

SPRAWOZDANIE ZE ZREALIZOWANYCH PRAC BADAWCZYCH – TEMAT 1

| | |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NR PROJEKTU | POIG.01.03.01-14-016/08-12 |
| Tytuł projektu | Nowe materiały fotoniczne i ich zaawansowane zastosowania |
| Kierownik projektu | prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz |
| Temat badawczy I | Otrzymanie nowych związków ciekłokrystalicznych oraz wytworzenie mieszanin użytkowych nematyków o zróżnicowanej anizotropii optycznej i elektrycznej, ferro- i antyferroelektrycznych smektyków oraz kompozytów ciekłokrystalicznych jak i badania ich zastosowań. |
| Koordynator Tematu I | prof. dr hab. inż. Krzysztof Czupryński |
| Realizowany podtemat lub podtematy według harmonogramu Projektu | Ciekłokrystaliczne modulatory światła – Zespół fizyczny pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zbigniewa Raszewskiego |
| Okres sprawozdawczy | 2009 - 2015 |

1. Wprowadzenie i geneza badań

Obserwowany w ostatnich latach intensywny przyrost aplikacji struktur i materiałów ciekłych ciekłokrystalicznych w nowoczesnych urządzeniach zobrazowania informacji, był związany z równoległym, coraz łatwiejszym dostępem do zminiaturyzowanych układów elektronicznych, umożliwiających sterowania tych urządzeń oraz sterowanie sygnałami o coraz mniejszych mocach. Ten zrównoważony rozwój „technologii LCD” i „elektroniki sterującej” spowodował, że w większości urządzeń powszechnego użytku, stosowane są obecnie wyświetlacze ciekłokrystaliczne LCD (*Liquid Crystal Display*). Drugim polem o rosnącym znaczeniu jest użycie struktur ciekłych kryształów jako ośrodka optycznego sterowanego polem elektrycznym, w specjalnych, aktywnych układach optycznych. Układy takie zastępują klasyczne elementy optyczne. Ponadto, stosując struktury ciekłokrystaliczne jako ośrodek aktywny optycznie, można wykreować elementy, których nie można wytworzyć „klasycznymi” metodami. Układy te służą do modulacji parametrów wiązki światła (stanu polaryzacji lub transmisji) jak i zmiany składu widmowego wiązki. Stosując ciekłokrystaliczne elementy optyczne eliminuje się konieczność stosowania ruchomych elementów mechanicznych, w ten sposób umożliwiając automatyzację sterowania i obniżając koszty realizacji zaawansowanych systemów optycznych. Dwuwymiarowa, płaska postać elementów ciekłokrystalicznych, umożliwia ponadto konstrukcję układów do przetwarzania informacji w oparciu o czasowo-przestrzenną modulację zarówno wiązek światła jak i promieniowania spójnego. W szczególnych przypadkach do tego celu stosuje się równoczesne sterowanie polem elektrycznym i sygnałem optycznym. W ostatnich latach wiele zainteresowania wzbudzają zastosowania ciekłych kryształów w światłowodowych włóknach fotonicznych. Włókna te wypełnione materiałem ciekłokrystalicznym umożliwiają kontrolę własności optycznych tych światłowodów takich jak stan polaryzacji, dyspersji dwójłomności czy nieliniowości współczynnika załamania światła. Zastosowanie światłowodowych włókien fotonicznych umożliwia tym samym sterowanie zarówno widmem jak i pasmem transmisji.

Niniejsze sprawozdanie stanowi zwięzłe podsumowanie wieloletnich prac prowadzonych w WAT w ramach POIG.01.03-14-016/08 nad zaawansowanymi ciekłokrystalicznymi modulatorami światła. Z racji mnogości rozwiązań, nad którymi pracowano w tym czasie w niniejszym sprawozdaniu skoncentrowano się tylko na niektórych pracach naukowych, które prowadzono w WAT w ramach POIG.

- Ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji LCC (Liquid Crystal Cell) do zastosowania w układzie dalmierza laserowego lądownika w Międzynarodowej Misji Kosmicznej „Phobos-Ground”, realizowanej przez Agencję Kosmiczną Federacji Rosyjskiej. Celem projektu Rosyjskiej Agencji Kosmicznej było umieszczenie modułu powrotnego na księżycu Marsa, Fobosie. Sondę z dwoma ciekłokrystalicznymi elementami LCC zaprojektowanymi, wykonanymi i przetestowanymi w WAT wystrzelono w dniu 8 listopada 2011 z kosmodromu w Kazachstanie
- Ciekłokrystaliczny filtr LCF (Electrically Tunable First Order Liquid Crystal Filter) do stacji wykrywania i określania zanieczyszczeń atmosfery ziemskiej oraz innych badań (w astronomii), gdzie poszukiwane są elementy optyczne o ekstremalnie dużych aperturach.
- Ciekłokrystaliczne „precyzyjne” przełączniki stanu polaryzacji LCHWP (Half-Wave Plate with nematic Liquid Crystal). LCHWP czyli elektroniczne ciekłokrystaliczne „półfalówki” typu 0,63TNP1 i 0,63TNP2 dla światła laserowego o $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$. Przetworniki te opracowano dla Firmy LASERTEX z Wrocławia dla potrzeb laserowej metrologii warsztatowej.
- Ciekłokrystaliczny zawór optyczny TLDR (Transparent Laser Damage Resistant Cell) o transmisji $T\sim 99\%$, przenoszący gęstość impulsu energii 3J dla potrzeb diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona.

Z racji krańcowo różnych wymagań technicznych co do transmisji T , współczynników odbicia, R , zakresów długości fal λ modulowanego światła, czasów włączenia τ_{ON} i wyłączenia τ_{OFF} oraz apertury Φ dla poszczególnych elementów:

- | | | | | |
|---------|----------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| • LCC | $T > 95\%$ | dla $\lambda = 1,062 \mu\text{m}$, | $\tau_{\text{ON}} < 1,5 \text{ ms}$, $\tau_{\text{OFF}} < 10,0 \text{ ms}$, | $\Phi = 17 \text{ mm}$ |
| • LCF | $T > 15\%$ | dla $\lambda \in [0,5 \mu\text{m}, 0,7 \mu\text{m}]$, | $\tau_{\text{ON}} < 1,0 \text{ ms}$, | $\Phi = 160 \text{ mm}$, |
| • LCD | $T < 0,0007\%$ | dla $\lambda \in [0,3 \mu\text{m}, 0,9 \mu\text{m}]$, | $\tau_{\text{ON}} < 200 \mu\text{s}$, | $\Phi = 100 \text{ mm}$ |
| • LCHWP | $T > 95\%$ | dla $\lambda \in 0,6328 \mu\text{m}$, | $\tau_{\text{ON}} < 200 \mu\text{s}$, | $\Phi = 26 \text{ mm}$ |
| • LDRC | $T \sim 99\%$ | dla $\lambda = 1,062 \mu\text{m}$, | $\tau_{\text{ON}} < 3 \mu\text{s}$, | $\Phi = 17 \text{ mm}$ |

należało wybrać dla każdego modulatora z osobna stosowny efekt elektrooptyczny i opracować dla niego specjalnie zoptymalizowaną ciekłokrystaliczną mieszaninę roboczą.

2. Ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji LCC do kosmicznego dalmierza laserowego

2.1 Wprowadzenie

Ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji LCC (Liquid Crystal Cell) do kosmicznego dalmierza laserowego był opracowany i przebadany w Wojskowej Akademii Technicznej, a następnie gruntownie przetestowany w laboratoriach Vavilowskiego Instytutu Optycznego w Sankt Petersburgu oraz na licznych poligonach kosmicznych w Rosji i w Kazachstanie.

Dwa ciekłokrystaliczne przełączniki stanu polaryzacji LCC1 i LCC2 stanowią integralną część układu wytwarzania czterech, zsynchronizowanych w czasie wiązek światła laserowego w dalmierzu lądownika Międzynarodowej Misji Kosmicznej „Phobos-Ground” (realizowanego przez Agencję Kosmiczną Federacji Rosyjskiej). Celem tego projektu było umieszczenie modułu powrotnego na księżycu Marsa, Fobosie, pobranie próbek gruntu tego Satelity i powrót na Ziemię. Dalmierz modułu lądującego wysłał „pierwszą” wiązkę w kierunku powierzchni lądowania, a pozostałe (trzy) wiązki kolejno wzdłuż trzech krawędzi bocznego ostrosłupa foremnego, którego wysokością jest wiązka pierwsza. Promienie biegną od lądownika do powierzchni na której ma lądować sonda, odbijają się od tej powierzchni i powracają do dalmierza. Mierząc i porównując ze sobą czasy przelotu światła od lądownika do powierzchni i z powrotem otrzymujemy precyzyjną

informację nie tylko o odległości lądownika od obiektu na którym ma lądować, ale również o przestrzennej orientacji tego lądownika względem płaszczyzny lądowania.

