

Autoreferat

dr inż. Paweł Wierzba
POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
pawel.wierzba@eti.pg.edu.pl

Gdańsk 2018

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko:

Paweł Wierzba

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

20.11.2001 r.	Doktor nauk technicznych w zakresie Elektroniki nadany uchwałą Rady Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej za pracę pt. „ <i>Światłowodowe polarymetryczne sensory światłowodowe do pomiaru parametrów ruchu drogowego</i> ”, wyróżnioną uchwałą Rady Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.
14.09.1994 r.	Magister inżynier na kierunku Elektronika i Telekomunikacja, specjalności Aparatura Elektroniczna, Wydział Elektroniki Politechniki Gdańskiej.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

2016 -- obecnie	Starszy wykładowca Katedra Metrologii i Optoelektroniki, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska.
2001 – 2016	Adiunkt Katedra Metrologii i Optoelektroniki, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska.
1998 – 2001	Asystent Katedra Optoelektroniki, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego: Jako „osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowiące znaczący wkład w rozwój określonej dyscypliny naukowej” wskazuję **cykl 11 publikacji** powiązanych tematycznie, pod zbiorczym tytułem:

„Wybrane materiały i rozwiązania w interferometrycznych układach pomiarowych”.

b) Wykaz wybranego cyklu publikacji

1. **Wierzba P.**, Kosmowski B.B., *Accuracy improvement of bulk optical polarization interferometric sensors*, *Optica Applicata*, 2005, 35(1), 171-185; (IF=0,459)
2. **Wierzba P.**, *Ray tracing analysis of uniaxial birefringent optical components*, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5956 (2005) s. 59560N.
3. **Wierzba P.**, Gnyba M., *Modelling of optical components made of liquid crystals and liquid crystalline polymers*, *Journal de Physique IV*, 2006, 137, 175-178; (IF=0,315)
4. **Wierzba P.**, Gnyba M., *Liquid crystalline optical components for application in optical sensing*, *The European Physical Journal - Special Topics*, 2008, 154, 235-238; (IF=0,689)
5. **Wierzba P.**, *Stability of an optical displacement sensor using a two-beam polarization interferometer*, *Metrology and Measurement Systems*, 2008, 15(2), 205-214;
6. **Wierzba P.**, Jędrzejewska-Szczerska M., *Optimization of a Fabry-Perot Sensing Interferometer Design for an Optical Fiber Sensor of Hematocrit Level*, *Acta Physica Polonica A*, 2013, 124(3), 586-588; (IF=0,604)
7. Jędrzejewska-Szczerska M., **Wierzba P.**, Abou Chaaya A., Bechelany M., Miele P., Viter R., Mazikowski A., Karpienko K., Wróbel M., *ALD thin ZnO layer as an active medium in a fiber-optic Fabry-Perot interferometer*, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 221, 88-94; (IF=2,201)
8. **Wierzba P.**, Mazikowski A., *Polarization interferometer using a Liquid Crystalline Polymer waveplate for wavelength measurement*, *Photonics Letters of Poland*, 2015, 7(4), 100-102;
9. Majchrowicz D., Hirsch M., **Wierzba P.**, Bechelany M., Viter R., Jędrzejewska-Szczerska M., *Application of Thin ZnO ALD Layers in Fiber-Optic Fabry-Pérot Sensing Interferometers*, *Sensors* 2016, 16(3), 416; (IF=2,677)

10. **Wierzba P.**, *Interferometric Sensor of Wavelength Detuning Using a Liquid Crystalline Polymer Waveplate*, *Sensors* 2016, 16(5), 633; (IF=2,677)
11. Hirsch M., Majchrowicz D., **Wierzba P.**, Weber M., Bechelany M., Jędrzejewska-Szczerska M., *Low-Coherence Interferometric Fiber-Optic Sensors with Potential Applications as Biosensors*, *Sensors* 2017, 17(2), 261; (IF=2,677:2016)

Oświadczenia wszystkich współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku zostały umieszczone w załączniku 3A.

Istotny autorski wkład do nauki w obszarze dyscypliny *elektronika* przedstawianego osiągnięcia obejmuje:

- Opracowanie, implementację i zastosowanie wektorowej metody opisu propagacji wiązki promieniowania optycznego w jednoosiowych materiałach dwójłomnych umożliwiające wyznaczenie amplitud wiązek odbitych i przechodzących,
- Opracowanie, realizację i wykorzystanie wybranych elementów dwójłomnych (pryzmatów Wollastona i płytek falowych) z ciekłych kryształów,
- Opracowanie, realizację i wykorzystanie technologii płytek falowych z polimerów ciekłokrystalicznych na powierzchni elementów optycznych,
- Opracowanie, realizację i wykorzystanie interferometrycznego czujnika przemieszczenia z płytkami falowymi,
- Opracowanie, realizację i wykorzystanie interferometrycznego czujnika zmiany długości fali z płytką falową z polimerów ciekłokrystalicznych do pomiaru wartości chwilowej długości fali lasera przestrajalnego,
- Opracowanie konstrukcji interferometrów światłowodowych wykorzystujących cienkie warstwy wytwarzane w technologii osadzania warstw atomowych (ang. *Atomic Layer Deposition – ALD*)
- Opracowanie i zastosowanie metody pozyskiwania informacji o wartości mierzonej przez interferometryczne czujniki światłowodowe z cienkimi warstwami wytwarzanymi w technologii ALD.

c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. prac/pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Omówienie celu i wyników naukowych

Interferometryczne metody pomiarowe są często stosowane ze względu na ich wysoką rozdzielczość i dużą dokładność, przy względnie prostych konfiguracjach układów pomiarowych. Zakres ich zastosowań obejmuje nie tylko metrologię i precyzyjne pomiary przemysłowe, ale także sensory światłowodowe oraz techniki obrazowania, zarówno wykorzystywane w obrazowaniu obiektów i zjawisk makroskopowych jak i stosowane w mikroskopii optycznej. Pomimo ponad stuletniej historii interferometrii następuje jej ciągły dynamiczny rozwój, którego wynikiem są m.in. opracowywane nowe metody optycznej tomografii niskokoherencyjnej (OCT) [Drexler 2015], czy zaawansowane układy pomiarowe, takie jak LIGO [Aasi 2015] czy unikatowe żyroskopy optyczne [Jaroszewicz 2011].

Jedną z ważnych gałęzi interferometrii optycznej jest interferometria polaryzacyjna. W układach interferometrii polaryzacyjnej stan polaryzacji promieniowania optycznego jest ściśle określony, a jego zmiany wywołane zmianami wartości wielkości mierzonej umożliwiają uzyskanie dodatkowej informacji, niedostępnej w układach klasycznych. Na przykład, wykorzystując interferometr polaryzacyjny możliwe jest jednoznaczne określenie kierunku zmian wielkości mierzonej bez konieczności stosowania technik heterodynowych.

Pomimo niewątpliwych zalet wykorzystanie układów interferometrii polaryzacyjnej jest wciąż niewystarczające. Dobrym przykładem są tu techniki mikroskopii i mikrointerferometrii polaryzacyjnej, znane od lat 1970-tych [Pluta 1982], a nadal stosowane wyłącznie w najdroższych modelach mikroskopów. Powodem jest przede wszystkim wysoka cena specyficznych elementów dwójłomnych stosowanych w tych układach, takich jak płytki opóźniające czy pryzmaty Wollastona. Skutkuje to ograniczonym zainteresowaniem tymi technikami pomiarowymi i dość powolnym postępowaniem.

Poprawę można osiągnąć przede wszystkim przez opracowanie alternatywnych, tańszych technologii wytwarzania układów interferometrii polaryzacyjnej. Technologie te muszą być oparte o zastosowanie nowych klas materiałów, takich jak materiały ciekłokrystaliczne, lub innowacyjnych technologii, takich jak osadzanie warstw atomowych, ponieważ dalsze znaczne zmniejszenie kosztu specyficznych elementów dwójłomnych, wykonywanych tradycyjnie nie wydaje się być możliwe. Innym rozwiązaniem jest opracowywanie układów interferometrii polaryzacyjnej dla nowych zastosowań w nauce, medycynie i w przemyśle.

Kolejną ważną gałęzią interferometrii jest interferometria światłowodowa. Czujniki światłowodowe mają szereg zalet w porównaniu z czujnikami elektronicznymi i układami pomiarowymi wykorzystującymi elementy optyki objętościowej [Grattan 2000]. Ze względu na wykonanie z materiałów dielektrycznych są niewrażliwe na pole elektryczne i

magnetyczne, oraz nie generują zakłóceń elektromagnetycznych. W zależności od zastosowanych materiałów mogą one pracować w obecności promieniowania jonizującego i charakteryzować się znaczną odpornością na narażenia chemiczne. Niewielkie wymiary (dziesiątki μm) przetworników pomiarowych stosowanych w konstrukcji czujników światłowodowych minimalizują ich wpływ na obiekt mierzony. Czujniki światłowodowe mogą także charakteryzować się wysoką czułością. Możliwa jest realizacja np. bioczujników dokonujących pomiarów koncentracji molekuł z rozdzielczością 100 fg/mm^2 [Lukosz 1997].

Należy pamiętać, iż w wielu zastosowaniach medycznych, naukowych i przemysłowych konieczne jest dostosowanie światłowodowych czujników interferometrycznych do specyficznych wymogów. Wymaga to wykorzystania warstw materiałów dielektrycznych modyfikujących właściwości metrologiczne tych czujników lub zabezpieczających te czujniki przed narażeniami występującymi w środowisku ich pracy.

Ponieważ warstwy te muszą zwykle zostać naniesione na światłowód wykonany ze szkła kwarcowego, konieczne jest zastosowanie innowacyjnych technologii osadzania, które nie wymagają stosowania temperatur mogących uszkodzić światłowód. Technologiami takimi są: technologia osadzania warstw atomowych (ALD) czy technologia sol-żel.

Celem zrealizowanego cyklu badań było: *(i) opracowanie technologii wybranych klas elementów stosowanych w układach interferometrii polaryzacyjnej z wykorzystaniem materiałów ciekłokrystalicznych, (ii) opracowanie nowych układów pomiarowych wykorzystujących interferometrię polaryzacyjną, a także (iii) zastosowanie cienkich warstw dielektrycznych wytwarzanych w procesie osadzania warstw atomowych (ALD) w światłowodowych czujnikach interferometrycznych.*

Realizacja tak sformułowanego celu wymagała: (A) opracowania metod modelowania propagacji promieniowania optycznego w materiałach dwójłomnych oraz spójnego opisu wpływu nieidealności elementów na parametry interferometrów polaryzacyjnych, (B) opracowania technologii wykonania wybranych elementów dwójłomnych z materiałów ciekłokrystalicznych, (C) opracowania konstrukcji interferometrów Fabry'ego-Pérot'a wykorzystujących cienkie warstwy dielektryczne wytwarzane w technologii osadzania warstw atomowych (ALD) na powierzchni czołowej światłowodu, oraz (D) opracowania nowych układów pomiarowych wykorzystujących interferometrię polaryzacyjną.

A. Opracowanie metod modelowania propagacji promieniowania optycznego w materiałach dwójłomnych oraz spójnego opisu wpływu nieidealności elementów na parametry interferometrów polaryzacyjnych

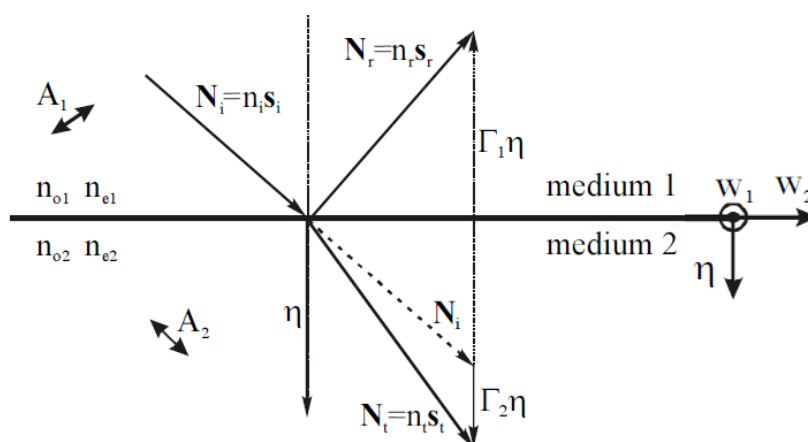
Jednym z ważniejszych narzędzi w procesie projektowania i analizy układów interferometrów polaryzacyjnych jest opis propagacji promieniowania optycznego w tych interferometrach. Musi on umożliwiać wyznaczenie kierunku propagacji i amplitudy

zespolonej promieniowania optycznego w wolnej przestrzeni, w elementach wykonanych z materiałów izotropowych oraz w elementach wykonanych z materiałów anizotropowych. Musi ona także pozwalać na wyznaczenie kierunków propagacji i amplitud promieniowania optycznego odbitego i załamane na granicy dowolnych dwóch rodzajów ośrodków. Ponieważ elementy anizotropowe są w zdecydowanej większości wykonane z jednoosiowych materiałów dwójłomnych, które nie wykazują absorpcji, wystarcza zwykle, by stosowana metoda umożliwiała opis tylko materiałów anizotropowych tej klasy.

