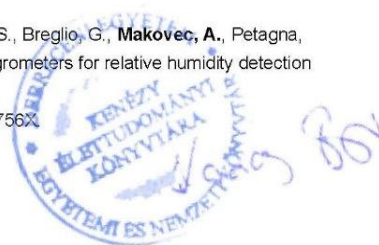
Idegen nyelvű, külföldi könyvrészletek (5)

1. Berruti, G. M., Consales, M., Cusano, A., Petagna, P., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**: Fiber optic sensors for relative humidity monitoring in High Energy Physics applications.
In: 2014 Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies Naples, Italy, May 12-14, 2014, IEEE, Piscataway, 1-4, 2014. ISBN: 9788887237177
2. Berruti, G. M., Consales, M., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: Radiation tolerant FBG thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN.
In: 2014 Third Mediterranean Photonics Conference, May 7th-9th 2014 Trani (Italy), IEEE, Piscataway, 1-3, 2014. ISBN: 9781479948185(electronic)
3. Berruti, G. M., Consales, M., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: Radiation tolerant fiber optic humidity sensors for high energy physics applications.
In: 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2014) : full papers : Nantes, France, 8-11 July 2014. Eds.: Vincent Le Cam, Laurent Mevel, Franck Schoefs, Curran Associates, Red Hook, NY, 1465-1472, 2014.
4. Berruti, G. M., Consales, M., Cutolo, A., Cusano, A., Breglio, G., Buontempo, S., Giordano, M., **Makovec, A.**: Radiation tolerant fiber optic thermo-hygrometers for aerospace applications.
In: 2014 IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace, May 29-30, 2014, Benevento, Italy : Proceedings, IEEE, Danvers, 610-615, 2014. ISBN: 9781479920693
5. Berruti, G. M., Consales, M., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: Radiation tolerant humidity sensors based on nano-scale TiO₂-coated LPGs for high-energy physics applications.
In: 2014 Third Mediterranean Photonics Conference, May 7th-9th 2014 Trani (Italy), IEEE, Piscataway, 1-3, 2014. ISBN: 9781479948185



Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (7)

6. Berruti, G. M., Petagna, P., Buontempo, S., **Makovec, A.**, Szillási, Z., Béni, N. T., Consales, M., Cusano, A.: One year of FBG-based thermo-hygrometers in operation in the CMS experiment at CERN.
J. Instrum. **11** (3), P03007 (1-17), 2016. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03007>
IF: 1.31 (2015)
7. Berruti, G. M., Consales, M., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., **Makovec, A.**, Breglio, G., Petagna, P., Cusano, A.: A comparative study of radiation-tolerant fiber optic sensors for relative humidity monitoring in high-radiation environments at CERN.
IEEE Photonics J. **6** (6), 0601015 (1-15), 2014. EISSN: 1943-0655.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2357433>
IF: 2.209
8. Berruti, G. M., Consales, M., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: High-sensitivity humidity sensors based on TiO₂-coated long period fiber grating for high-energy physics applications.
Proc. SPIE. **9157**, 91573M (1-4), 2014. ISSN: 1996-756X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2059561>
9. Berruti, G. M., Consales, M., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: High-sensitivity metal oxides-coated long-period fiber grating sensors for humidity monitoring in high-energy physics applications.
Proc. SPIE. **9141**, 1-9, 2014. ISSN: 1996-756X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2053019>
10. Consales, M., Berruti, G. M., Borriello, A., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: Nanoscale TiO₂-coated LPGs as radiation-tolerant humidity sensors for high-energy physics applications.
Opt. Lett. **39** (14), 4128-4131, 2014. ISSN: 0146-9592.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.004128>
IF: 3.292
11. Berruti, G. M., Consales, M., Giordano, M., Buontempo, S., Breglio, G., **Makovec, A.**, Petagna, P., Cusano, A.: Radiation hard fiber optic thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN.
Proc. SPIE. **9157**, 91573M (1-4), 2014. ISSN: 1996-756X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2059519>





12. **Makovec, A.**, Berruti, G. M., Consales, M., Giordano, M., Petagna, P., Buontempo, S., Breglio, G., Szillási, Z., Béni, N. T., Cusano, A.: Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN.
J. Instrum. 9 (03), C03040 (1-10), 2014. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/03/C03040>
IF: 1.399

További közlemények

Idegen nyelvű közlemények hazai folyóiratban (1)

13. **Makovec, A.**, Szillási, Z., Béni, N. T., Molnár, J., Esposito, M., Buontempo, S., Cusano, A., Oetriccione, A., Zarrelli, M., Breglio, G., Saccomanno, A., Giordano, M., Chiuchiolo, A.: Cryogenic temperature measurement using epoxy and PMMA coated fiber bragg grating sensors.
Acta phys. Debr. 46, 97-106, 2012. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű közlemények külföldi folyóiratban (7)

14. Khachatryan, V., **The CMS Collaboration**: A search for pair production of new light bosons decaying into muons.
Phys. Lett. B. 752, 146-148, 2016. ISSN: 0370-2693.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2015.10.067>
15. Khachatryan, V., **The CMS Collaboration**: Search for exotic decays of a Higgs boson into undetectable particles and one or more photons.
Phys. Lett. B. 753, 363-388, 2016. ISSN: 0370-2693.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2015.12.017>
16. Khachatryan, V., **The CMS Collaboration**: Search for new phenomena in monophoton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV.
Phys. Lett. B. 755, 102-124, 2016. ISSN: 0370-2693.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2016.01.057>
17. Esposito, M., Buontempo, S., Petriccione, A., Zarrelli, M., Breglio, G., Saccomanno, A., Szillási, Z., **Makovec, A.**, Cusano, A., Chiuchiolo, A., Bajkó, M., Giordano, M.: Fiber Bragg Grating sensors to measure the coefficient of thermal expansion of polymers at cryogenic temperatures.
Sens. Actuator A-Phys. 189, 195-203, 2013. ISSN: 0924-4247
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.09.016>
IF: 1.943



18. **Makovec, A.**, Erdélyi, G., Beke, D. L.: Grain boundary diffusion in thin films with a bimodal grain boundary structure.
Thin Solid Films. 520 (6), 2362-2367, 2012. ISSN: 0040-6090.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.11.013>
IF: 1.604
19. Lakatos, Á., Erdélyi, G., **Makovec, A.**, Langer, G. A., Csik, A., Vad, K., Beke, D. L.: Investigation of diffusional intermixing in Si/Co/Ta system by Secondary Neutral Mass Spectrometry.
Vacuum. 86 (6), 724-728, 2012. ISSN: 0042-207X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.07.017>
IF: 1.53
20. Beke, D. L., Lakatos, Á., Erdélyi, G., **Makovec, A.**, Langer, G. A., Daróczi, L., Vad, K., Csik, A.: Investigation of grain boundary diffusion in thin films by SNMS technique.
Defect Diffus. Forum. 312-315, 1208-1215, 2011. ISSN: 1012-0386.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.1208>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 13,287

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 8,21

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2017.05.23.