Ponieważ powierzchnia Fobosa (Księżyc Marsa) postrzegana jest przez promień lasera niemal jak „ciało doskonale czarne”, to należało zastosować wiązkę promieniowania o znacznej mocy. Dlatego też, krytycznym parametrem LCC był wymóg techniczny by transmisja T przetworników LCC była nie mniejsza niż 95%.

Ponieważ intensywne (od 2007 roku) prace nad opracowaniem LCC w Rosji nie rokowały powodzenia, 15.02.2010 Rosjanie (prof. L. Soms z Vawilowskiego Instytutu Optycznego w Sankt Petersburgu, gdzie „optyka kosmiczna” jest realizowana) zwrócili się oficjalnie do WAT (prof. L. Jaroszewicza) o pomoc w opracowaniu (a następnie sprzedaży) LCC (o $T > 95\%$).

Sondę z dwoma ciekłokrystalicznymi elementami LCC zaprojektowanymi, wykonanymi i przetestowanymi w WAT i Rosji wystrzelono w dniu 8 listopada 2011 z kosmodromu w Kazachstanie.

2.2 Wymagania techniczne dla LCC

Ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji LCC winien:

- przełączać płaszczyznę polaryzacji światła lasera o długości fali $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ o kąt $\xi = \pi/2$,
- mieć transmisję T dla $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ nie mniejszą niż 95%,
- przenosić gęstość energii promieniowania laserowego o impulsie 8 ns nie mniejszą niż $0,15 \text{ J/cm}^2$ powtarzanym 100 razy na 1 sek.
- mieć aperturę Φ nie mniejszą niż 15mm,
- mieć czas włączenia τ_{ON} nie większy niż 1,5 ms (nominalny 1,0 ms),,
- mieć czas wyłączenia τ_{OFF} nie większy niż 10,0 ms (nominalny 7,5 ms),
- mieć napięcie sterowania $U_e [9\text{V}-25\text{V}]$ (nominalne 18V) przy częstotliwości $f = 1500\text{Hz}$
- pracować poprawnie w temperaturach od 20°C do 40°C ,
- pracować poprawnie pod ciśnieniem nie mniejszym niż $1,3 \cdot 10^{-12} \text{ kPa}$ (10^{-14} mm Hg),
- być odporny na przeciążenia do 40g ($40 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$),
- być odporny na „promieniowanie kosmiczne » do dawki całkowitej nie mniejszej niż 10000 rad.
- być odporny na temperatury przechowywania $T_e [-10^\circ\text{C}$ to $+50^\circ\text{C}]$
- poprawnie pracować przez okres 4 lat.

2.3. Ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji LCC

By zapewnić przełączania płaszczyzny polaryzacji światła o $\pi/2$ i spełnić powyższe wymagania techniczne, postanowiono zrealizować LCC w oparciu o efekt TN (*Twisted Nematic*) z kątem $\xi = \pi/2$ skręcenia warstwy ciekłokrystalicznej. Biorąc powyższe przesłanki pod rozwagę, arbitralnie ustalono, że przetwornik LCC należy zaprojektować i wykonać dla grubości warstwy $d = 2.5 \mu\text{m}$. Ustalenie grubości LCC ($d = 2.5 \mu\text{m}$) spowodowało konieczność zaprojektowania, zsyntetyzowania stosownych substratów oraz skomponowania nowej, dedykowanej dla LCC, nematycznej mieszaniny roboczej.

Zgodnie ze sformułowanymi powyżej założeniami, skomponowano i przebadano mieszaninę W1825 o sekwencji fazowej: Kr - $12,0^\circ\text{C}$ - N - $136,0^\circ\text{C}$ – Iso. Przeprowadzono badania wstępne

mierząc transmisję T dla $\lambda \in [0,3 \mu\text{m}, 1,5 \mu\text{m}]$ oraz czasy włączania (τ_{ON}) i wyłączenia (τ_{OFF}) dla różnych napięć sterujących $U \in [9\text{V}-25\text{V}]$, w komórce 2.5TN500 (o grubości $d=2,5 \mu\text{m}$), napełnionej W1825 (o $\Delta n=0,37$ przy $\lambda=1,064 \mu\text{m}$) w temperaturze 25°C . W wyniku badań okazało się, że:

- położenie pierwszego pozytywnego maksimum efektu TN w komórce 2.5TN500, wypełnionej W1825 (o $\Delta n=0,37$ przy $\lambda=1,064 \mu\text{m}$), przypada dla $\lambda=1,064 \mu\text{m}$, a
- czasy włączania (τ_{ON}) i wyłączenia (τ_{OFF}) spełniają wymagania techniczne dla LCC.

Powyższe świadczyło, że mieszanina W1825 zaprojektowana i wykonana w WAT stwarza realna możliwość zbudowania LCC do kosmicznego dalmierza laserowego.

Pomimo faktu, że czynnik $d \cdot \Delta n \sim 0,92$ dla mieszaniny W1825 w komórce 2,5TN500 (z polerowana szkła typu „float” z elektrodami ITO o oporności powierzchniowej $\rho \sim 500 \Omega/\square$) jest bardzo dobrze dopasowany do pierwszego maksimum interferencyjnego efektu TN, w komórce tej całkowita transmisja T dla fali o $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ osiągała zaledwie wartości 74.8%, a więc była bardzo daleka od spełnienia wymagań technicznych na transmisję ($T > 95\%$) w LCC. Co więcej zauważono wyraźne „grubościowe prążki interferencyjne” na całej krzywej transmisji $T(\lambda)$ efektu TN zarejestrowanej w komórce 2.5TN500 wypełnionej W1825. Te (wyraźnie widoczne) „grubościowe” prążki pochodzą od wielokrotnych odbić promieni świetlnych w płasko równoległej warstwie MLC ograniczonej litymi przewodzącymi elektrodami z ITO.

Biorąc powyższe pod uwagę, jak również wiedząc, że:

- a) warstwa mieszaniny ciekłokrystalicznej W1825 o grubości $d=2,5 \mu\text{m}$ nie jest idealnym dielektrykiem (a więc absorbuje światło),
- b) polimerowe warstwy porządkujące w komórce TN nie są idealnymi dielektrykami (a więc absorbuje światło),
- c) zachodzi rozpraszanie światła we wszystkich warstwach funkcyjnych komórki TN i na granicach między tymi warstwami,
- d) zachodzi pochłanianie światła w samej (czystej) płytce szklanej,
- e) zachodzi pochłanianie światła w przewodzących elektrodach ITO,
- f) zachodzą wysokie odbicia na wszystkich granicach „interfejsach” (powietrze-szkło-ITO-MCK-ITO-szkło-powietrze), napełnionej komórki TN,

należało stwierdzić, że

- niemożliwym jest zbudowanie ciekłokrystalicznego przetwornika LCC o transmisji $T > 95\%$ na bazie prostej szklanej komórki 2.5TN500 (z komercyjnego szkła „float” z komercyjną warstwą ITO o najwyższej osiągalnej na rynku oporności $500 \Omega/\square$) wypełnionego (dobłą do tej aplikacji) mieszaniną W1825.

2.4 „Dopasowany optycznie” przetwornik LCC z mieszaniną W1825

Chcąc zwiększyć transmisję T ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji LCC powyżej 95% musimy zminimalizować a niekiedy usunąć omówione powyżej przyczyny „strat światła” przy przejściu promienia laserowego o $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ przez przetwornik LCC.

Badania jakie prowadzono w WAT w ciągu 30 lat pracy z NCK i LCD, pozwalają sadzić, że straty jakie wynikają z pochłaniania światła przez kilku mikrometrowe warstwy ciekłego kryształu, czy kilkudziesięciu nanometrowe porządkujące warstwy polimerowe są niewielkie. NCK o grubości $d=45 \mu\text{m}$ wykazuje zwykle absorpcję $A < 5\%$ (absorpcja $3 \mu\text{m}$ warstwy W1825 była niemierzalna). Polimerowa warstwa porządkująca o grubości $d=0,5 \mu\text{m}$ wykazuje absorpcję $A < 1\%$ (absorpcja 30nm warstwy poliamidu NISSAN SE-130 stosowanego do LCC była niemierzalna).