Pomimo, że takie metody opisu znane są od dość dawna [Szivessy 1928], posługiwanie się nimi jest zwykle trudne, nie tylko ze względu na dość skomplikowane określenie wielkości występujących w obliczeniach, ale przede wszystkim wielostopniowy proces obliczeń. Z drugiej strony, istnieją eleganckie metody opisu (np. [Trollinger 1991]) wykorzystujące prosty formalizm wektorowy, ale nie umożliwiają one wyznaczenia wartości amplitud.

Dlatego też w ramach badań opracowałem metodę opisu propagacji promieniowania optycznego, która jest twórczą syntezą metod [Szivessy 1928] i [Trollinger 1991]. W metodzie tej, przedstawionej w pracy [2], obliczenia prowadzone są w dwóch etapach. W pierwszym etapie, wykorzystując formalizm wektorowy [Trollinger 1991] wyznaczane są kierunki propagacji frontów falowych oraz kierunki wektorów promieni. W drugim etapie, będącym modyfikacją [Szivessy 1928], kierunki te są wykorzystywane do stworzenia układu równań, którego rozwiązanie umożliwia wyznaczenie wartości amplitud promieniowania.

Działanie metody przedstawiono na przykładzie wyznaczania kierunków wektorów fal odbitych i przechodzących przez granicę pomiędzy dwoma jednoosiowymi ośrodkami dwójłomnymi przedstawionymi na rysunku 1. Kierunki osi optycznej w tych ośrodkach określone są odpowiednio wektorami \mathbf{A}_1 i \mathbf{A}_2 , zaś współczynniki załamania w tych ośrodkach wynoszą odpowiednio n_{o1} i n_{e1} oraz n_{o2} i n_{e2} . Współczynnik załamania dla fali padającej wynosi n_i , \mathbf{s}_i jest wektorem jednostkowym prostopadłym do jej frontu falowego, zaś wektor $\boldsymbol{\eta}$ jest prostopadły do płaszczyzny granicznej ośrodków.



Rysunek 1. Odbicie i załamanie na granicy ośrodków jednoosiowych (objaśnienia w tekście)

Wprowadzając oznaczenia:

$$q_1 = \frac{n_{e1}^2 - n_{o1}^2}{n_{o1}^2} \quad q_2 = \frac{n_{e2}^2 - n_{o2}^2}{n_{o2}^2} \quad (1)$$

I postępując w sposób opisany w pracy [Trollinger 1991] otrzymujemy dwa równania, w których niewiadomymi są współczynniki rzeczywiste Γ_1 i Γ_2 . Równania te mają postać:

$$\begin{aligned} \Gamma_1^2 \left[1 + q_1 (\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{A}_1)^2 \right] + 2\Gamma_1 [\mathbf{N}_i \cdot \boldsymbol{\eta} + q_1 (\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{A}_1)(\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{A}_1)] + \left[|\mathbf{N}_i|^2 - n_{e1}^2 + q_1 (\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{A}_1)^2 \right] &= 0 \\ \Gamma_2^2 \left[1 + q_2 (\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{A}_2)^2 \right] + 2\Gamma_2 [\mathbf{N}_i \cdot \boldsymbol{\eta} + q_2 (\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{A}_2)(\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{A}_2)] + \left[|\mathbf{N}_i|^2 - n_{e2}^2 + q_2 (\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{A}_2)^2 \right] &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Rozwiązując równania (2) otrzymujemy wartości współczynników Γ_1 i Γ_2 , które umożliwiają wyznaczenie wektorów fali odbitej \mathbf{N}_r i fali przechodzącej \mathbf{N}_t :

$$\mathbf{N}_r = \mathbf{N}_i + \Gamma_1 \boldsymbol{\eta} \quad \mathbf{N}_t = \mathbf{N}_i + \Gamma_2 \boldsymbol{\eta} \quad (3)$$

Każde z równań (2) w ogólnym przypadku może posiadać dwa różne rozwiązania rzeczywiste, którym odpowiadają dwa kierunki fal przechodzących ($\mathbf{s}^{(1)}$ i $\mathbf{s}^{(2)}$) i dwa kierunki fal odbitych ($\mathbf{s}^{(I)}$ i $\mathbf{s}^{(II)}$).

Kierunki promieni (czyli kierunki transportu energii – wektory Poyntinga) $\boldsymbol{\sigma}_r$, $\boldsymbol{\sigma}_t$ odbitych i załamanych wyznaczone są korzystając z \mathbf{N}_r i \mathbf{N}_t oraz parametrów materiałowych.

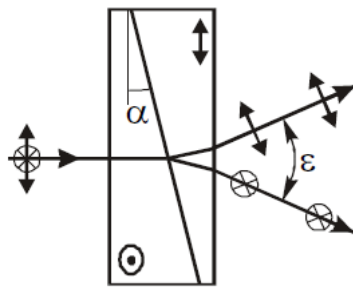
W drugim etapie analizy tworzony jest układ równań (4), wiążący amplitudy wektorów indukcji elektrycznej $\mathbf{D}^{(I)}$ i $\mathbf{D}^{(II)}$ fali odbitej oraz $\mathbf{D}^{(1)}$ i $\mathbf{D}^{(2)}$ fali przechodzącej z wartościami parametrów wyznaczonych wcześniej.

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathbf{w}_1 \mathbf{i}_{d1}}{n_{o1}^2} & \frac{\mathbf{w}_1 \mathbf{e}^{(II)}}{n_{r1}^2} & -\frac{\mathbf{w}_1 \mathbf{i}_{d1}}{n_{o2}^2} & -\frac{\mathbf{w}_1 \mathbf{e}^{(2)}}{n_{r2}^2} \\ \frac{\mathbf{w}_2 \mathbf{i}_{d1}}{n_{o1}^2} & \frac{\mathbf{w}_2 \mathbf{e}^{(II)}}{n_{r1}^2} & -\frac{\mathbf{w}_2 \mathbf{i}_{d1}}{n_{o2}^2} & -\frac{\mathbf{w}_2 \mathbf{e}^{(2)}}{n_{r2}^2} \\ \frac{\mathbf{w}_1 (\mathbf{s}^{(I)} \times \mathbf{i}_{d1})}{n_{o1}} & \frac{n_{m1}}{n_{r1}^2} \mathbf{w}_1 (\mathbf{s}^{(II)} \times \mathbf{e}^{(II)}) & -\frac{\mathbf{w}_1 (\mathbf{s}^{(I)} \times \mathbf{i}_{d1})}{n_{o2}} & -\frac{n_{m2}}{n_{r2}^2} \mathbf{w}_1 (\mathbf{s}^{(2)} \times \mathbf{e}^{(2)}) \\ \frac{\mathbf{w}_2 (\mathbf{s}^{(I)} \times \mathbf{i}_{d1})}{n_{o1}} & \frac{n_{m1}}{n_{r1}^2} \mathbf{w}_2 (\mathbf{s}^{(II)} \times \mathbf{e}^{(II)}) & -\frac{\mathbf{w}_2 (\mathbf{s}^{(I)} \times \mathbf{i}_{d1})}{n_{o2}} & -\frac{n_{m2}}{n_{r2}^2} \mathbf{w}_2 (\mathbf{s}^{(2)} \times \mathbf{e}^{(2)}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{D}^{(I)} \\ \mathbf{D}^{(II)} \\ \mathbf{D}^{(1)} \\ \mathbf{D}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{w}_1 \mathbf{E} \\ -\mathbf{w}_2 \mathbf{E} \\ -n\mathbf{w}_1 (\mathbf{s} \times \mathbf{E}) \\ -n\mathbf{w}_2 (\mathbf{s} \times \mathbf{E}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Korzystając z wartości amplitud wektorów $\mathbf{D}^{(I)}$ i $\mathbf{D}^{(II)}$ oraz $\mathbf{D}^{(1)}$ i $\mathbf{D}^{(2)}$ wyznaczonych z (4), wyznaczamy amplitudy promieni odbitych i przechodzących oraz odpowiadających im natężeń promieniowania.

Zastosowanie powyższej metody umożliwia np. określenie stosunku natężeń wiązek światła na wyjściu pryzmatu Wollastona przedstawionego na rysunku 2. Wartość tego stosunku ma istotne znaczenie w wielu układach interferometrów polaryzacyjnych, ponieważ od niej zależy kontrast (widzialność) sygnału interferencyjnego (pola prążkowego lub jednorodnego) na wyjściu interferometru. Zbyt niska wartość kontrastu powoduje pogorszenie

rozdzielczości i dokładności pomiaru.

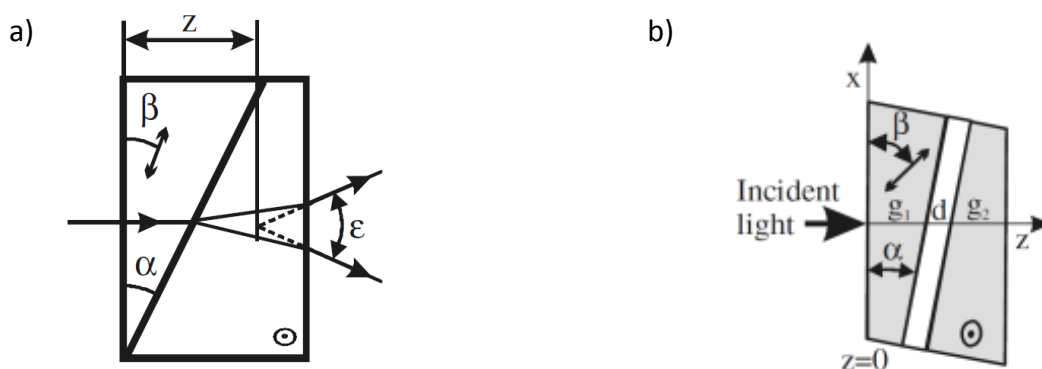


Rysunek 2. Pryzmat Wollastona wykonany z YVO₄. α – kąt łamiący, ϵ – kąt rozdziału

Największe zmiany stosunku natężeń wiązek światła na wyjściu pryzmatu Wollastona będą występowały w pryzmatach o dużym kącie łamiącym α ($\alpha > 5^\circ$) wykonanych z materiału o dużej dwójłomności ($\Delta n > 0,05$). Dlatego obliczenia przeprowadzono dla pryzmatu Wollastona o kącie łamiącym $\alpha = 20^\circ$ i grubości 4 mm, wykonanego z materiału o dużej dwójłomności: YVO₄ ($n_e = 2,2154$ i $n_o = 1,9929$ dla $\lambda = 633$ nm). Przyjęto, że na pryzmat pada wiązka równoległa, której dwie składowe, spolaryzowane odpowiednio w płaszczyźnie rysunku i prostopadle do niej, mają identyczne amplitudy.

W wyniku modelowania wyznaczono wartość kąta rozdziału ϵ wynoszącą 9.285° . Uzyskano wartości natężeń $I_1 = 0,3766$ and $I_2 = 0,3887$, oraz odpowiadającą im wartość widzialności V wynoszącą $0,999876$. Wartość ta jest na tyle bliska jedności, że nie powinna powodować pogorszenia parametrów metrologicznych większości układów interferometrów polaryzacyjnych.

Opracowana przeze mnie metoda opisu propagacji promieniowania optycznego została zastosowana w procesie projektowania pryzmatów Wollastona i pryzmatów Nomarskiego, w szczególności pryzmatów wykonywanych z warstw polimerów ciekłokrystalicznych [3].

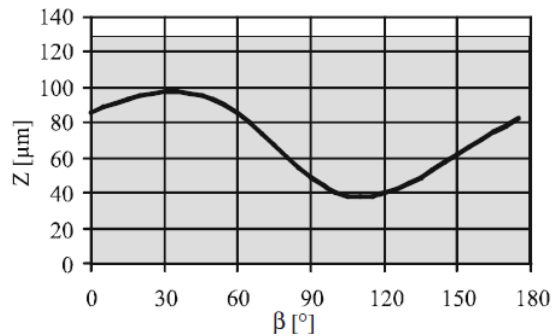


Rysunek 3. Pryzmat Nomarskiego (a) wykonany z materiału krystalicznego, (b) wykonany z polimerów ciekłokrystalicznych. α – kąt łamiący, β – kąt wycięcia, z – położenie płaszczyzny lokalizacji prążków, ϵ – kąt rozdziału, g_1 – grubość pierwszego klina dwójłomnego, d – grubość podłoża, g_2 – grubość drugiego klina dwójłomnego.

Zasadniczym celem cyklu modelowania było określenie zależności położenia płaszczyzny lokalizacji prążków w pryzmacie Nomarskiego przedstawionym na rysunku 3b od

parametrów pryzmatu. Pryzmaty, w których płaszczyzna ta jest położona na zewnątrz, mogą być stosowane np. w mikroskopach z kontrastem interferencyjnym różniczkowym ([Pluta 1982] s. 635 – 638).