Aby zredukować absorpcje A przezroczystych ścianek LCC, zamiast „zwykłych” płytek szklanych (z wysokiej jakości szkła „float” o grubości $d=1.1\text{mm}$ i $n=1.52$) zastosowano podłoża (okienka) QP ze stopionego kwarcu (Quartz Plates o grubości $d=1.5\text{mm}$ i $n=1.46$ dla $\lambda=1,064\mu\text{m}$), który poddano „odpuszczaniu” w celu uzyskania ośrodka o jednorodnej strukturze. Teoretyczna wartość transmisji T i reflektancji R dla QP wynosi odpowiednio $T=93,5\%$ i $R=6,5\%$. Ponieważ dla tych kwarcowych okienek $T+R=1$, okienka te nie pochłaniają praktycznie światła w zakresie VIS i NIR. Aby zminimalizować rozpraszanie światła na granicach QP, obydwie strony okienek kwarcowych były mechanicznie polerowane z dokładnością optyczną. W wyniku procesu polerowania QP, otrzymywano płaskość lepszą niż $\lambda/4$ @633 nm, a klinowość była mniejsza niż 8”.

Aby obniżyć „straty” w transmisji T spowodowane pochłanianiem światła przez przewodzące warstwy ITO oraz obniżyć fresnelowskie straty spowodowane granicami pomiędzy warstwami ITO a podłożami QP, postanowiono nanieść (techniką naparowania próżniowego) na podłoża QP których współczynnik załamania $n=1,46$, specjalne optycznie dopasowane „porowate” warstwy tlenku indowocynowego - PITO (*Porous Indium Thin Oxide*). Ponieważ w wyniku zabiegów technologicznych PITO ma strukturę porowatą, przeto współczynnik załamania PITO jest wypadkową współczynników załamania porowatej warstwy litego („gęstego” - *dens*) ITO ($n=1,90$) i inkluzji powietrza ($n=1$). Z badań laboratoryjnych wynika, że lite ITO o grubościach warstwy od 15nm (dla $500\Omega/\square$) do 180 nm (dla $10\Omega/\square$) wykazuje współczynnik załamania $n=1,90$ dla $\lambda=1,064\mu\text{m}$.

W celu ustalenia optymalnych warunków nanoszenia próżniowego, potrzebnych dla LCC warstw PITO, naniesiono trzy różne warstwy PITO, na trzy takie same podłoża (QP). W wyniku zabiegów technologicznych, polegających nie tylko na zmianie grubości nanoszonych warstw ale również innych parametrów nanoszenia, otrzymano trzy próbki warstw POIT o opornościach $400\Omega/\square$, $1000\Omega/\square$ i $1200\Omega/\square$. Okazało się, że transmisja ($T=93,1\%$ dla $\lambda=1,064\mu\text{m}$) okienka kwarcowego QP z naniesioną warstwą PITO1200 (o oporności $1200\Omega/\square$), jest prawie taka sama jak transmisja ($T=93,5\%$ dla $\lambda=1,064\mu\text{m}$) „czystego” okienka QP. Oznacza to, że współczynnik załamania warstwą PITO1200 wynosi około 1.50 i Fresnelowskie odbicia nie występują na granicy pomiędzy podłożem QP ($n\sim 1,46$) i naniesioną na to podłoże przezroczystą, przewodzącą warstwą PITO ($n\sim 1,50$).

Aby (odizolować elektrycznie) uniknąć bezpośredniego kontaktu przezroczystej, przewodzącej elektrody PITO o stosunkowo dużej powierzchni (apertura LCC ma być nie mniejszą niż 15 mm) z warstwą porządkującą AL (*Aligning Layer*) i mieszaniną roboczą MLC, na elektrodę PITO naparowano cienką warstwę blokującą BF (*Blocking Film*) z SiO_2 . Ponieważ współczynnik załamania światła elektrody PITO ($n\sim 1,5$) i BF ($n\sim 1,5$) są prawie takie same jak zwyczajny współczynnik załamania światła ($n_0=1,53$) mieszaniny MLC który „widzi” padający na przetwornik LCC spolaryzowany promień laserowy o $\lambda=1,064\mu\text{m}$, grubość d warstwy BF z SiO_2 powinna wynosić $d=\lambda/(4n)$. W tych warunkach fresnelowskie odbicia nie wystąpią na granicy PITO ($n=1,5$) i BF ($n\sim 1,5$) jak również na następnej granicy BF ($n=1,54$) z MCK ($n_0\sim 1,53$).

Aby usunąć (zminimalizować) względnie duże odbicia światła R na zewnętrznych powierzchniach LCC, czyli na granicach QP (z naparowanymi na drugiej stronie warstwami PITO i BF) z powietrzem, naniesiono na te powierzchnie antyrefleksyjne powłoki AR. Powłokami AR były w tym przypadku podwójne, standardowe warstwy $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgF}_3$ o dopasowanych do $\lambda=1,064\mu\text{m}$ grubościach.

Biorąc pod uwagę rozważania przedstawione powyżej, „dopasowany optycznie” przełącznik stanu polaryzacji LCC o $T>95\%$ powinien być zbudowany w formie struktury wielowarstwowej

(Powietrze-AR-QP-PITO-BF-AL.-W1825-AL-BF-PITO-QP-AR-Powietrze).

W tym celu dwie (starannie wypolerowane) płytki kwarcowe QP o wymiarach 22,5mm x 23,0mm i grubości 1,5mm, z naniesionymi dielektrycznymi warstwami antyrefleksyjnymi AR z jednej strony, a z drugiej przezroczystymi elektrodami PITO zabezpieczonymi dielektrycznymi warstwami

blokującymi BF i porubbingowanymi (stosownie do efektu) TN poliamidowymi warstwami porządkującymi AL (SE-130), oraz złotymi kontaktami, sklejono w laboratorium technologicznym LCD WAT, za pomocą kleju termoutwardzalnego. W celu ustalenia pożądanej grubości $d=2,5\mu\text{m}$, do kleju w przekładce dystansująco-uszczelniającej dodano „szklane”, walcopodobne dystansery o średnicy $2,5\mu\text{m}$, oraz rozpylono na powierzchnie elektrod polimerowe, kuliste dystansery o takiej samej średnicy, w ilości nie większej niż 1-2 dystansery/ mm^2 . W ten sposób otrzymano puste obudowy LCC, których dokładne grubości d określano metodą interferencyjną. Puste obudowy LCC były napełniane ciekłokrystaliczną (odgazowaną uprzednio) mieszaniną roboczą W1825. Proces napełniania odbywał się w komorze próżniowej przy ustalonej temperaturze 35°C (przewidzianej do pracy LCC w kosmosie), a następnie hermetyzowany za pomocą specjalnego kleju przeznaczonego do technologii kosmicznych (opracowanego i dostarczonego przez Rosjan).

2.5 Testowanie przetwornika LCC

Wszystkie opracowane i wykonane w WAT (cztery serie po 12 sztuk) przełączniki fazy LCC były gruntownie przebadane i testowane w laboratoriach WAT.

W laboratoriach WAT badano:

- Transmisję $T(\lambda)$,
- Reflektancję $R(\lambda)$,
- Absorpcję $A(\lambda)$,
- Czas włączenia τ_{ON} ,
- Czas wyłączenia τ_{OFF} ,
- Współczynnik kontrastu CR dla $\lambda=1,064\mu\text{m}$, oraz prowadzono
- systematyczne badania starzeniowe, jak również (ograniczone)
- badania pracy LCC w warunkach próżni i
- gwałtownych zmian temperatury.

Wyniki badań LCC z serii 1 wykonanych w WAT (na bazie komercyjnego szkła „float” z ITO $500\Omega/\square$ z warstwami AR i PL), jak to stwierdzili Rosjanie (prof. Leonid Soms) były obiecujące. Przetworniki LCC z W1825 otrzymywane w WAT, a badane w WAT i Rosji wykazywały $T\sim 89\%$ i były zdecydowanie szybsze ($\tau_{\text{ON}}<1\text{ms}$, $\tau_{\text{OFF}}<8\text{ms}$ dla 10V) od rosyjskich. Rosyjskie LCC (zaprojektowane i wykonane w Zakładach LCD w Saratowie, na bazie szkła kwarcowego z naniesionymi warstwami AR, ITO i PL oraz chińskiej komercyjnej ciekłokrystalicznej mieszaniny) z trudem osiągały $T\sim 84\%$ oraz akceptowalne czasy włączenia i wyłączenia ale dla dwa razy większych napięć sterujących U niż polskich polskie analogi ($\tau_{\text{ON}}<1,5\text{ms}$, $\tau_{\text{OFF}}<10\text{ms}$ dla 20V)

Wraz ze zdobywaniem wiedzy i doświadczenia w dziedzinie technologii LCC do zastosowań kosmicznych, technologii nanoszenia warstw antyrefleksyjnych AR i blokujących BF, dopasowujących AL oraz porządkujących PL, otrzymane LCC z serii na serię lepsze wykazywały polepszone parametry.

W serii 2 (na bazie QP z AR, PITO i PL) uzyskano już kilka modeli laboratoryjnych LCC o $T\sim 95\%$, ale czystość optyczna w niektórych LCC budziła pewne zastrzeżenia.

LCC z serii 3 (w której zastosowano wszystkie opracowane w WAT warstwy optyczne: AR, PITO, BF i PL oraz w pełni profesjonalne materiały do sklejania i uszczelniania LCD), spełniały wszystkie parametry (mierzone w WAT). W wyniku badań stwierdzono, że jeżeli płaszczyzna polaryzacji światła padającego na LCC jest prostopadła do direktora n w warstwie MLC przy wejściu do tej

warstwy, wówczas światło wychodzące z PITO i PL o $n \sim 1,5$ „widzi” $n_o \sim 1,53$ mieszaniny W1825, co czyni LCC „dopasowanym optycznie” i wtedy $T > 95\%$.

Po przeprowadzeniu badań jakości optycznej (w WAT) oraz parametrów pracy, każdy LCC wytworzony w WAT (spełniający wymagania techniczne) otrzymywał „metrykę” (patrz Załącznik1), a następnie 6 szt. z serii 3 (z najlepszymi parametrami technicznymi) wysyłano do dalszych badań w Rosji. W Vavilovskim Instytucie Optycznym (VIO) w Sankt Petersburgu LCC z WAT były gruntownie badane i testowane w obecności i przy czynnym udziale pracowników WAT. W tym miejscu należy stwierdzić, że wszystkie wyniki otrzymywane w VIO były nie gorsze niż otrzymywane w WAT. W VIO LCC z parametrami potwierdzonymi wspólnym oficjalnym protokołem wmontowywano do laserowego dalmierza i dalej testowano (już bez udziału strony polskiej) w (strefach VIO, które nie są dostępne dla gości) i poligonach kosmicznych Rosji. Podczas testów na jednym z poligonów kosmicznych Rosji, niektóre (3 z 6) LCC z serii 3 rozhermetyzowały się w czasie kilkunastodniowych badań pracy LCC w warunkach głębokiej kosmicznej próżni. Po gruntownej analizie przyczyn awarii ustalono, że użyty przez WAT (do uszczelniania LCC po napełnieniu) profesjonalny klej stosowany szeroko w technologii typowych komercyjnych LCD zawiódł. Po zastosowaniu specjalnego (opracowanego przez Rosjan w 2007, w ramach oddzielnego trzyletniego grantu) „kleju „kosmicznego”, 10 szt. LCC z serii 4 spełniły wszystkie przewidziane dla nich badania w WAT i następnie w Rosji. Z racji znacznych opóźnień realizacji programu „Phobos-Ground”, strona rosyjska, kierując się doświadczeniem z poprzednich programów kosmicznych, zrezygnowała z testów odporności LCC na długotrwałe promieniowanie kosmiczne do dawki całkowitej przewidzianej dla tego programu. Uznano, że pozytywne badania wstępne na odporność na promieniowanie kosmiczne do mniejszej dawki są wystarczające, ponieważ LCC nie są umieszczone w otwartej przestrzeni kosmicznej ale w osłoniętym od promieniowania wnętrzu kapsuły lądownika.

2.6. Podsumowanie

a) Po spełnieniu wszystkich badań potwierdzonych specjalnymi protokołami strona rosyjska wybrała dwa przetworniki stanu polaryzacji LCC (LCC nr 43 i LCC nr 47) z najlepszymi parametrami technicznymi (o $T > 97\%$) i zamontowała je w laserowym dalmierzu lądownika kosmicznego „Phobos-Ground”, a następnie wystrzelono je w kosmos w dniu 8 listopada 2011 z kosmodromu w Kazachstanie. Po niepowodzeniu misji „Phobos-Ground” (satelita nie przeszedł z orbity ziemskiej na trajektorię w kierunku Marsa i spłonęła po kilku dniach w atmosferze), Rosjanie zakupili 4szt 1,06LCC do potrzeb „ewentualnej następnej” misji kosmicznej „Phobos-Ground”, którą planowano na rok 2017.

b) 21.02.2012 Rosjanie zaproponowali nam nową w współpracę w dziedzinie opracowania szybkiego ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji 0.81LCN dla światła laserowego o $\lambda = 0.898 \mu\text{m}$ dla potrzeb nawigacji kosmicznej, lądowej, morskiej i powietrznej (w tym systemów GPS). Ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji 0.81LCN winien:

- przełączać płaszczyznę polaryzacji światła o długości fali $\lambda = 0,808 \mu\text{m}$ o kąt $\xi = \pi/2$,
- mieć transmisję T dla $\lambda = 0,808 \mu\text{m}$ nie mniejszą niż 95%,
- przenosić gęstość energii nie mniejszą niż $0,15 \text{ J/cm}^2$ promieniowania laserowego o impulsie 8 ns powtarzanym 100 razy na 1 sek.
- mieć aperturę Φ nie mniejszą niż 15mm,
- mieć czas włączenia τ_{ON} nie większy niż 1,0 ms (nominalny 0,6 ms),
- mieć czas wyłączenia τ_{OFF} nie większy niż 5,0 ms (nominalny 4,5 ms),
- mieć napięcie sterowania $U = 10\text{V}$ przy częstotliwości $f = 1500\text{Hz}$

- pracować poprawnie w temperaturach od 20°C do 40°C,
- być odporny na temperatury przechowywania $T \in [-10^\circ\text{C} \text{ to } +50^\circ\text{C}]$
- poprawnie pracować przez okres 4 lat.

Korzystając z doświadczeń zdobytych przy budowie „kosmicznego” przetwornika 1.06TN

- skomponowano nematyczną mieszaninę ciekłokrystaliczną W1820 z $\Delta n \sim 0.28$ przy $\lambda = 0.808 \mu\text{m}$ precyzyjnie dostrojoną do pracy w pierwszym maksimum interferencyjnym pozytywnego modu TN dla grubości $d \sim 2,5 \mu\text{m}$,
- opracowano technologię próżniowego nanoszenia na polerowane (do płaskości lepszej niż $\lambda/4 @ 633 \text{ nm}$ i klinowości mniejszej niż 8”) kwarcowe płytki QP (o wymiarach 22,5mm x 23,0mm i grubości 1,5mm) przezroczystych elektrod z PITO1300 (o oporności $1300 \Omega/\square$). Elektrody te były „dopasowanych” optycznie do QP i W1820 dla fali o $\lambda = 0,808 \mu\text{m}$.
- opracowano technologię otrzymywania warstw AR i BF dla fali o $\lambda = 0,808 \mu\text{m}$.

Stosując powyższe technologie, opracowano i zbudowano dopasowany optycznie przełącznik stanu polaryzacji 0.81LCN dla światła laserowego o $\lambda = 0.898 \mu\text{m}$ o $T > 95\%$. Po przeprowadzeniu w WAT badań parametrów pracy, każdy 0,81LCN (spełniający wymagania techniczne) otrzymywał metrykę (patrz Załącznik 2). Partię 6 szt 0,81LCN przebadano w VIO w Sankt Petersburgu w obecności i czynnym udziale pracowników WAT. Badania wykazały, że 0,81LCN spełniały wszystkie wymagania techniczne dla tego urządzenia, co stwierdzono oficjalnym protokołem. Kiedy przetworniki te przechodziły w Rosji „badania poligonowe”, współpraca Rosji z WAT została nagle przerwana w chwili rozpoczęcia „inwazji” Rosji na półwysep krymski.

3. Ciekłokrystaliczny filtr LCF

3.1 Wprowadzenie

Ciekłokrystaliczny filtr LCF (*Electrically Tunable First Order Liquid Crystal Filter*) został opracowany jako integralny element

- stacji wykrywania i określania zanieczyszczeń powietrza lub
- stacji obserwacji astronomicznych.

Z racji „dużej” odległości” jaką pokonuje „analizowany” promień świetlny w zanieczyszczonym powietrzu lub w przestrzeni kosmicznej ciekłokrystaliczny filtr LCF powinien mieć aperturę Φ nie mniejszą niż 160 mm i transmisję T nie mniejsza niż 15%,

Z racji automatyzacji procesu detekcji, FLC powinien elektronicznie (poprzez zmianę napięcia sterującego U) wybierać pasmo światła nie szersze niż $\Delta\lambda_{1/2} \sim 0,1 \mu\text{m}$ z zakresu $\lambda \in [0,5 \mu\text{m}, 0,7 \mu\text{m}]$, a jego czas τ_{ON} przełączenia (wybrania danej długości światła λ) powinien być nie większy niż 1 ms.