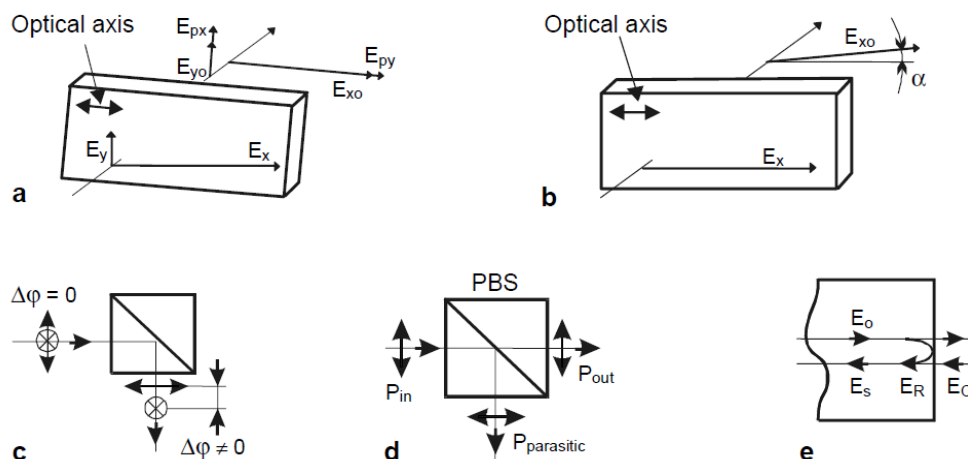
W wyniku modelowania stwierdzono, że dla rozpatrywanych pryzmatów płaszczyzna lokalizacji prążków znajduje się zawsze wewnątrz pryzmatu. Przykładową zależność położenia Z tej płaszczyzny od kąta wycięcia β przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Zależność położenia Z płaszczyzny lokalizacji prążków w pryzmacie Nomarskiego od kąta wycięcia β . Obszar zaciemniony na wykresie odpowiada położeniu tej płaszczyzny wewnątrz pryzmatu.

Pryzmaty takie są stosowane w mikroskopach interferencyjno-polaryzacyjnych [Pluta 1982] oraz w innych układach pomiarowych [Lee 2014].

Kolejnym ważnym narzędziem w procesie projektowania i analizy układów interferometrów polaryzacyjnych jest spójny opis wpływu nieidealności elementów na działanie tych interferometrów. Opis taki został przeze mnie sformułowany i przedstawiony w pracy [1]. Obejmuje on nie tylko sam wpływ nieidealności i błędów orientacji elementów (Rysunek 5), ale także wybrane metody korekcji sygnału, redukujące ich wpływ na wynik pomiaru.



Rysunek 5. Zjawiska pogarszające parametry metrologiczne homodynowych interferometrów polaryzacyjnych. a) sprzężenie (przesłuch) polaryzacji, b) i c) pasożytnicza dwójłomność, d) skończona wartość współczynnika ekstynkcji, e) odbicia od powierzchni elementów optycznych.

Zaproponowałem zmodyfikowane rozwiązanie układu analogowego realizującego tzw. korekcję Heydemanna [Heydemann 1981] charakteryzujące się znacznie mniejszą nieliniowością, w porównaniu do układów opisanych w literaturze. Zastosowanie układu analogowego do realizacji tej korekcji umożliwia uzyskanie dużej szybkości pracy i eliminację opóźnienia występującego w cyfrowych implementacjach tej metody, istotnego szczególnie w automatycznych układach regulacji.

Sygnaty wyjściowe U_{d1} i U_{d2} z interferometrów polaryzacyjnych zniekształcone w wyniku nieidealności elementów optycznych, błędów ich orientacji oraz właściwości układów elektronicznych mają postać

$$\begin{aligned} U_{1d} &= U_1 + p \\ U_{2d} &= \frac{1}{r}(U_2 \cos \alpha - U_1 \sin \alpha) + q' \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie r – stosunek wzmocnień w obu kanałach ($r=K_1/K_2$), p , q – składowe stałe sygnałów w kanale pierwszym i drugim, α – błąd kwadratury, U_1 , U_2 – sygnały wyjściowe interferometru idealnego, dane wzorami:

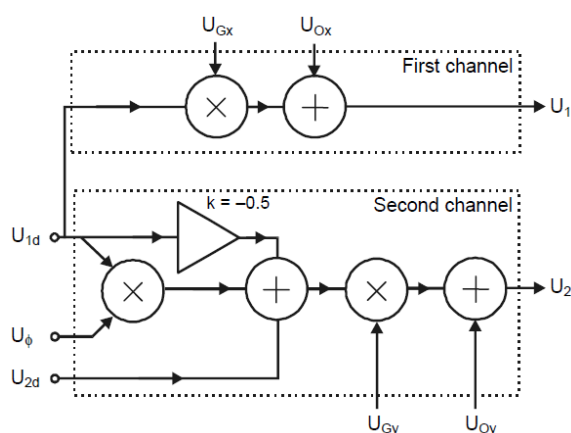
$$\begin{aligned} U_1 &= U \cos(\Delta\varphi) \\ U_2 &= U \sin(\Delta\varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie $\Delta\varphi$ – różnica faz mierzona interferometrem.

Znając U_{d1} i U_{d2} dla zakresu $\Delta\varphi$ wynoszącego przynajmniej 2π można wyznaczyć wartości p , q , r i α . Jeżeli wartości te są względnie stałe, to można wyznaczyć U_1 i U_2 poddając sygnały U_{d1} i U_{d2} korekcji Heydemanna zdefiniowanej następująco:

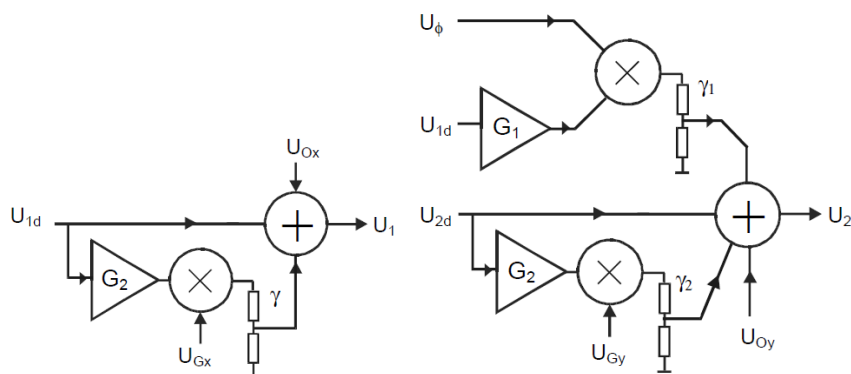
$$\begin{aligned} U_1 &= U_{1d} - p \\ U_2 &= \frac{1}{\cos \alpha} [(U_{1d} - p) \sin \alpha + r(U_{2d} - q)]' \end{aligned} \quad (7)$$

Korekcja ta jest często realizowana za pomocą układu analogowego przedstawionego na rysunku 6.



Rysunek 6. Przykładowa implementacja korekcji Heydemanna za pomocą układu analogowego.

Poważną wadą układu przedstawionego na rysunku 6 jest znaczący poziom składowych niepożądanych: zniekształceń, szumów i składowej stałej, wprowadzanych przez stosowane w nim układy mnożące. W celu znacznego obniżenia poziomu składowych niepożądanych zaproponowałem oryginalny układ korekcji przedstawiony na rysunku 7. W układzie tym korekcja sygnałów U_{d1} i U_{d2} następuje poprzez dodanie do nich poprawek wyznaczonych przez układ analogowy. Ponieważ wartości tych poprawek nie są wysokie w porównaniu do sygnałów U_{d1} i U_{d2} , należy zastosować wzmacnienie przed układem mnożącym, a następnie uzyskany sygnał podzielić za pomocą dzielnika rezystancyjnego, obniżając poziom zniekształceń, szumów i składowej stałej na wyjściu układu.



Rysunek 7. Zmodyfikowana implementacja korekcji Heydemanna za pomocą układu analogowego

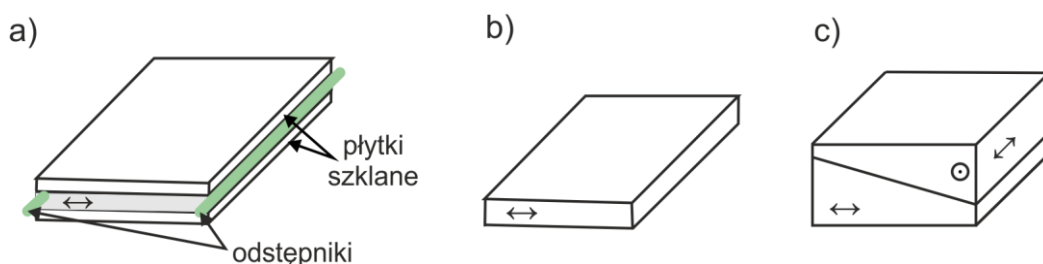
Układ przedstawiony na rysunku 7 umożliwia ponad siedmiokrotną redukcję składowych niepożądanych, w porównaniu z układem z rysunku 5 [1]¹. Pozwala to na znaczącą poprawę dokładności pomiaru za pomocą interferometrów, w których układ ten zostanie zastosowany.

B. Opracowanie technologii wybranych elementów dwójłomnych z materiałów ciekłokrystalicznych,

Ciekłe kryształy są materiałami anizotropowymi o szerokim zastosowaniu w elektronice, w szczególności w konstrukcji displejów (np. [Chen 2016], [Restaino 2015]). Dwójłomność Δn mieszanin ciekłokrystalicznych zależy od ich budowy molekularnej, przyjmując wartości od 0,002 przynajmniej do 0,47 [Nowinowski 2012]. Orientacja (ukierunkowanie) molekuł ciekłego kryształu w cienkich (kilkanaście μm) warstwach tego materiału realizowana jest poprzez zakotwiczenie molekuł na powierzchniach ograniczających warstwę. Powierzchnie te muszą być wcześniej poddane odpowiedniej obróbce (np. *rubbingowi*, naparowaniu).

¹ Obecnie, w wyniku rozwoju elektroniki, dostępne są mnożące przetworniki cyfrowo-analogowe (MDAC) i rezystancyjne przetworniki cyfrowo-analogowe (tzw. potencjometry cyfrowe) (RDAC), umożliwiające dalsze zmniejszenie poziomu zniekształceń.

Ponieważ ciekłe kryształy charakteryzują się płynnością, zachowanie stałej grubości warstwy i jej orientacji wymaga zamknięcia jej w komórkach wykonanych z płasko-równoległych płytek szklanych, przedstawionych schematycznie na rysunku 8a. Grubość warstwy ciekłego kryształu w komórce jest określana poprzez zastosowanie tzw. odstępników. Komórka ciekłokrystaliczna, w której molekuly ciekłego kryształu zostały zorientowane w płaszczyźnie warstwy (zgodnie z symbolem \leftrightarrow na rysunku 8a), może pełnić rolę płytki falowej (rysunek 8b). Komórki ciekłokrystaliczne nie muszą mieć stałej grubości na całej powierzchni warstwy. Mogą być one realizowane w postaci klinowej, w której grubość warstwy zmienia się wzdłuż jednego z boków komórki. Dwie takie komórki mogą pełnić funkcję pryzmatu Wollastona (rysunek 8c). Płytki falowe i pryzmaty Wollastona są jednymi z najczęściej stosowanych elementów dwójtomnych w interferometrii polaryzacyjnej.



Rysunek 8. Elementy dwójtomne. a) komórka ciekłokrystaliczna, b) płytka falowa, c) pryzmat Wollastona.

W ramach prac nad zastosowaniem mieszanin ciekłokrystalicznych w układach interferometrii polaryzacyjnej opracowałem technologię wykonania pryzmatów Wollastona oraz ich wykorzystanie [4].

Pryzmat Wollastona wykonany w tej technologii składa się z dwóch warstw ciekłego kryształu o teksturze planarnej lub zbliżonej do planarnej znajdujących się w komórce wykonanej w procesie przedstawionym na rysunku 9. Orientację warstw ciekłego kryształu uzyskuje się poprzez zastosowanie warstw orientujących (2) i ich ukierunkowanie (3).



Rysunek 9. Przebieg procesu wykonywania pryzmatu Wollastona z ciekłymi kryształami

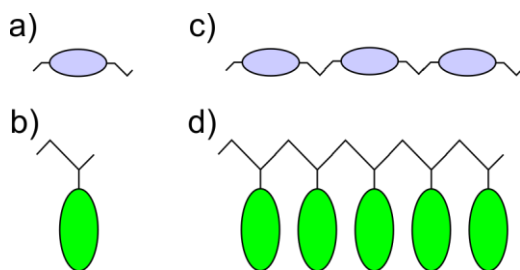
Za pomocą tej technologii wykonano szereg pryzmatów Wollastona o wymiarach 40 mm x 30 mm. Stosując mieszaninę ZLI-1957 (prod. Merck) o dwójłomności $\Delta n = 0,13$ uzyskano kąt podziału wiązki $\epsilon = 0.37$ mrad (ok. 1.3') [4]. Taka wartość kąta podziału wiązki umożliwia zastosowanie opracowanych pryzmatów w układach spektrometrów wykorzystujących transformację Fouriera (ang. *static Fourier transform spectrometers*) lub w układach mikroiinterferometrii optycznej [Pluta 1988].