3.2 Filtr LCF

Korzystając z badań teoretycznych, symulacji komputerowych jak i doświadczeń WAT przy

- opracowaniu i wykonaniu systemu wykrywania, monitoringu oraz wizualizacji stanu zanieczyszczeń powietrza w Warszawie zainstalowanym przez WIOŚ (Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska) w 1996 na ścianie i dachu Domu Towarowego Smyk,
- opracowaniu i wykonaniu Filtra LCD o przełączanym współczynniku przepuszczania światła do przyłbic spawalniczych PIAP-PS automatic, które były produkowane seryjnie w latach 1998-

2005 (w ilości ok. 100 szt./miesiąc) przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP) w Warszawie

- zaprojektowano, zsyntetyzowano (stosowne substraty) oraz skomponowano specjalizowaną nematyczną mieszaninę W1791 (składającą się głównie z fluoropodstawionych izotiocyjanianów, alkilotolanów i alkilofenylotolanów), o sekwencji fazowej: Cr -20,0°C - N - 127,5°C – Iso i następujących parametrach materiałowych: $n_0 \sim 1,54$ dla $\lambda = 0,589 \mu\text{m}$, $\Delta n > 0,4$ dla $\lambda \in [0,5 \mu\text{m}, 0,7 \mu\text{m}]$, $\varepsilon_{\perp} \sim 4,5$ dla $f = 1,5 \text{ kHz}$, $\Delta \varepsilon > 15,0$ dla $f = 1,5 \text{ kHz}$, $K_{11} > 20 \cdot 10^{-12} \text{ N}$ $\gamma \sim 150 \text{ mPa s}$.
- zbudowano (na bazie tej mieszaniny) trzykomórkowy ciekłokrystaliczny przetwornik optyczny FLC o wymiarach 170mm x 176mm z aperturą Φ nie mniejszą niż 160 mm.

Biorąc pod uwagę dużą aperturę $\Phi = 160 \text{ mm}$ LCF, jak i możliwość dysponowania mieszaniną W1791 o anizotropii optycznej ($\Delta n \sim 0,42$) większej od minimalnej ($\Delta n \sim 0,40$ przewidzianej teorią), niezbędnej do przestrajania LCF w zakresie fal świetlnych $\lambda \in [0,5 \mu\text{m}, 0,7 \mu\text{m}]$, zdecydowano się wykonać trzy komórki HG o grubościach (nieco) większych niż te jakie wynikały z teorii. Decyzję tę podjęto po kilku nieudanych próbach wytworzenia w laboratorium technologicznym LCD WAT, w pełni profesjonalnych jednopikselowych komórek HG o grubości $d = 1,0 \mu\text{m}$ i aperturze Φ nie mniejszą niż 160 mm. Otrzymywane komórki (z serii pilotażowych) pomimo naporowania na elektrody ITO izolujących warstw z SiO_2 wykazywały przed napełnieniem (kiedy były puste) niską oporność całkowitą $R < 1 \text{ M}\Omega$, co czyniło je nie przydatnymi do zastosowań LCD. Po zwiększeniu do maksimum „reżymu czystości” w pracowni LCD jak i zmianie niektórych procedur technologicznych LCD udało się wytworzyć komórki HG o grubościach $d = 1,8 \mu\text{m}$, $d = 3,5 \mu\text{m}$ i $d = 5,0 \mu\text{m}$, które dalej oznaczono jako 1,8HG, 3,5HG i 5,0HG. Komórki te przed napełnieniem wykazywały oporność całkowitą R nie mniejszą niż $3 \text{ M}\Omega$. Po napełnieniu tych komórek mieszaniną W1791 o oporności właściwej $\rho \sim 1 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$, opór całkowity R przy $f = 1,5 \text{ kHz}$ nie był mniejszy niż $1 \text{ M}\Omega$, co umożliwiało „wywołania” w nich efektu ECB (*Electrically Controlled Birefringence*), czyli wymuszenia (napięciem elektrycznym U) zmiany efektywnej anizotropii optycznej $\Delta n(U)$, potrzebnej do przestrajania długości fali λ w LCF.

Obudowy wszystkich komórek HG filtra LCF wykonano z wysokiej jakości polerowanego szkła „float” o grubości 1.1 mm i oporności $100 \Omega/\square$ (firmy Balzers). W celu uzyskania uporządkowania HG, na elektrody ITO z naporowanymi warstwami blokującymi (z SiO_2) nawirowano poliamidowe porządkujące warstwy z PI-2610 (firmy du Pont), a następnie je rubbingowano. Aby uzyskać pożądane grubości d komórek HG specjalne szklane, walcopodobne „dystansery” o średnicach d : 1.8, 3.5, 5.0 μm dodawano do kleju przekładki uszczelniająco-dystansującej. Plastikowe, sferyczne dystansery o tych samych średnicach rozpylano na powierzchniach czynnych elektrod (2-4 dystansery/ mm^2). Ostateczną, otrzymaną po sklejeniu grubość komórki HG określano metodą interferencyjną. Po napełnieniu i uszczelnieniu komórki: 1,8HG, 3,5HG i 5HG składano w „stos” „jedna na drugiej”. W stosie tym zastosowano profesjonalne polaryzatory LCD firmy NITTO. Dwa „zewnętrzne” polaryzatory (NPF-F1225DUAG20 o $\tau = 44,5,0\%$) były zaopatrzone w warstwy antyrefleksyjne, zaś dwa środkowe (NPF-F4008P1 o $\tau = 48,0\%$) były pozbawione tej warstwy.

Kiedy wybierze się ściśle zadany zbiór (nastaw) przykładowych napięć (U_1 , U_2 i U_3) do trzech (1,8HG, 3,5HG i 5,0HG) komórek filtra, filtr FLC „przepuści” nam stosowne pasmo (nie szersze niż $\Delta \lambda_{1/2} \sim 0,1 \mu\text{m}$) z zakresu VIS. Ponieważ, napięciowe funkcje sterujące $\lambda = f(U_1)$, $\lambda = f(U_2)$, $\lambda = f(U_3)$ dla trzech komórek filtra LCF mają niemal liniowy charakter, filtr LCF z łatwością może być bardzo prosto sterowany stosownymi napięciami, bez konieczności uciekania się do skomplikowanych układów sterujących.

Szczegółowe pomiary wykazały, że natężenie I transmitowanego przez filtr FLC światła jest na pewno większe niż 16% światła nań padającego, a czasy przełączenia τ_{ON} (wybrania danej długości fali λ) nie większy niż 0,8 ms, co spełnia wymaganie techniczne co do minimalnej transmisji ($T > 15\%$) i maksymalnych czasów ($\tau_{\text{ON}} < 1 \text{ ms}$) postawione przed filtrem LCF do diagnostyki skażeń powietrza i pewnych obserwacji astronomicznych.

3.3 Uwagi końcowe

Pomimo faktu, że opracowany ciekłokrystaliczny filtr FLC przepuszcza w zakresie widzialnym raczej szerokie pasma ($\Delta\lambda_{1/2}\sim 0,1\mu\text{m}$), filtr ten może być powodzeniem zastosowany w układzie detekcji systemu wykrywania, monitoringu i wizualizacji stanu zanieczyszczeń powietrza. Niewątpliwą zaletą opracowanego filtra FLC i jego przewagą nad innymi komercyjnie dostępnymi automatycznymi filtrami światła widzialnego jest możliwość uzyskiwania w tej konstrukcji (ekstremalnie) dużych optycznych apertur Φ , niskich wartości i liniowości napięć sterujących U oraz niskiej konsumpcji mocy elektrycznej. Te zalety predysponują FLC do ewentualnych zastosowań w astronomii, gdzie poszukiwane są elementy optyczne o ekstremalnie dużych aperturach.

Oczywiście istnieje teoretyczna i techniczna możliwość zbudowania LCF składającego się z czterech czy pięciu ciekłokrystalicznych komórek HG. Jeżeli do opisanej konstrukcji dołożymy czwarta komórkę 7HG, to szerokość połówkowa filtrowanego pasma zmaleje do $\Delta\lambda_{1/2}\sim 0,04\mu\text{m}$, ale natężenie transmitowanego światła zmaleje do około 6%.