Optyczne płytki opóźniające (płytki falowe) zrealizowałem w procesie analogicznym do przedstawionego na rysunku 9. Stosowałem w nim pojedynczą komórkę z odstępnikami zapewniającymi stałą grubość warstwy. Wykonano szereg płytek opóźniających o wymiarach 40 mm x 30 mm.

W wyniku optymalizacji procesu składania komórek udało się uzyskać stabilną orientację warstw ciekłego kryształu o grubości do ok. 100 μm , co jest wynikiem dobrym. Problemami występującym w tej technologii są: (a) trudność zapewnienia stabilnej orientacji warstw ciekłego kryształu o grubości powyżej ok. 100 μm , (b) trudność w uzyskaniu płytek opóźniających o wartościach $\lambda/4$ i niższych, oraz (c) wrażliwość wykonanych elementów na naprężenia, wprowadzane zarówno w procesie ich wykonania jak i w czasie ich montażu w układach optycznych. Problemy te ograniczają możliwości wykonywania pryzmatów Wollastona, szczególnie w zakresie kątów podziału wiązki powyżej ok. 1°, uniemożliwiając np. realizację pryzmatów pełniących funkcję dzielników wiązki, w których kąt ten powinien wynosić co najmniej 5°. Utrudniają także realizację płytek opóźniających $\lambda/8$ przydatnych w układach interferometrów polaryzacyjnych.

Korzystając z doświadczeń uzyskanych w trakcie realizacji płytek opóźniających i pryzmatów Wollastona z ciekłych kryształów podjąłem prace nad technologią wytwarzania dwójłomnych elementów optycznych z polimerów ciekłokrystalicznych.

Polimery ciekłokrystaliczne (ang. *Liquid Crystalline Polymers* – LCPs), znane też jako mezogeny reaktywne (ang. *Reactive Mesogens* – RMs) są innowacyjnym materiałami opracowanymi na początku lat 2000. Zbudowane są one z molekuł ciekłego kryształu z wiązaniami umożliwiającymi tworzenie łańcuchów polimerowych, co przedstawiono schematycznie na rysunku 10. Molekuły monomeru mogą być orientowane tak, jak molekuły ciekłych kryształów, a następnie poddawane polimeryzacji. W wyniku tego procesu powstaje polimer ciekłokrystaliczny, mający postać stałą i stabilne właściwości optyczne, który nie wymaga zamknięcia w komórce.

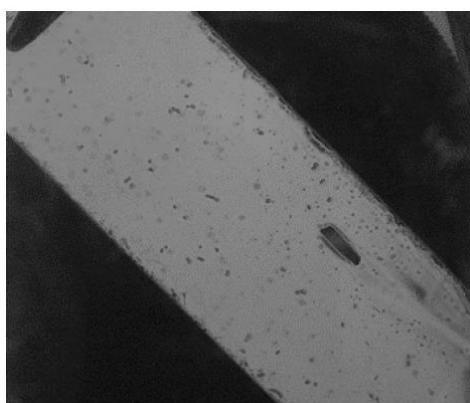


Rysunek 10. Molekuły polimerów ciekłokrystalicznych a) z wiązaniami w łańcuchu głównym (ang. *main chain*), b) z wiązaniami w łańcuchu bocznym (ang. *side chain*), c) d) łańcuchy polimerowe utworzone z tych molekuł

Najważniejszym zastosowaniem polimerów ciekłokrystalicznych jest poprawa właściwości optycznych, barwnych displejów ciekłokrystalicznych, w szczególności poprawa współczynnika kontrastu. Poprawę tę uzyskuje się poprzez wytworzenie we wnętrzu displeja warstwy polimeru ciekłokrystalicznego o tak dobranych właściwościach, by skompensować zmiany różnicy faz dwóch ortogonalnych składowych wiązki światła przechodzącej przez warstwę ciekłego kryształu powodowane zmianą kąta obserwacji. Ponieważ w każdym subpixelu grubość warstwy polimeru, a także jej orientacja, może być inna, możliwa jest bardzo skuteczna kompensacja tych zmian.

Ze względu na dużą konkurencję na rynku displejów, firmy produkujące polimery ciekłokrystaliczne bardzo niechętnie oferują te materiały w celach badawczych.

Jako punkt wyjścia prowadzonych przeze mnie prac posłużyły zalecenia jednego z producentów – firmy Merck – dla producentów displejów ciekłokrystalicznych. Warstwy uzyskiwane zgodnie z tymi zaleceniami były często nieciągłe (Rysunek 11) [4], a ich jakość zależała od sposobu przygotowania warstwy orientującej i czystości stosowanego monomeru.

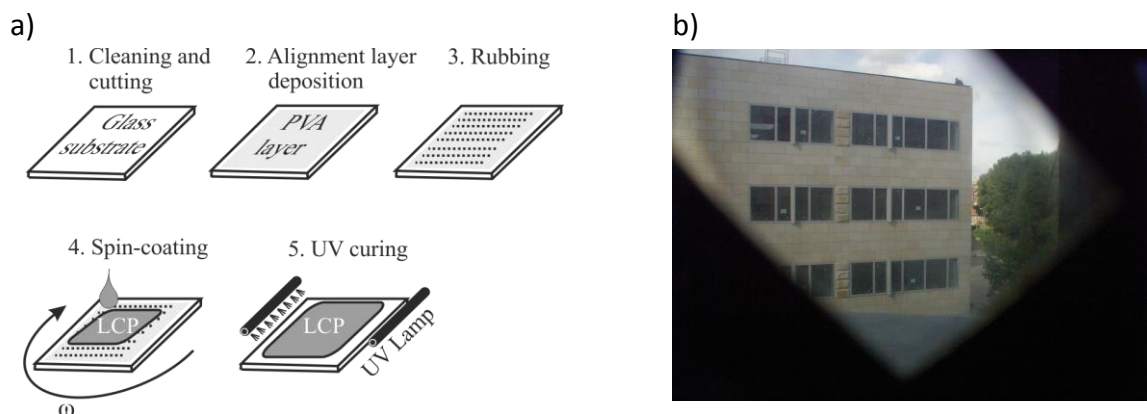


Rysunek 11. Płytką opóźniająca z polimeru ciekłokrystalicznego pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami. Ciemne obszary są nieciągłościami warstwy polimeru.

W wyniku wprowadzenia modyfikacji procesu, dotyczących przede wszystkim obróbki warstw po ich rozwirowaniu (Rysunek 12a), uzyskałem zwiększenie zakresu uzyskiwanych

wartości opóźnienia do ok. 2λ przy dobrych właściwościach optycznych uzyskiwanych warstw i niewielkiej powierzchni defektów, obecnych na brzegach warstwy (Rysunek 12b). Ta wartość opóźnienia jest znacznie większa od wartości wykorzystywanych w displejach ciekłokrystalicznych.

Modyfikując stanowisko technologiczne można wytwarzać warstwy polimeru ciekłokrystalicznego na płaskich powierzchniach elementów optycznych, np. zwierciadeł płaskich i dzielników wiązki. Prowadzi to do uproszczenia konstrukcji układów optycznych i procesu ich justowania, a także ogranicza liczbę niepożądanych odbić od powierzchni elementów optycznych. Ponadto, możliwa jest kompensacja niektórych niepożądanych właściwości polaryzacyjnych elementów optycznych, takich jak przesunięcie fazy pomiędzy składowymi o ortogonalnych polaryzacjach wprowadzane w niektórych dzielnikach wiązki.



Rysunek 12. Przebieg procesu wykonywania płytek opóźniających z polimerów ciekłokrystalicznych (a), widok przez płytkę opóźniającą umieszczoną pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami (b).

Opracowana przeze mnie z sukcesem technologia płytek opóźniających z polimerów ciekłokrystalicznych została zastosowana w realizacji interferometrów polaryzacyjnych.

C. Opracowanie konstrukcji interferometrów Fabry’ego-Pérot’a wykorzystujących cienkie warstwy dielektryczne wytwarzane w technologii osadzania warstw atomowych (ALD).

Interferometry stosowane jako przetworniki pomiarowe w czujnikach światłowodowych mają szereg zalet w porównaniu z czujnikami elektronicznymi tych samych wielkości fizycznych. Wykonane z materiałów dielektrycznych są niewrażliwe na pole elektryczne i magnetyczne, a przy odpowiednim doborze materiałów – także na promieniowanie jonizujące. Nie stanowią źródła zakłóceń elektromagnetycznych a ich konstrukcja może być w prosty sposób dostosowana do pomiaru jednej z wielu wielkości fizycznych i chemicznych (np. ciśnienia, temperatury, pH [Zheng 2016]).

Interferometr Fabry'ego-Perota jest jednym z najbardziej uniwersalnych interferometrów. Dzięki małym wymiarom (dziesiątki μm) i możliwości pracy w trybie odbiciowym umożliwia on dokonywanie quasi-punktowych pomiarów w zastosowaniach naukowych i technicznych i minimalnie inwazyjnych pomiarów w zastosowaniach biomedycznych. Wykorzystując techniki detekcji takie, jak interferometria niskokoherencyjna, możliwe jest uniezależnienie wyniku pomiaru realizowanego za pomocą tego interferometru od wahań mocy w torze optycznym czujnika [Grattan 2000].

W wyniku opracowywania nowych materiałów o dużym potencjale aplikacyjnym w optoelektronice (nanodiament, grafen, fosforen, ZnO, TiO₂) oraz rozwoju technik ich wytwarzania, takich jak osadzanie z fazy gazowej (ang. *Chemical Vapour Deposition – CVD*) czy osadzanie warstw atomowych (ang. *Atomic Layer Deposition – ALD*) możliwe staje się wykorzystanie tych materiałów w konstrukcji interferometrów światłowodowych, w szczególności w konstrukcji interferometrów Fabry'ego-Perota. Warstwy tych materiałów mogą pełnić trzy role: (i) warstwy czynnej wypełniającej wnękę interferometru, umożliwiającą np. pomiar temperatury (ii) modyfikować właściwości optyczne interferometru, (iii) chronić interferometr przed wpływem środowiska. Ponieważ warstwy te nie powinny wprowadzać w interferometrze znaczącego tłumienia, powinny one być wykonywane z materiałów dielektrycznych lub półprzewodnikowych, które nie wykazują nadmiernej tłumienności. Warunkiem koniecznym właściwego wykorzystania tych warstw jest umiejętność projektowania i analizy pracy interferometrów Fabry'ego-Perota.

Dla wspomagania procesu projektowania tych interferometrów oraz dla optymalizacji ich właściwości opracowałem model matematyczny interferometru Fabry'ego-Perota współpracującego ze światłowodem jednomodowym. Do opisu propagacji promieniowania optycznego w interferetrze wykorzystałem formalizm wiązki gaussowskiej [Marcuse 1982].

Model ten umożliwia wyznaczenie współczynników transmisji i odbicia interferometru Fabry'ego-Perota dla określonej długości fali oraz wartości parametrów interferometru i światłowodu. Wyznaczane są spektralne charakterystyki transmisji i odbicia, oraz rodziny tych charakterystyk odpowiadające zmianie jednego z parametrów, np. współczynnika załamania ośrodka wewnątrz interferometru. Model ten został wykorzystany po raz pierwszy w pracach nad światłowodowym czujnikiem hematokrytu [6].

Podczas współpracy z grupą naukowców z Université Montpellier 2 (Montpellier, Francja) zajmującą się innowacyjnymi technologiami wytwarzania materiałów elektronicznych dyskutowano możliwość wykorzystania warstw nakładanych techniką ALD w konstrukcji interferometru Fabry'ego-Perota. Warstwy te charakteryzują się dobrą jakością, lecz ich grubość jest ograniczona do ok. 250 nm przez maksymalny akceptowalny czas trwania procesu.

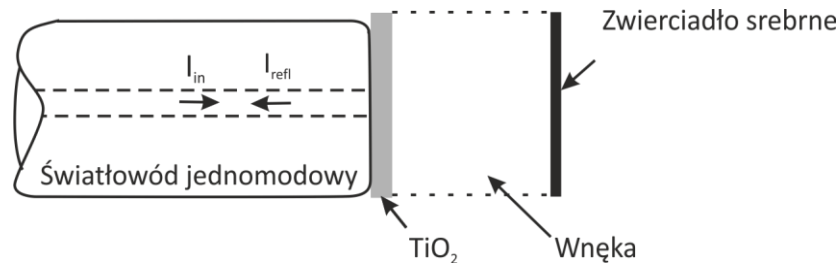
W wyniku przeprowadzonego modelowania stwierdziłem, iż możliwe jest wykonanie interferometru Fabry'ego-Perota z warstwą czynną nałożoną techniką ALD na czoło światłowodu i wypełniającą wnękę interferometru. Jeżeli grubość warstwy nie będzie znacząco mniejsza od 250 nm, a materiał będzie miał wysoki współczynnik załamania ($n \geq 1,80$), to interferometr będzie pracował przy długości fali w zakresie pierwszego okna telekomunikacyjnego, tj. 800 – 1000 nm. Warstwy materiałów o niższej grubości lub mniejszym współczynniku załamania mogą zostać wykorzystane do zmiany właściwości optycznych interferometru lub jego ochrony przed wpływem środowiska.

Interferometr Fabry'ego-Perota z warstwą tlenku cynku (ZnO) o współczynniku załamania ok. 1,90 i grubości ok. 310 nm, osadzoną techniką ALD na czoło światłowodu, został wykonany i zastosowany w interferometrycznym światłowodowym czujniku temperatury opisanym w pracy [7]. Interferometr pracował w trybie odbiciowym, źródłem promieniowania optycznego była dioda superluminescencyjna (SLD) o środkowej długości fali 932 nm, zaś rolę układu detekcji spełniał analizator widma optycznego. Opracowany czujnik został poddany wzorcowaniu za pomocą kalibratora temperatury. W trakcie tego procesu dokonano rejestracji widm odpowiadających wybranym temperaturom.

Przebadano światłowodowy interferometryczny czujnik współczynnika załamania [9], w którym zastosowano warstwy wykonane techniką ALD do modyfikacji charakterystyki widmowej interferometru Fabry'ego-Perota. Dla potrzeb tych prac zmodyfikowałem opracowany przeze mnie model matematyczny interferometru Fabry'ego-Perota tak, by można było wyznaczać charakterystyki interferometru Fabry'ego-Perota z wnęką, w której znajduje się cienka warstwa (<200 nm) wykonana techniką ALD. W interferometrze pomiarowym przebadano warstwy tlenku cynku ZnO o grubościach 50 nm, 100 nm i 200 nm naniesione na czoło standardowego światłowodu jednomodowego SMF-28. Dokonano optymalizacji długości wnęki interferometru i grubości warstw ZnO w celu uzyskania jak najlepszej widzialności sygnału widma przy długościach fali 1300 nm i 1550 nm. Następnie dokonano pomiarów współczynnika załamania wybranych cieczy – cykloheksanu, toluenu i benzenu. Wyniki pomiarów wykazywały dobrą zgodność z danymi referencyjnymi. Błąd względny, który wyznaczyłem teoretycznie, wynosił $\Delta n/n = 6,6 \cdot 10^{-4}$, co daje błąd bezwzględny Δn ok. 0,001 dla $n = 1,5$ [9]. W wyniku zastosowania warstw ZnO możliwe było nie tylko uzyskanie wyższego poziomu sygnału ale także znaczne rozszerzenie zakresu pomiarowego współczynnika załamania, w porównaniu do interferometru czujnikowego wykorzystującego odbicie od powierzchni czołowych światłowodu. Zakres ten obejmuje wartości od 1,00 przynajmniej do 1,60, pozwalając na pomiar współczynnika załamania m.in. w zastosowaniach biomedycznych.

Dalsze badania nad zastosowaniem warstw wykonanych techniką ALD do modyfikacji charakterystyki widmowej interferometru Fabry'ego-Perota miały na celu ocenę

możliwości zastosowania innych materiałów oraz ocenę przydatności tak wykonanego interferometru do badania właściwości materiałów biologicznych. W trakcie badań dokonałem modelowania współczynnika odbicia i współczynnika transmisji cienkich warstw wykonanych z dwutlenku tytanu (TiO_2) oraz z tlenku glinu (Al_2O_3), oraz charakterystyk interferometrów wykorzystujących takie warstwy. Na podstawie uzyskanych wyników, przedstawionych w [11], zaprojektowano i wykonano interferometr Fabry'ego-Perota pracujący w trybie odbiciowym, w którym wykorzystano warstwę TiO_2 o grubości 80 nm osadzoną w procesie ALD na powierzchni czołowej światłowodu jednomodowego typu SMF-28 (Rysunek 13).



Rysunek 13. Przekrój interferometru Fabry'ego-Perota wykorzystującego warstwę materiału osadzoną w procesie ALD na powierzchni czołowej światłowodu.

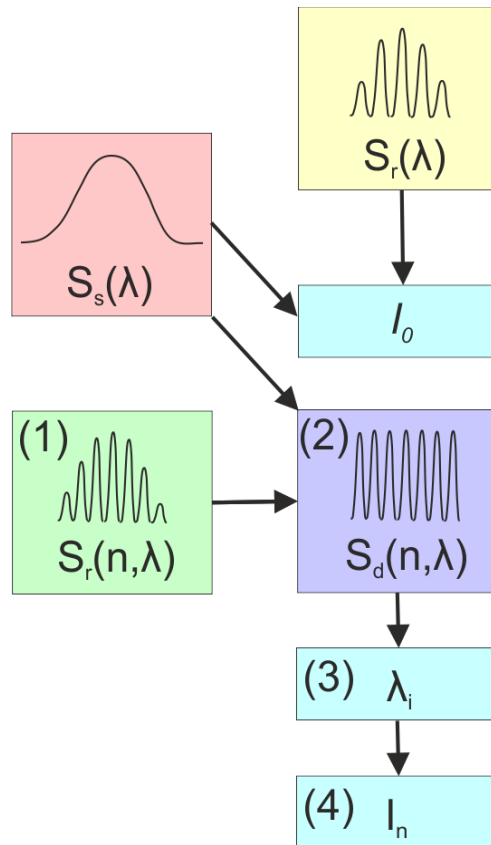
Interferometr ten został zastosowany w interferometrycznym światłowodowym czujniku współczynnika załamania. W badaniach użyto dwóch źródeł szerokopasmowych, których środkowe długości fali wynosiły odpowiednio 1290 nm i 1550 nm oraz analizatora widma optycznego spełniającego rolę układu detekcji.

Właściwości tego interferometru zostały przebadane dla różnych długości wnęki rezonansowej wypełnionej powietrzem. Następnie dokonano pomiaru współczynnika załamania benzenu, wynoszącego 1,4769 dla długości fali 1550 nm. Ponieważ współczynnik załamania rdzenia światłowodu SMF-28 przy tej długości fali wynosi 1,468, pomiar taki byłby praktycznie niewykonalny za pomocą interferometru bez warstwy TiO_2 , ze względu na prawie całkowity zanik promieniowania odbitego od powierzchni granicznej światłowód-benzen i spowodowany tym zanik interferencji.

W celu oceny możliwości zastosowania opracowanego interferometru do pomiarów biomedycznych dokonano pomiarów współczynników załamania 1% roztworu glukozy i roztworu hemoglobiny 13.4 g/dL. Zmierzone współczynniki załamania wynosiły odpowiednio 1,3940 i 1,2958 dla długości fali 1550 nm [11].

Do wykonania pomiarów współczynnika załamania opracowałem algorytm obróbki danych, wyznaczający wartość wielkości mierzonej na podstawie widma promieniowania optycznego zarejestrowanego przez układ detekcji, którym był analizator widma optycznego. Wielkością mierzoną była długość drogi optycznej we wnęce interferometru lub współczynnik załamania materiału znajdującego się w tej wnęce.

Działanie algorytmu było następujące (Rysunek 14). Przed rozpoczęciem pomiarów dokonywano rejestracji charakterystyki widmowej $S_s(\lambda)$ źródła promieniowania optycznego stosowanego w czujniku oraz charakterystyki widmowej $S_r(\lambda)$ promieniowania optycznego odbitego od czujnikowego interferometru Fabry’ego-Perota, którego wnętrza była wypełniona powietrzem. Na tej podstawie wyznaczano wartość I_0 długości geometrycznej wnętrza interferometru.



Rysunek 14. Schemat blokowy algorytmu detekcji. Objasnienia w tekście.

Pomiary przebiegały w następujący sposób. W pierwszym kroku (1) dokonywano rejestracji charakterystyki widmowej $S_r(n, \lambda)$ promieniowania optycznego odbitego od interferometru czujnikowego którego wnętrza była wypełniona badanym ośrodkiem o współczynniku załamania n .

Następnie (2) dokonywano eliminacji wpływu charakterystyki źródła na położenie maksimum $S_r(n, \lambda)$ poprzez wyznaczenie:

$$S_d(n, \lambda) = \frac{S_r(n, \lambda)}{S_s(\lambda)}. \quad (8)$$

W trzecim kroku (3) wyznaczano położenia λ_i trzech ($i=3$) lub pięciu ($i=5$) maksimum charakterystyki $S_d(n, \lambda)$. W obliczeniach stosowano aproksymację wierzchołków charakterystyki za pomocą funkcji kwadratowej i wyznaczenie λ_i jako maksimum funkcji aproksymującej. Pozwalało to uzyskiwać rozdzielczość λ_i znacznie lepszą od rozdzielczości

pomiaru analizatora. W kolejnym kroku (4), na podstawie wyznaczonych wartości λ_i wyznaczano wartość długości drogi optycznej l_n wnęki interferometru.

Ponieważ:

$$l_n = n \cdot l_0, \quad (8)$$

gdzie l_0 – długość geometryczna wnęki interferometru, współczynnik załamania otrzymujemy dzieląc l_n przez l_0 .

Opracowany algorytm został przetestowany na danych wygenerowanych za pomocą wcześniej opisanego modelu interferometru Fabry'ego-Perota z uwzględnieniem szumów układu detekcji. Różnice między wartościami l_0 i n użytymi w generacji danych a wartościami l_0 i n wyliczonymi na podstawie tych danych były zgodne z przewidywaniami. Po przeprowadzeniu serii testów algorytm został zastosowany do obróbki uzyskanych danych pomiarowych.

D. Opracowanie nowych układów pomiarowych

W ramach zrealizowanego cyklu badań opracowałem dwa układy pomiarowe wykorzystujące interferometrię polaryzacyjną. Układy te charakteryzują się prostą budową, bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi i umożliwiają jednoznaczne określenie kierunku zmian różnicy faz interferujących wiązek promieniowania optycznego bez konieczności stosowania technik heterodynowych. Istotną cechą tych układów jest możliwość zastosowania w nich płytek falowych wykonanych z polimerów ciekłokrystalicznych na powierzchni elementów optycznych.

Pierwszym opracowanym przeze mnie układem był czujnik przemieszczenia wykorzystujący interferometr polaryzacyjny z płytkami falowymi. Czujnik ten, opisany w pracy [5] i przedstawiony na rysunku 15, charakteryzuje się czułością dwukrotnie większą od czułości interferometrów Michelsona czy Twymanna-Greena. Zastosowane w nim płytki opóźniające – półfalowa HWP i ćwierćfalowa QWP – mogą być wykonane z polimerów ciekłokrystalicznych bezpośrednio na powierzchni polaryzacyjnego dzielnika wiązki PBS.

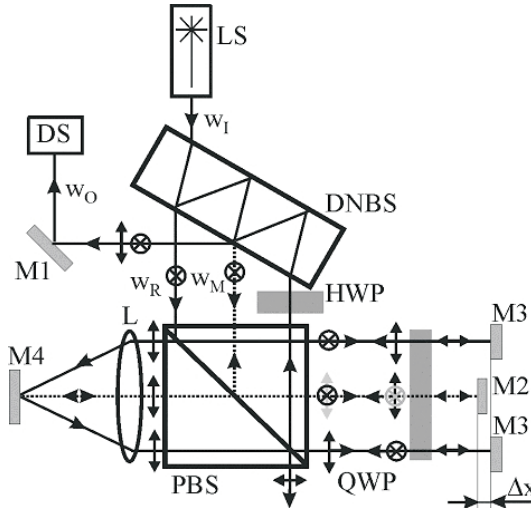
Omawiany czujnik pracuje w oparciu o zmodyfikowany przeze mnie polaryzacyjny interferometr dwuwiązkowy [Roberts 1977], w którym mierzona jest odległość Δx pomiędzy zwierciadłami odniesienia M3 i M3' a zwierciadłem pomiarowym M2. W układzie tym wiązka pomiarowa w_M odbija się od zwierciadła M2 dwukrotnie, zaś wiązka odniesienia w_R odbija się od zwierciadła M3, a następnie od zwierciadła M3'. W wyniku tego różnica dróg optycznych Δl odpowiadająca odległości Δx wynosi

$$\Delta l = 4n\Delta x, \quad (8)$$

gdzie n – współczynnik załamania ośrodka, w którym znajduje się interferometr i jest

dwukrotnie większa od analogicznej różnicy dróg optycznych w interferometriach Michelsona i Twymanna-Greena.

Stabilność czujnika została przebadana w układzie pomiarowym wykorzystującym aktuator piezoelektryczny.