4. Ciekłokrystaliczne przełączniki stanu polaryzacji LCNP do diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona

4.1 Wprowadzenie

W niemal we wszystkich laboratoriach świata zajmujących się fizyką i technologią gorącej plazmy stosowana jest metoda Thomsona do jej diagnostyki. Gorąca plazma jest wytwarzana poprzez oświetlenie jej ciągiem impulsów laserowych o możliwie wysokiej energii. W tym przypadku energia pojedynczego impulsu laserowego nie może być mniejsza niż 3 J, a więc niemożliwością jest wygenerowanie takiego impulsu przez pojedynczy laser (nawet wielkiej mocy). W tej sytuacji należy stosować wiele laserów generujących synchroniczne serie impulsów wzdłuż tego samego toru optycznego. Aby uformować w ścieżce optycznej ciąg impulsów świetlnych o długości fali $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ i energii w impulsie 3 J potrzebna jest „odporna na to promieniowanie” „przesłona świetlna” zamykająca tor optyczny z szybkością nie mniejszą niż 1-5 μs .

WAT ramach POIG 01.03-14-016/08 przy współpracy z

- Vavilov State Optical Institute (SOI) in St. Petersburg (Rosja) oraz
- National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO) in St. Petersburg (Rosja) opracował, wykonał i przetestował serię ciekłokrystalicznych przełączników stanu polaryzacji do diagnostyki gorącej plazmy Metodą Thomsona.

4.2 Wymagania techniczne dla LCNP

WAT przy współpracy ITMO oraz SOI opracował wymagania techniczne dla LCNP. W myśl tych wymagań, ciekłokrystaliczny przełącznik stanu polaryzacji LCNP do diagnostyki gorącej Plazmy metodą Thomsona winien:

- być odporny na co najmniej 10 sekundową akcję ciągu impulsów laserowych (o długości impulsu 10 ns, powtarzanych 100pps) przenoszących energię nie mniejszą niż 3J w impulsie,
- przełączać płaszczyznę polaryzacji światła lasera o długości fali $\lambda=1,064\mu\text{m}$ o kąt $\xi=\pi/2$,
- mieć transmisję T dla $\lambda=1,064\mu\text{m}$ nie mniejszą niż 97%
- mieć czas przełączenia (włączenia) τ_{ON} nie większy niż 5 μs (optymalnie 1-3 μs),
- mieć napięcie przełączenia U nie większe niż 200V,

- pracować poprawnie w temperaturach od 20°C do 40°C,
- mieć aperturę (powierzchnię czynną) nie większą niż 8 cm²,
- mieć płaskość frontu falowego nie gorsza niż $\lambda/4$ @ 633 nm.

5.3 Ciekłokrystaliczne przełączniki stanu polaryzacji LCNP

Aby spełnić powyższe wymagania zwłaszcza na $\tau_{ON} < 3 \mu s$ w pierwszej kolejności skierowano uwagę na zastosowanie efektu SSFLC (Surfaced Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal) w ciekłokrystalicznym ferroelektryku FLC o $\Theta = 22,5^\circ$.

Badania wstępne (prowadzone w WAT w Instytucie Optoelektroniki, prof. J. Marczak) odporności mieszanin ciekłokrystalicznych do LCNP wykazały, że współczynnik odporności LDR (Laser Damage Resistant) na 10 sekundową akcję ciągu impulsów laserowych (o długości impulsu 10 ns, powtarzanych 100pps) dla FLC (LDR~6 J/cm²) jest znacznie mniejszy niż dla nematyków o wysokiej dwójłomności (LDR~10 J/cm²)

Badania wstępne prowadzone w ITMO (prof. L.Soms) wykazały, że LDR przetwornika LCNP zbudowanego w WAT, na bazie kwarcowych płytek QP z elektrodami (Dense) ITO o oporności powierzchniowej 500 Ω/\square , pracującego w modzie TN z mieszaniną W1825 o grubości $d=2,5 \mu m$ jest nie gorszy niż 0,20 J/cm² (LDR~0,21 J/cm²).

W tej sytuacji postanowiono rozwiązać problem LCNT w oparciu o efekt TN z

- z nową bardzo dobrze „dostrojoną optycznie” mieszaniną LCM do efektu TN o $d \sim 2,5 \mu m$,
- z bardzo dobrze dopasowanymi optycznie granicami (interfejsami) pomiędzy wszystkimi warstwami funkcyjnymi (Air-AR-QP-PITO-BF-AL-LCM-AI-BF-PITO-QP-AR-Air) przetwornika LCNP.

Stosując

- a) polerowane podłoża QP (LDR~50 J/cm²) o płaskości lepszej niż $\lambda/4$ @ 633 nm i klinowości mniejszej niż 8",
- b) elektrody PITO (z porowatego ITO); PITO1200 o oporności powierzchniowej $\rho \sim 1200 \Omega/\square$ i PITO1300 o oporności powierzchniowej $\rho \sim 1300 \Omega/\square$,
- c) warstwy porządkujące AL (z NISSAN SE-130 o LDR~2 J/cm²)
- d) ciekłokrystaliczną mieszaninę LCM (filtrowaną na sitach o $\Phi \sim 0,3 \mu m$ o LDR~9,8 J/cm²)

otrzymano w pracowni technologicznej LCD WAT (klasy ISO4) LCNP1 (z PITO1200) Ω/\square i LCNP2 (z PITO1300) Ω/\square o aperturze 28mm (wymiarach 37mm x 33mm x 3,1mm).

Przetworniki LCNP1 i LCNP2

Przetworniki LCNP1 i LCNP2 przebadano w WAT określając LDT, transmisję T, odbicie R, absorpcję A oraz τ_{ON} .

Po przeprowadzeniu w WAT badań parametrów pracy każdy LCNP (spełniający wg WAT wymagania techniczne) otrzymywał metrykę (patrz Załącznik 3). Dwie partie po 4 szt. serii LCNP1 i LCNP2 przebadano w ITMO w Sankt Petersburgu w obecności i czynnym udziale pracowników WAT. Badania prowadzone w WAT i ITMO zgodnie wykazały, że wszystkie LCPN z WAT miały dla $\lambda = 1.064 \mu m$ $T > 97\%$, $R < 1\%$, $A < 2\%$, a czasy włączenia były mniejsze niż 5 μs dla $U = 200V$. LDR otrzymane w ITMO były nieco mniejsze niż te otrzymane w WAT.

Dla LCNP1z PITO1200 w WAT otrzymano LDR=0,44 J/cm², a w ITMO LDR=0,36 J/cm²

Dla LCNP2z PITO1300 w WAT otrzymano $LDR=0,45 \text{ J/cm}^2$, a w ITMO $LDR=0,38 \text{ J/cm}^2$

Powyższe różnice w LDR były spowodowane różnicami średnic diafragm i różnymi kryteriami oceny „początku zniszczenia” przetwornika. Ostatecznie ustalono, że LDR dla tych serii wynosi $0,35 \text{ J/cm}^2$. Wyniki badań opublikowano i uznano za bardzo obiecujące, gdyż LCNP już o aperturze 8 cm^2 (apertury LCNP1 i LCNP2 miały efektywne apertury 6 cm^2) będzie zdolny przenosić 10 sekundową serię 3J impulsów o długości impulsu 10 ns, powtarzanych 100pps.

Przetwornik LCNP3

Chcąc zwiększyć w przetwornikach LCNP współczynnik LDR powyżej $0,35 \text{ J/cm}^2$, obniżyć czas włączenia τ_{ON} poniżej $3 \mu\text{s}$ oraz, poprawić płaskość ich frontu falowego (w LCNP1 i LCNP2 była mniejsza niż $\lambda/4 @ 633 \text{ nm}$) do budowy nowego LCNP3 zastosowano

- (filtrowaną na sitach o $\Phi \sim 0,22 \mu\text{m}$) ciekłokrystaliczną „zmodyfikowaną” (o podwyższonej w stosunku do LCM anizotropii przenikalności elektrycznej $\Delta\epsilon$ i obniżonej lepkości γ) mieszaninę LCM3 o $LDR \sim 10,5 \text{ J/cm}^2$)
- polerowane podłoża QP o płaskości lepszej niż $\lambda/6 @ 633 \text{ nm}$ i klinowości mniejszej niż $6''$,
- elektrody PITO o oporności powierzchniowej $\rho \sim 1500 \Omega/\square$,
- warstwami Nylon66 o $LDR \sim 12 \text{ J/cm}^2$,
- „świeże” filtrowane na sitach o $\Phi \sim 0,22 \mu\text{m}$ „ciecze technologiczne”
- „świeżą” tkaninę „rubbingownicy”.

Przetworniki LCNP3 (z PITO1500) Ω/\square o aperturze 50mm (wymiarach 56,5mm x 55mm x 3,1mm). przebadano w WAT określając: $LDR=0,48 \text{ J/cm}^2$, transmisję $T > 97\%$, odbicie $R < 1\%$, absorpcje $A < 2\%$ oraz $\tau_{ON}=2,8 \mu\text{s}$ dla $U=200 \text{ V}$. Po przeprowadzeniu w WAT, LCNP3 otrzymywały metryki (Patrz Załącznik Nr 4) i 4szt przebadano w ITMO w Sankt Petersburgu w obecności i czynnym udziale pracowników WAT. Badania prowadzone w ITMO wykazały, że LCNP3 miały dla $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ $T > 97\%$, $R < 1\%$, $A < 2\%$, a czasy włączenia były mniejsze niż $3 \mu\text{s}$ dla $U=200 \text{ V}$. I tym razem LDR otrzymane w ITMO były nieco mniejsze niż otrzymane w WAT. Dla LCNP3 z PITO1500 w WAT otrzymano $LDR=0,48 \text{ J/cm}^2$, a w ITMO $LDR=0,43 \text{ J/cm}^2$. Ostatecznie ustalono, że LDR dla LCNP3 wynosi $0,42 \text{ J/cm}^2$. Wyniki badań opublikowano i uznano za bardzo obiecujące, gdyż LCNP3 o aperturze 19 cm^2 z łatwością (teoretycznie) przenosił serię 10ns impulsów laserowych o energii 3J powtarzanych co 10 μs przez okres 10s. Niestety, ze względu na zbyt dużą aperturę LCNP3 płaskość frontu falowego była mniejsza niż $\lambda/4 @ 633 \text{ nm}$, co czyniło LCNP3 nieprzydatnym do zamierzonej aplikacji.

Przetwornik LCNP4

Przetwornik LCNP4 postanowiono opracować stosując

- filtrowaną na sitach o $\Phi \sim 0,22 \mu\text{m}$) ciekłokrystaliczną „zmodyfikowaną” (o podwyższonej w stosunku do LCM anizotropii przenikalności elektrycznej $\Delta\epsilon$ i obniżonej lepkości γ) mieszaninę LCM3 o $LDR \sim 10,5 \text{ J/cm}^2$),
- polerowane podłoża QP (o grubości 6mm, płaskości lepszej niż $\lambda/8 @ 633 \text{ nm}$, klinowości mniejszej niż $8''$ i $n \sim 1,46$),
- elektrody PITO o oporności powierzchniowej $\rho \sim 1800 \Omega/\square$ i współczynniku załamania $n \sim 1,46$,

- d) warstwami Nylon66 o LDR~12J/cm²,
- e) „świeże” filtrowane na sitach o $\Phi \sim 0,22\mu\text{m}$ „ciecze technologiczne”,
- f) „świeżą” tkaninę „rubbingownicy”.

Przetworniki LCNP4 (z PITO1800) Ω/\square o aperturze 26 mm (wymiarach 35 mm x 32 mm x 16,1 mm). przebadano w WAT określając: LDR=0,59 J/cm², transmisję T>98%, odbicie R<1%, absorpcje A<3% oraz $\tau_{\text{ON}}=2,7\mu\text{s}$ dla U=200V. Wg badań WAT, LCNP4 (patrz Załącznik nr 5) o czynnej aperturze 5,3cm² był zdolny ($5,3\text{cm}^2 \times 0,59\text{J}/\text{cm}^2=3,1\text{J}$) przenieść serię 3-joulowych impulsów laserowych o szer. 10 ns, powtarzanych co 10 μs przez czas t=10 s. Badania w ITMO (w Rosji) potwierdziły nasze pomiary co do transmisji T>98%, odbicia R<1%, absorpcji A<1% i czasów włączania $\tau_{\text{ON}}=2,7\mu\text{s}$ (dla U=200 V) oraz „jakości” frontu falowego, lepszego niż $\lambda/4$ @ 633 nm). Niestety ITMO określił LDR=0,45 J/cm²; co czyniło LCNP4 w obecnej postaci (o czynnej aperturze 5,3cm²) niezdolnym do zamierzonej aplikacji. Aby przystosować do prac przy formowaniu ścieżki optycznej światła laserowego w metodzie Thomsona zbudowano LCNP4bis, na wzór i podobieństwo LCNP4 tylko o aperturze $3\text{J}/0,45=7\text{cm}^2$. Przetwornik ten wysłano (w lutym 2014) do badań w Rosji na „badania poligonowe”, ale współpraca Rosji z WAT została nagle przerwana przez stronę rosyjską w chwili rozpoczęcia inwazji Rosji na Półwysep krymski.

Pomimo zerwania owocnej dla OBU STRON współpracy naukowej SOI i ITMO z WAT, prace nad elementami do optyki laserowej wielkiej mocy kontynuowano.

Obserwacje licznych eksperymentów laserowych z udziałem komórek LCNP, symulacje komputerowe, nasze dyskusje z wieloma (rosyjskimi, amerykańskimi i polskimi) światowej sławy uczonymi w tej dziedzinie prowadzą do wniosku, że „najślabszym ogniwem” odporności LCD na niszczący czynnik światła laserowego są w pierwszym rzędzie

- a) przewodzące elektrody, następnie
- b) polimerowe warstwy porządkujące oraz
- c) wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia zarówno mieszaniny roboczej LC jak i warstw sterujących oraz porządkujących.

W związku z powyższym sformowano (ponownie) minimalne „wymogi” dla opracowania w pełni profesjonalnych LCNP.

- LCNP muszą być wykonane z zachowaniem najwyższych wymagań czystości,
- LCNP musi być ciekłokrystalicznym, jednopikselowym (o wym. piksela 26mm x.26mm), przetwornikiem typu (TN lub ECB) dla fali $\lambda=1.064\mu\text{m}$.
- LCNP musi być zbudowany na bazie płytek ze szkła kwarcowego (JG3S) o wym. 32,0 mm x 33,5 mm x 8 mm). (szt 80), polerowanych z optyczną jakością (płaskością nie gorszą niż $\lambda/12$ @ 1064 nm, klinowatością nie większa niż 3 arcmin),
- LCNP ma mieć czas włączenia τ_{ON} nie większy niż 1-3 μs (przy U,250V) i być odporny na niszczący czynnik światła laserowego ($\lambda=1.064\mu\text{m}$) i mocy nie mniejszej niż 3 J w 10 ns impulsach powtarzanych 100 pps w czasie 20 sek.
- Jeśli LCNP ma (jedna lub dwie) lite przewodzące elektrody to muszą to być elektrody z PITO (o oporności powierzchniowej nie mniejszej niż 1200 Ω/\square).
- LCNP ma mieć kontakty złote (Au).
- LCNP ma mieć 2 warstwy AR (antyrefleksyjne dla $\lambda=1.064\mu\text{m}$).
- LCNP ma mieć 2 warstwy blokujące BF (z SiO₂).
- LCNP ma mieć porządkowanie poprzez naporowanie (pod odpowiednim kątem warstw SiO₂ na warstwy PITO), lub poprzez „bezpośredni” rubbing na warstwach BF SiO₂).

- LCNP może być sterowany napięciem U do 250 V.

Przetwornik LCNP5 (prototyp)

LCNP5 zbudowano w oparciu o efekt TN w taki sam sposób jak LCNP5.

W przetworniku tym wyeliminowano „organiczne” warstwy porządkujące z SE130, zastępując je dielektrycznymi warstwami z SiO₂ naparowanie (pod odpowiednim kątem na warstwy PITO), W LCNP5 zbudowano jako dopasowany pod względem optycznym „stos warstw funkcyjnych” (Refractive Index Matched Liquid Crystal Cell) dla fali świetlnej o długości fali światła $\lambda=1,0628\mu\text{m}$..Aby zbudować LCNP5