Rysunek 15. Interferometr polaryzacyjny do pomiaru przesunięcia

Zwierciadło M2 zamocowano do końcówki aktuatora typu P-841.20 (Physik Instrumente GmbH) współpracującego z kontrolerem cyfrowym E655XR zapewniającym stabilność położenia lepszą niż 1 nm. Przeprowadzono badania stabilności interferometru obejmujące wpływ zmiany długości fali lasera i niestabilność konstrukcji mechanicznej. Wartość międzyszczytowa dryftu mierzona w czasie 32 s wynosiła 9 nm, co jest wynikiem dobrym.

Znajomość wartości chwilowej długości fali emitowanej przez laser przestrajalny z rozdzielczością pojedynczych pikometrów jest wymagana w licznych układach optycznej tomografii niskokoherencyjnej (OCT), polarymetrii spektralnej oraz w światłowodowych polarymetrycznych sensorach rozłożonych. Zwykle lasery przestrajalne pozwalają na odczyt długości fali z rozdzielczością 0,1 nm, co powoduje konieczność zastosowania miernika długości fali, zwykle wykorzystującego interferometr Fizeau lub przestrajalny interferometr Fabry'ego-Perota.

Drugim opracowanym przeze mnie układem był interferometryczny czujnik zmiany długości fali, przeznaczony do pomiaru zmiany długości fali lasera przestrajalnego. Czujnik ten, opisany w pracach [8], [10] i przedstawiony na rysunku 16, jest wolny od większości wad mierników długości fali.

W wyniku zastosowania płytki opóźniającej $\lambda/8$ z polimeru ciekłokrystalicznego, wykonanej na powierzchni zwierciadła M1, moc promieniowania optycznego padającego

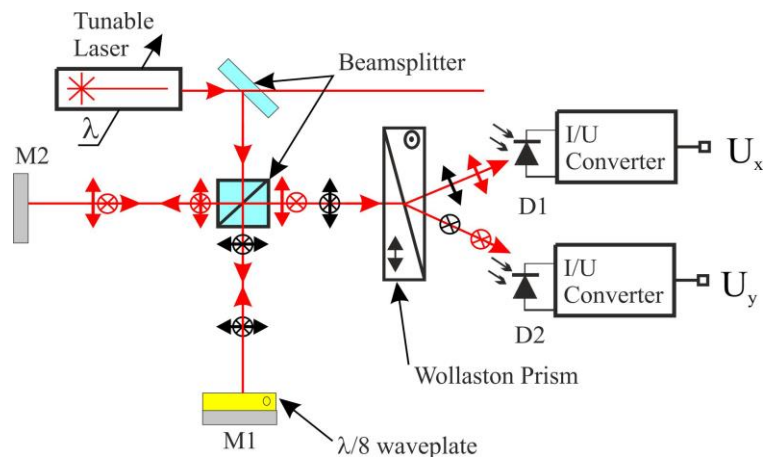
na detektory D1 i D2 wyraża się wzorem:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{I_0}{4} [1 + \cos \varphi] \\ I_2 &= \frac{I_0}{4} [1 + \sin \varphi] \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie φ – różnica faz interferujących wiązek,
dana wzorem:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l, \quad (10)$$

gdzie λ – długość fali, Δl – różnica dróg optycznych pomiędzy ramionami interferometru.



Rysunek 16. Interferometr polaryzacyjny do pomiaru zmiany długości fali lasera przestrajalnego

Składowe zmienne sygnałów I_1 oraz I_2 są przesunięte względem siebie o 90° ($\pi/4$ rad). Pozwala to na jednoznaczne określenie kierunku zmian φ , a tym samym λ , niezależnie od jej chwilowej wartości, oraz na śledzenie zmian φ w zakresie większym niż 2π . W przypadku, gdy dzielnik wiązki zastosowany w interferometrze wprowadza niepożądaną zmianę fazy, opóźnienie płytki $\lambda/8$ może być dobrane w taki sposób, by zmiany te zostały skompensowane, a różnica faz pomiędzy składowymi zmiennymi sygnałów I_1 oraz I_2 wynosiła 90° .

Przedstawiony czujnik został zastosowany do pomiaru zmian długości fali emitowanej przez półprzewodnikowy laser przestrajalny pracujący w zakresie 628 nm – 635 nm [10]. Uzyskano rozdzielczość pomiaru 2 pm, zaś błąd powodowany przez niestabilność konstrukcji optomechanicznej wynosił 1,3 pm.

W porównaniu do rozwiązań wykorzystujących przestrajalne interferometry Fabry'ego-Perota, omawiany czujnik charakteryzuje się brakiem części ruchomych, ograniczających szybkość pomiaru. Umożliwia on także łatwą zmianę zakresu pomiaru długości fali

poprzez zmianę różnicy dróg optycznych w ramionach interferometru.

Omawiany czujnik nie wymaga także stosowania skomplikowanych i czasochłonnych metod obróbki sygnału, wymaganych np. w przypadku pomiaru długości fali za pomocą interferometru Fizeau współpracującego z liniowym detektorem CCD.

Podsumowanie

Podsumowując moje dokonania w zakresie projektowania, budowy i wykorzystania układów pomiarowych wykorzystujących interferometrię, oraz zastosowania w nich innowacyjnych materiałów, pragnę wymienić moje osiągnięcia:

- opracowanie, implementację i zastosowanie wektorowej metody opisu propagacji wiązki promieniowania optycznego w jednoosiowych materiałach dwójłomnych umożliwiającej wyznaczenie amplitud wiązek odbitych i przechodzących,
- opracowanie, realizację i wykorzystanie technologii wykonania wybranych elementów dwójłomnych z ciekłych kryształów i z polimerów ciekłokrystalicznych,
- opracowanie, realizację i wykorzystanie interferometrycznego czujnika przemieszczenia i czujnika zmiany długości fali z płytką falową z polimerów ciekłokrystalicznych do pomiaru wartości chwilowej długości fali lasera przestrajalnego,
- udział w opracowaniu konstrukcji interferometrów światłowodowych wykorzystujących cienkie warstwy wytwarzane w technologii osadzania warstw atomowych (ang. *Atomic Layer Deposition – ALD*),
- opracowanie i zastosowanie metody pozyskiwania informacji o wartości mierzonej przez interferometryczne czujniki światłowodowe z cienkimi warstwami wytwarzanymi w technologii ALD.

Wymienione wyżej osiągnięcia przedstawiłem w pracach, które tworzą cykl jedenastu publikacji naukowych. Trzy z tych publikacji zostały opracowane przeze mnie samodzielnie. Dziewięć artykułów zostało wydanych w czasopismach indeksowanych w bazie ISI Journal Citation Reports, które są sklasyfikowane tematycznie w bazie JCR jako: „Engineering, Electrical & Electronic”, „Instruments & Instrumentation”, „Physics, Multidisciplinary”, „Optics”.

W publikacjach [1-3] zaprezentowałem rezultaty prac związanych z opracowaniem i zastosowaniem metody opisu propagacji promieniowania optycznego w jednoosiowych materiałach i elementach dwójłomnych. Rezultaty prac w zakresie technologii wykonania wybranych elementów dwójłomnych z ciekłych kryształów i z polimerów ciekłokrystalicznych omówiłem w pracy [4], zaś opracowane przeze mnie czujniki przemieszczenia i zmiany długości fali zostały omówione w pracach [5], [8] i [10].

Wyniki prac nad konstrukcją interferometrów światłowodowych wykorzystujących cienkie warstwy wytwarzane w technologii ALD zostały przedstawione w pracach [6], [7], [9] i [11]. W pracy [11] przedstawiono także wyniki zastosowania metody pozyskiwania informacji o wartości mierzonej przez te interferometry.

Literatura

- [Aasi 2015] J. Aasi *et. al.*, *Advanced LIGO*, *Classical and Quantum Gravity*, 32 (2015) 074001
- [Boer 2002] G. Boer, T. Scharf, R. Dandliker, Compact static Fourier transform spectrometer with a large field of view based on liquid-crystal technology *Applied Optics*, 41(1), (2002), 1400–1407.
- [Born 1996] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, London 1996 (Sixth edition).
- [Chen 2016] J. Chen, W. Cranton, M. Fihn (eds.), *Handbook of Visual Display Technology* Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [Drexler 2015] W. Drexler, J. G. Fujimoto (Eds.), *Optical Coherence Tomography - Technology and Applications*, 2nd Edition, Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
- [Grattan 2000] K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, *Optical Fiber Sensor Technology*, Kluwer Academic Publisher, Boston, 2000.
- [Heydemann 1981] P. L. M. Heydemann, Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers, *Applied Optics* 20, (1981), 3382-3384.
- [Jaroszewicz 2011] L.R. Jaroszewicz, Z. Krajewski, H. Kowalski, G. Mazur, P. Zinówko, J. Kowalski, AFORS Autonomous Fibre-Optic Rotational Seismograph: Design and Application, *Acta Geophys.*, 59(3), (2011), 578-596.
- [Lee 2014] K.R. Lee, Y.K. Park, Quantitative phase imaging unit *Optics Letters*, 39(12), (2014), 3630-3633.
- [Lukosz 1997] W. Lukosz, Ch. Stamm, H.R. Moser, R. Ryf, J. Diibendorfer, Difference interferometer with new phase-measurement method as integrated-optical refractometer, humidity sensor and biosensor, *Sensors and Actuators B* 38-39 (1997) 316-323.
- [Marcuse 1982] D. Marcuse, *Light Transmission Optics*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York 1982, p. 339.
- [Nowinowski 2012] E. Nowinowski-Kruszelnicki *et. al.*, High birefringence liquid crystal mixtures for electro-optical devices, *Optica Applicata*, 42(1), (2012), 167 – 180.
- [Pluta 1982] M. Pluta, *Mikroskopia optyczna*, PWN Warszawa, 1982.
- [Pluta 1988] M. Pluta, *Advanced light microscopy*, PWN Warszawa, 1988.
- [Restaino 2015] S. R. Restaino, S. W. Teare, *Introduction to Liquid Crystals for Optical Design and Engineering*, SPIE Press, Bellingham, 2015.
- [Roberts 1977] R. B. Roberts, Absolute dilatometry using a polarization interferometer, *Journal of Physics E: Scientific Instrumentation*, 8 (1974), 600–602.

- [Stadt 1985] H. van de Stadt, J. M. Muller, Multimirror Fabry-Perot interferometers, *Journal of Optical Society of America A* 2(8) (1985), 1363-1370.
- [Szivessy 1928] G. Szivessy, *Licht als Wellenbewegung*, Handbuch der Physik, Vol. 20, Springer, Berlin 1928.
- [Trollinger 1991] J. D. Trollinger, R. A. Chipman, D. K. Wilson, Polarization ray tracing in birefringent media, *Optical Engineering*, 40 (1991), p. 461.
- [Zheng 2016] Y. Zheng *et. al.*, Miniature pH Optical Fiber Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **22**(2) (2016), 5600205.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Poza cyklem publikacji powiązanych tematycznie, moje osiągnięcia naukowo-badawcze obejmują zgłoszenie patentowe, inne publikacje (w tym 9 z listy JCR) oraz prezentacje konferencyjne.

W tematyce prowadzonych przeze mnie badań można wskazać cztery podstawowe obszary:

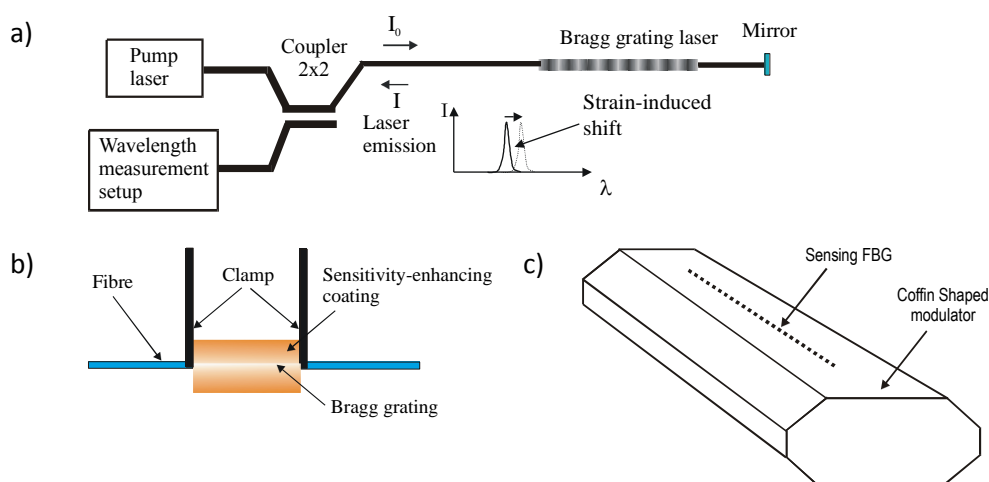
- a) sensory światłowodowe,
- b) optyczne techniki pomiarowe,
- c) termiczne detektory podczerwieni,
- d) techniki wspomaganie orientacji osób niewidomych.

ad a.

Moje badania prowadzone w zakresie *sensorów światłowodowych* dotyczyły przede wszystkim projektowania, modelowania i badania hydrofonów światłowodowych, światłowodowych sensorów rozłożonych wykorzystujących optyczną reflektometrię w dziedzinie czasu, sensorów rozłożonych wykorzystujących reflektometrię optyczną w dziedzinie częstotliwości.

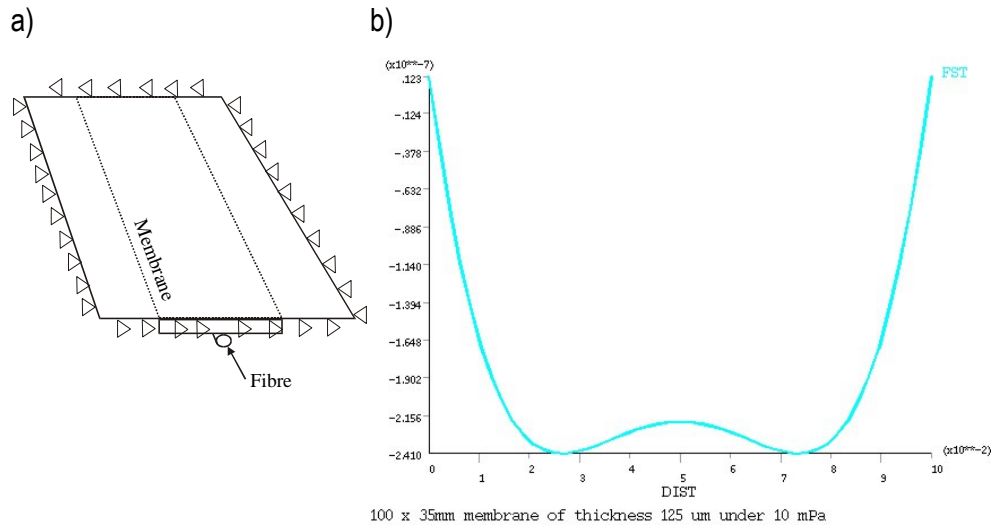
Badania w zakresie hydrofonów światłowodowych prowadzone były w ramach rocznego stypendium Akademii Fińskiej, które odbyłem w VTT Technical Research Center of Finland (Oulu, Finlandia). Obejmowały one przede wszystkim projektowanie i modelowanie wybranych konstrukcji hydrofonów. Obiektem badań były: hydrofony wykorzystujące aktywne światłowodowe siatki Bragga, oraz hydrofony interferometryczne.

Przykładową konstrukcję hydrofonu wykorzystującego światłowodową siatkę Bragga przedstawiono na Rysunku 17.



Rysunek 17. Hydrofon wykorzystujący światłowodową siatkę Bragga. a) schemat blokowy, b), c) przetworniki pomiarowe [Wierzbą 2005].

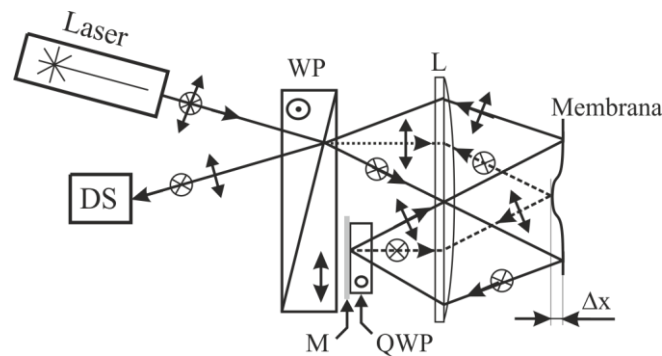
Ważnym zagadnieniem w tej konstrukcji było zapewnienie właściwego przeniesienia ciśnienia hydrostatycznego na światłowodową siatkę Bragga. Jednym z opracowanych rozwiązań było zastosowanie membrany ze wzmocnioną częścią środkową (Rysunek 18a).



Rysunek 18. a) Membrana przetwornika pomiarowego z Rys. 17c, b) rozkład składowej wzdłużnej wydłużenia na tej membranie [Wierzba 2005].

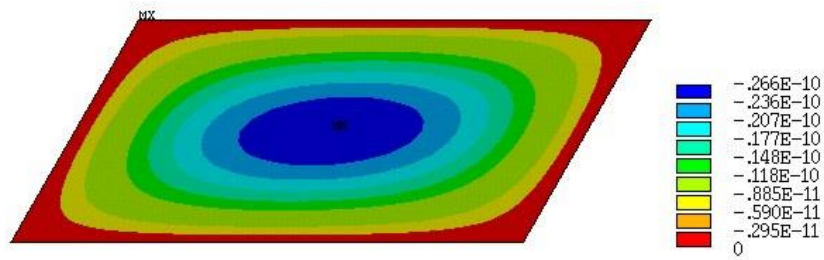
Konstrukcja ta zapewniła dobrą stałość składowej wzdłużnej wydłużenia siatki, potwierdzoną modelowaniem z użyciem Metody Elementów Skończonych (Rys. 18b).

Kolejnym badanym rozwiązaniem był hydrofon dokonujący pomiaru odchylenia membrany Δx za pomocą interferometru przedstawionego na rysunku 19.



Rysunek 19. Pomiar odchylenia membrany za pomocą interferometru. WP – pryzmat Wollastona, L – soczewka, QWP – ćwierćfalówka, M – zwierciadło, DS – układ detekcji [Wierzba 2003].

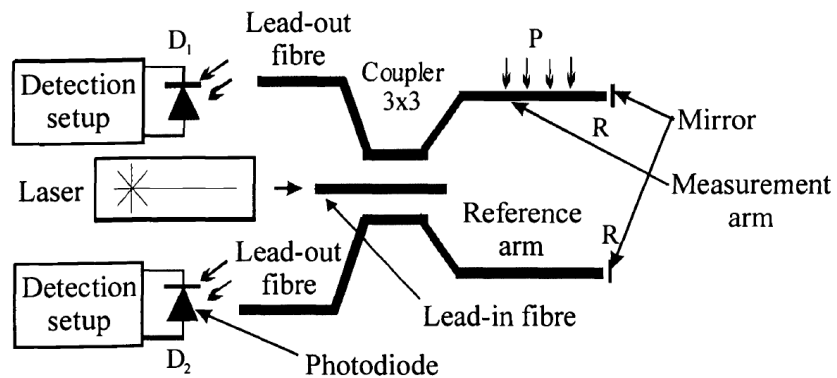
Konstrukcja ta, w połączeniu z odpowiednią membraną, zapewnia dobrą czułość, której wartość określono za pomocą modelowania z użyciem Metody Elementów Skończonych (Rys. 20).



2 x 1mm membrane of thickness 25 um under pressure of 10 mPa

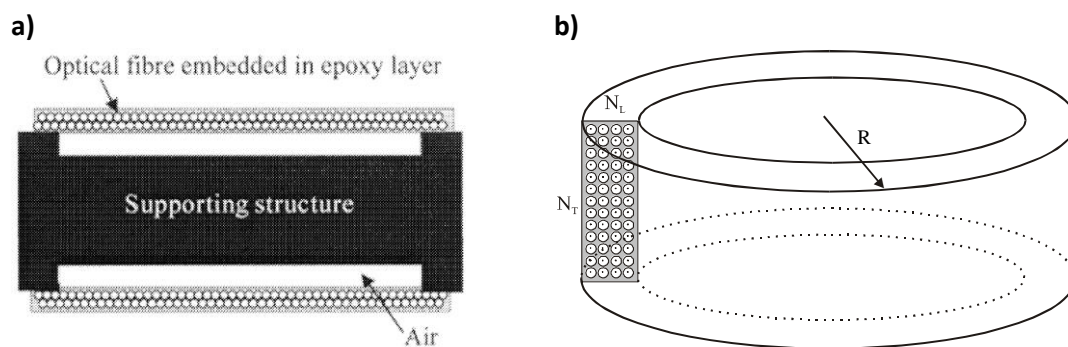
Rysunek 20. Rozkład składowej pionowej odkształcenia membrany przetwornika pomiarowego z Rys. 19 [Wierzba 2003].

Najciekawszym z badanych rozwiązań był hydrofon światłowodowy w układzie interferometru Michelsona [Wierzba 2004], przedstawiony schematycznie na Rysunku 21. W hydrofonie tym zastosowano sprzęgacz światłowodowy 3x3, umożliwiający jednoznaczne określenie kierunku zmian różnicy faz interferujących wiązek, na podstawie sygnałów z fotodiod D_1 i D_2 .



Rysunek 21. Hydrofon światłowodowy w układzie interferometru Michelsona ze sprzęgaczem 3x3 [Wierzba 2004]

W przetworniku pomiarowym, którego przekrój przedstawiono na Rysunku 22a, wykorzystano światłowód nawinięty w postaci toroidu i zatopiony w warstwie żywicy epoksydowej (Rysunek 22b).



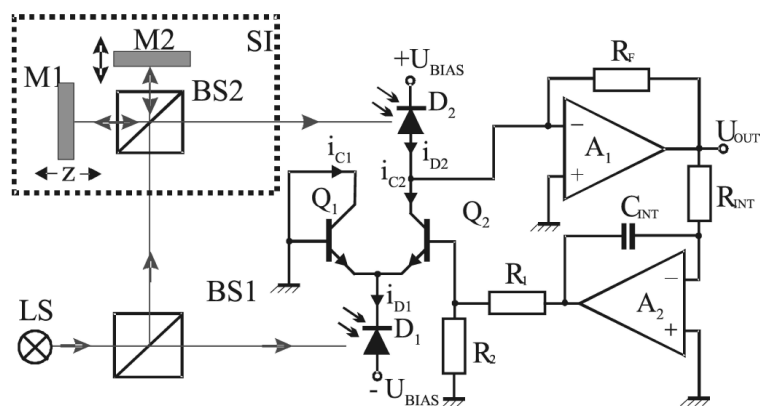
Rysunek 22. Cylindryczny przetwornik pomiarowy światłowodowego hydrofonu interferometrycznego. a) przekrój, b) schemat części światłowodowej [Wierzba 2004].

Wykorzystując oprogramowanie do analizy metodą elementów skończonych stworzyłem model cylindrycznego przetwornika pomiarowego umieszczonego w środowisku wodnym. Model ten umożliwił wyznaczenie rozkładu naprężeń w przetworniku, wywołanych działaniem fali akustycznej o zadanej częstotliwości, a na tej podstawie wyznaczenie zmian fazy promieniowania optycznego propagowanego w światłowodzie przetwornika.

W wyniku przeprowadzonego modelowania stwierdzono, że czułość przetwornika jest wystarczająca dla przewidywanych zastosowań, zaś pasmo użyteczne częstotliwości pracy zależy od konstrukcji przetwornika i wynosi od 2 kHz do ok. 4 kHz, co pozwala na wykorzystanie tych przetworników w większości zastosowań hydrofonów. Dalsze prace, o charakterze eksperymentalnym, nad tymi przetwornikami były prowadzone przez VTT we współpracy z partnerem przemysłowym. Ze względu na poufny charakter projektu, ich wyniki nie zostały opublikowane.

Ad b.

Badania prowadzone w zakresie *optycznych technik pomiarowych* dotyczyły wykorzystania nowych technik detekcji w interferometrii optycznej, technicznych zastosowań optycznej tomografii niskokoherentnej (OCT) [Jędrzejewska 2004] oraz wpływu polaryzacji na pracę systemów OCT. W ramach tych badań zaprojektowałem i wykonałem m.in. układ zrównoważony układ detekcji współpracujący z interferometrami pomiarowymi i systemami OCT [Pluciński 2008], przedstawiony schematycznie na rysunku 23.



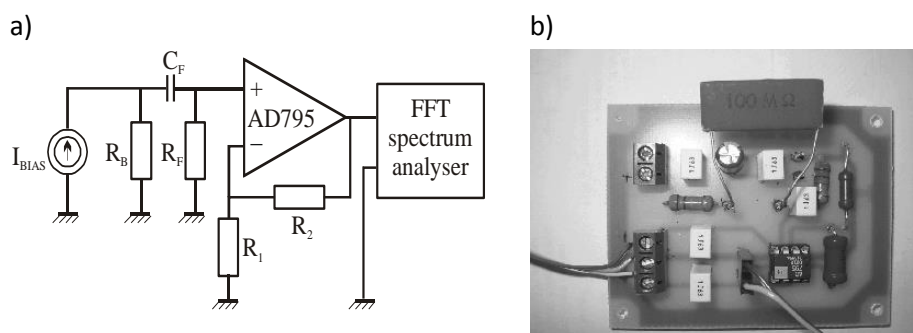
Rysunek 23. Interferometryczny system pomiarowy z detekcją zrównoważoną. LS – źródło światła, BS1, BS2 – dzielniki wiązki, SI – interferometr pomiarowy, M1, M2 – zwierciadła, z – mierzone przesunięcie [Pluciński 2008].

Uczestniczyłem także w projektowaniu systemów OCT niewrażliwych na zmianę stanu polaryzacji wiązki odbitej od obiektu badanego, oraz systemu OCT umożliwiającego określenie właściwości polaryzacyjnych obiektu badanego tzw. PS-OCT (ang. *Polarization-Sensitive OCT*).

Ad c.

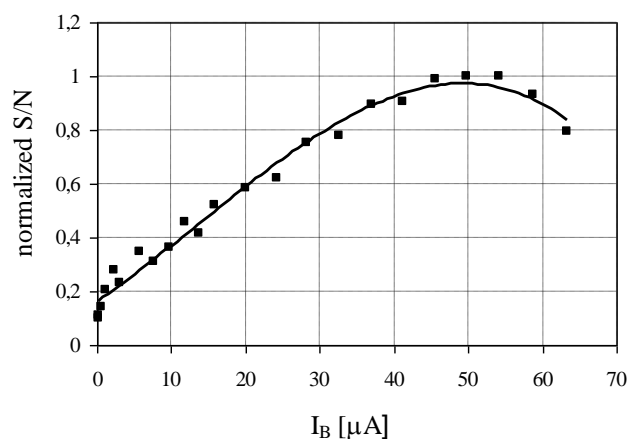
Moje badania nad *termicznymi detektorami podczerwieni* dotyczyły przede wszystkim zastosowania niestechiometrycznych lantanowo-strontowo żelazowych tlenków (LSFO) oraz lantanowo-strontowo kadmowych tlenków (LSCO) typu perowskitu w bolometrycznych detektorach podczerwieni. Warstwy tych materiałów były wytwarzane w technologii *sol-żel* we współpracy z prof. Andrzejem Łozińskim z Akademii Morskiej w Gdyni. Prowadzone przeze mnie prace obejmowały przede wszystkim badanie zależności szumów i termicznej stałej czasowej od kompozycji materiału, parametrów procesu technologicznego i warunków pracy struktury.

Realizacja tych badań wymagała wykonania specjalizowanych układów optoelektronicznych i stanowisk pomiarowych. W szczególności zaprojektowałem i wykonałem dwa stanowiska do pomiaru szumów detektorów termicznych, z których jedno przedstawiono schematycznie na rysunku 24.



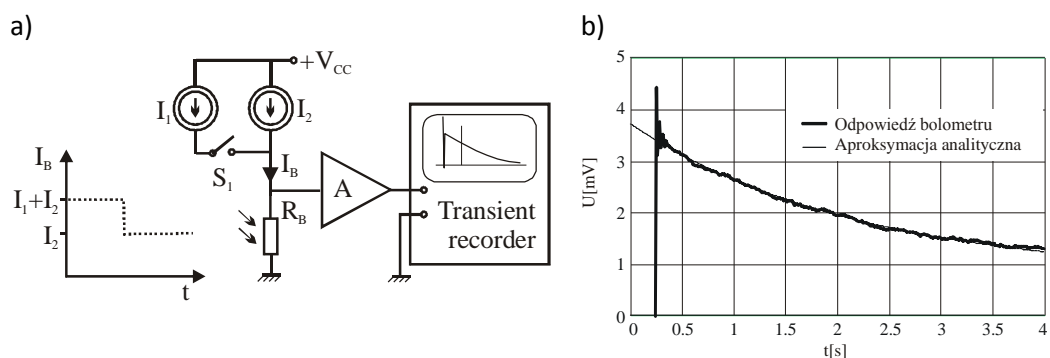
Rysunek 24. Układ do pomiaru szumów bolometrów o dużej rezystancji (a) schemat blokowy, (b) widok płytki przedwzmacniacza [Wierzba 2005a].

Stanowiska te umożliwiały pomiar gęstości widmowej szumów bolometrów o rezystancji od $1\text{ k}\Omega$ do kilkudziesięciu $\text{M}\Omega$ w zakresie od 5 Hz do 1 kHz . W trakcie pomiarów bolometry były polaryzowane za pomocą źródła prądowego, co umożliwiało m.in. badanie zależności stosunku sygnał/szum od prądu polaryzacji (Rysunek 25).



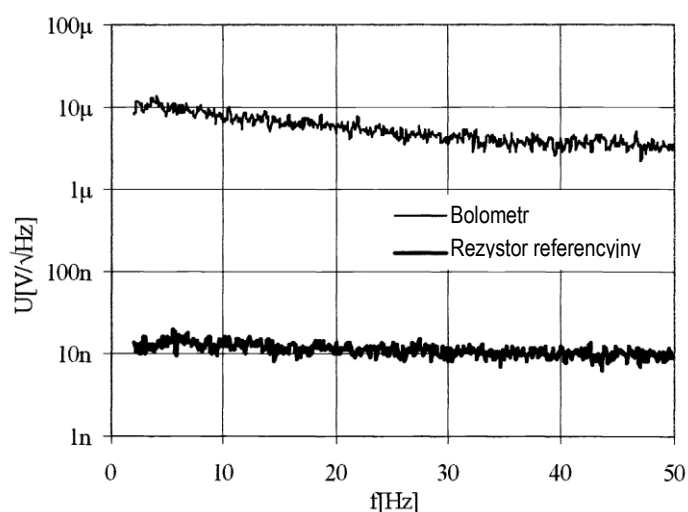
Rysunek 25. Zależność znormalizowanego stosunku sygnał/szum od prądu polaryzacji bolometru [Łoziński 2006]

Do pomiaru wartości termicznej stałej czasowej wykonałem stanowisko przedstawione schematycznie na rysunku 26a. Rejestrując odpowiedź bolometru na zmianę wartości prądu polaryzacji (rysunek 26b) i dokonując jej aproksymacji wyznaczano wartość termicznej stałej czasowej.



Rysunek 26. Układ do pomiaru termicznej stałej czasowej bolometrów z pobudzeniem elektrycznym. (a) schemat blokowy, (b) odpowiedź bolometru [Wierzba 2006].

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdziłem, że warstwy LSFO i LSCO charakteryzują się dużym temperaturowym współczynnikiem rezystancji (TWR) wynoszącym kilka %/K. Niestety, pomimo wysiłków nie udało się obniżyć poziomu ich szumów nadmiarowych do wartości porównywalnej z szumami Johnsona (Rysunek 27). Dlatego też, nie podjęto prac o charakterze wdrożeniowym nad detektorami wykonanymi z warstw LSFO i LSCO.



Rysunek 27. Charakterystyka widmowa gęstości widmowej napięcia szumów bolometru ($R_B=5,7 \text{ k}\Omega$) i rezystora referencyjnego ($R_R=5,7 \text{ k}\Omega$) [Łoziński 2006].

Ad. d.

Moje badania w zakresie *wsparcia orientacji osób niewidomych* obejmowały systemy wykrywania przeszkód wykorzystujące triangulację optyczną oraz techniki ultradźwiękowe z formowaniem wiązki. Były one prowadzone w zespole badawczym pod kierunkiem dr. inż. Ryszarda Kowalika i dr. hab. inż. Bogdana B. Kosmowskiego. W ramach tych prac opracowałem część optoelektroniczną systemu wykorzystującego triangulację optyczną w podczerwieni [Wierzba 2002] oraz

brałem udział w opracowaniu ultradźwiękowego wykrywacza przeszkód wykorzystującego technikę formowania wiązki [Strąkowski 2006].

Po uzyskaniu stopnia doktora otrzymałem roczne stypendium Akademii Fińskiej, które odbyłem w VTT Technical Research Center of Finland. Kierowałem także dwoma i uczestniczyłem w realizacji czterech innych projektów badawczych finansowanych przez NCN, KBN i MNiSW. Aktualnie biorę udział w realizacji jednego projektu badawczego.

Znacząca część mojej działalności badawczej jest związana z komercjalizacją wyników badań naukowych. W szczególności, w ramach projektu rozwojowego pt. „Przenośne urządzenie do wykrywania śladowych ilości substancji chemicznych za pomocą zjawiska Ramana”, brałem udział w projektowaniu i realizacji optoelektronicznej części tego urządzenia oraz opracowaniu metod obróbki sygnału pomiarowego.

Od wielu lat biorę udział w popularyzacji nauki wśród osób spoza uczelni. Jestem współorganizatorem imprez organizowanych w Politechnice Gdańskiej w ramach Bałtyckiego Festiwalu Nauki, Pomorskiego Festiwalu Nauki oraz Dni Otwartych Politechniki Gdańskiej. Współpracuję także z kołami naukowymi działającymi w Katedrze Metrologii i Optoelektroniki, przede wszystkim w projektowaniu i realizacji układów optoelektronicznych.

Literatura

- [Jędrzejewska 2004] M. Jędrzejewska-Szczerska, A. Stańczak, **P. Wierzba**, R. Hypszer, Ultrahigh-resolution detection techniques for biomedical applications of optical coherent tomography, *Proceedings of SPIE* Vol. 5505, (2005).
- [Łoziński 2006] Łoziński A., **Wierzba P.**, Rydzewska S., Optimization of working conditions of thick-film LSFO bolometers, *Proceedings of SPIE*, vol. 6348, (2006).
- [Pluciński 2008] J. Pluciński, R. Hypszer, **P. Wierzba**, M. Strąkowski, M. Jędrzejewska-Szczerska, M. Maciejewski, and B.B. Kosmowski, Optical low-coherence interferometry for selected technical applications, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, **56**(2), 155-172 (2008).
- [Strąkowski 2006] M. R. Strąkowski, B. B. Kosmowski, R.Kowalik, **P. Wierzba**, An Ultrasonic Obstacle Detector Based on Phase Beamforming Principles, *IEEE Sensors Journal*, **6**(1), 179-186 (2006).
- [Wierzba 2002] **P. Wierzba**, Wykrywacz przeszkód dla niewidomych wykorzystujący triangulację. Materiały konferencyjne. VII Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne. COE 2002. Rzeszów, 5-8 czerwca 2002r. t. 1, s. 375-378.

- [Wierzba 2003] **P. Wierzba**, Optical Hydrophones, Raport naukowy VTT Technical Research Centre of Finland (VTT Electronics, Oulu, Finlandia), (2003).
- [Wierzba 2004] **P. Wierzba**, P. Karioja, Comprehensive modeling of interferometric hydrophone with self-supported mandrel transducer, Proc. SPIE 5576 (2004), doi:10.1117/12.581843
- [Wierzba 2005] **Wierzba P.**, Modeling of active fiber Bragg grating sensors, *Proceedings of SPIE*, vol. 5952, (2005).
- [Wierzba 2005a] **Wierzba P.**, Rydzewska S., Design of low noise preamplifiers for characterization of LSCO bolometers, *Proceedings of SPIE*, vol. 5957, (2005).

Skrócone zestawienie działalności naukowej²

I. Osiągnięcia naukowe:

I. Dorobek publikacyjny:

	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
Artykuły w czasopismach z bazy JCR	2	16
Rozdziały w książkach	-	-
Zgłoszenia patentowe	-	1
Wygłoszenie referatu na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	10	17 (1 zaproszony)

- Sumaryczny Impact Factor wszystkich prac: **18,878** (w tym 0,278 przed uzyskaniem stopnia doktora)
- Sumaryczny Impact Factor prac wchodzących w skład osiągnięcia: **12,299**
- H-Index: **7** (WoS),
- Liczba cytowań: **146/ 127**^(bez autocytowań) (WoS),

II. Staże zagraniczne:

- Stypendium Akademii Fińskiej w VTT Technical Research Centre of Finland, Oulu, Finlandia, 12 miesięcy — 2003-2004
- University of Oulu, Oulu, Finlandia — 06-08.1999, 09.2008, 06.2017
- VTT Technical Research Centre of Finland, Oulu, Finlandia — 06-08.1998, 06-08.1997, 06-08.1996,

III. Projekty badawcze:

- **Kierownik projektów (2):** finansowanych przez Komitet Badań Naukowych (1), Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowe Centrum Nauki (1)
- **Wykonawca w 5** projektach

² Stan na dzień 31 grudnia 2017r.

II. Działalność dydaktyczna i organizacyjna

- Koordynator Projektu Grupowego dla specjalności Optoelektronika
- Członek wydziałowej komisji ds. nagród Projektu Grupowego
- Opiekun 27 prac dyplomowych na studiach jednolitych magisterskich,
- Opiekun 11 prac dyplomowych inżynierskich na studiach dwustopniowych,
- Opiekun 8 prac dyplomowych magisterskich na studiach dwustopniowych,
- Opieka naukowa oraz merytoryczna (promotor pomocniczy) nad 1 pracą doktorską
- Recenzent artykułów w czasopismach z listy JCR (recenzje 5 manuskryptów)

III. Nagrody i wyróżnienia

- Brązowy Krzyż Zasługi
- Zespołowa nagroda Rektora Politechniki Gdańskiej stopnia za osiągnięcia naukowe w roku 2006

Paweł Wierzbka