- opracowano nową mieszaninę LCM5 (W2002M) o $\Delta n=0.37$ dla $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ i $\Delta\epsilon>22$. Mieszanina LCM5 (W2002M) to zmodernizowana mieszanina W2002B o $\Delta n\sim 0.35$ dla $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ i $\Delta\epsilon=23$.
- Określono bardzo dokładnie anizotropię optyczną ($\Delta n=0.352$) mieszaniny W2002B,
- Przeprowadzono analizę numeryczną LCNP5 jako stosu optycznego na podłożach QP ze szkła kwarcowego o $n\sim 1,46$ dla przetwornika ciekłokrystalicznego o grubości ($d=0,921/\Delta n$) ze wszystkimi warstwami funkcyjnymi tzn. antyrefleksyjnymi (AR), podłoży (QP) o $n\sim 1,46$, elektrodami przewodzącymi (PITO), blokującymi (BF) z SiO₂ o $n\sim 1,46$, porządkującymi (AL.) z naparowanej na warstwy PITO (pod odpowiednim kątem warstwy SiO₂ $n\sim 1,46$). Rozważając propagację wektora elektrycznego płaskiej fali świetlnej o długości fali światła $\lambda=1,0628\mu\text{m}$ w LCNP (w dziedzinie liczb zespolonych) obliczono współczynnik odbicia światła R i transmisji T rozważanego stosu interferencyjnego przy znajomości grubości d_j j-tej warstwy funkcyjnej jej zespolony współczynnik załamania światła N_j . Obliczenia numeryczne spektralnych charakterystyk $T(\lambda)$ dielektrycznych stosów interferencyjnych prowadzono za pomocą profesjonalnych programów do technologii cienkowarstwowych (z rodziny „TF CALC”) systematycznie modyfikowanych w WAT na podstawie długoletnich doświadczeń w tej dziedzinie. Modyfikowane programy były wsparte „ciągle uaktualnianą” bazą danych na $n(\lambda)$ dla PITO, HfO₂ i SiO₂. Z powyższej analizy numerycznej wynika, że naparowując na podłoże QP warstwy funkcyjne o ściśle określonych grubościach d_j i N_j powinniśmy otrzymać dla fali świetlnej o długości $\lambda=1,0628\mu\text{m}$ współczynnik R odbicia od LCNP5 pogrążonego w powietrzu o $n=0$ nie większy 0,2% ($R<0,2\%$). Znając d_j i N_j poszczególnych warstw składowych LCC można było kontrolować czy po danym procesie nanoszenia poszczególnych warstw funkcyjnych transmisja T płytki QP z daną warstwą (np. AR) pogrążona w powietrzu spełnia oczekiwane wartości przewidziane wyżej opisana symulacją.
- opracowano technologię porządkowania mieszaniny W2002M na PITO poprzez porządkowanie poprzez naparowanie (pod odpowiednim kątem warstw SiO₂ na warstwy PITO),
- opracowano technologię naparowania przekładki dystansująco - uszczelniającej z SiO₂. Uszczelkę tę o ściśle określonej grubości ($d=0,921/\Delta n$) wykonujemy w tej samej instalacji próżniowej w której nanoszono warstwy porządkujące z SiO₂.

Korzystając z powyższego opracowano i zbudowano przetworniki LCNP5 (z PITO1400) Ω/\square o aperturze 26mm (wymiarach 35mm x 32mm x 16,1mm)..

LCNP6 przebadano w WAT określając: LDR=0,65J/cm², transmisję $T>99\%$, odbicie $R<0,5\%$, absorpcje $A<1\%$ oraz $\tau_{ON}=2,5\mu\text{s}$ dla $U=200\text{V}$. Wg badań WAT, LCNP5 o czynnej aperturze 5,3 cm² jest zdolny ($5,3 \text{ cm}^2 \times 0,65 \text{ J/cm}^2=3,4 \text{ J}$) przenieść serię 3 J impulsów laserowych o szer. 10 ns, powtarzanych co 10 μs przez czas $t=10 \text{ s}$, a więc w pełni nadaje się do diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona.

Przetwornik LCNP6 (prototyp)

W oparciu o powyżej zdefiniowane i opisane podłoża QP, warstwy funkcyjne AR, PITO, BF, AL oraz technologie opracowano prototyp zaworu optycznego, zwany również jako 1.06ECBR. Jest to elektronicznie przełączana półfalówka odbiciowa na $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ mogąca znaleźć zastosowanie w diagnostyce gorącej plazmy metodą Thomsona. LCNP6 zbudowano na efekcie ECB (*Electrically Controlled Birefringence*) pracującym w modzie odbiciowym, ze zwierciadłem dielektrycznym DM (*Dielectric Mirror*), z dwiema elektrodami PITO. W tej wersji wyeliminowano oddziaływanie promieniowania laserowego z jedną przewodzącą elektrodą PITO, która jest „przykryta” dielektrycznym wielowarstwowym zwierciadłem DM o współczynniku odbicia $R>98\%$ (lub wyższym) dla $\lambda=1.064 \mu\text{m}$.

W LCNP6 mamy taką sytuację. Spolaryzowany liniowo promień lasera o $\lambda=1,06 \mu\text{m}$ pada na 1,06ECBR od strony warstwy AR. Promień przechodzi przez elektrodę PITO i oddziałyduje z nią. Pada na uporządkowaną homogenicznie (HG) warstwę nematyczną. Kierunek polaryzacji tego promienia tworzy kąt $\alpha=\pi/4$ z директором warstwy HG. Teraz dwa (prostopadłe do siebie) promienie: zwyczajny i nadzwyczajny biegną przez strukturę HG specjalnie opracowanego do tego celu ciekłego kryształu (LCM6) o grubość komórki d , odbijają się od zwierciadła dielektrycznego DM. Przy odbiciu od DM obydwa promienie doznają przyrostu fazy promienia o π , a więc promienie pokonują dystans $D=2d$ i interferują ze sobą. Jak widzimy obydwa promienie w ogóle nie oddziaływują z jedną (tylną) elektrodą PITO która jest „przykryta” zwierciadłem DM. (Elektroda „tylna” może być wykonana z Au). Jeśli grubość warstwy d będzie dopasowana do anizotropii optycznej Δn użytej mieszaniny LCM5 to sumaryczny wychodzący (od strony promienia padającego) promień będzie spolaryzowany liniowo o kierunku polaryzacji prostopadłym do płaszczyzny polaryzacji promienia padającego.

Dla potrzeb LCNP6 opracowano nową mieszaninę LCM6. Mieszanina LCM6 to zmodernizowana mieszanina W1973 (absolutna nowość, odporna na IR) o $\Delta n \sim 0.13$ dla $\lambda=1.0628 \mu\text{m}$. Z warunku pracy odbiciowego modu ECB wynikało, że LCNP5 powinien mieć grubość $d \sim 2 \mu\text{m}$ ($2d \cdot \Delta n \sim 0.53$).

W LCNP6 cały czas promień laserowy oddziałyduje z jedną (przednią) przewodzącą elektrodą i stąd (*Laser Damage Resistant*) LDR był (nieco) większy $LDR \sim 0,67 \text{ J/cm}^2$ od LDR w LCNP5. W niektórych (losowo wybranych LCNP6) badanych w Rosji zaobserwowano nawet $LCD > 1,06 \text{ J/cm}^2$, co tłumaczono, że węzeł fali stojącej w LCNP6 był ulokowany dokładnie w przewodzącej elektrodzie PITO. Przy dopasowaniu grubości d oraz współczynników załamania n_o i n_e w homogenicznej HG warstwie ciekłokrystalicznej LCM6 powstaną dwie fale stojące (zwyczajna o $\lambda_o = \lambda/n_o$ oraz nadzwyczajna $\lambda_e = \lambda/n_e$) które mogą ze sobą interferować (po wyjściu z dwójłomnego ośrodka ciekłokrystalicznego) tworząc za warstwą porządkującą (w przestrzeni warstwy przewodzącej PITO) „węzeł” fali (stojącej) wychodzącej o polaryzacji prostopadłej do fali padającej. Dobierając d_j i n_j warstw funkcyjnych PITO, BF, AL, i LCK6 na pewno istnieje taka możliwość aby na tylnym zwierciadle (DM) były strzałki fal stojących, a w miejscu pierwszej elektrody PITO oddalonej o grubość warstwy porządkującej SiO_2 (o $\lambda/4/n=1.06/4/1,5=0,18 \mu\text{m}$) od granicy LCK6 był węzeł, co uczyni dużą odporność LCNP6 na niszczący czynnik światła laserowego. W naszej pierwszej serii pilotażowej LCNP6 (o $d \sim 2 \mu\text{m}$) z mieszaniną LCM6 (o $\Delta n \sim 0,13$) badanej w Rosji, 2 szt. LCNP6 (z 6 szt) miało wysokie LDR ($LDR \sim 1.1 \text{ J/cm}^2$, $LDR \sim 1.7 \text{ J/cm}^2$), a więc w tych naszych LCNP6 był spełniony warunek powstania fali stojącej z węzłem w przedniej elektrodzie PITO.

Przetwornik LCNP7 (Prototyp)

W oparciu o powyżej zdefiniowane i opisane technologie, podłoża QP, warstwy funkcyjne AR, BF, AL, DM oraz elektrody typu IPS opracowano prototyp zaworu optycznego LCNP7 (zwany również jako 1.06IPSR). Zbudowany prototyp zaworu optycznego LCNP7 jest półfalówką odbiciową na $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ i powinien nadawać się do diagnostyki gorącej plazmy metoda Thomsona. LCNP7 zbudowano (tak samo jak LCNP6) na efekcie ECB pracującym w modzie odbiciowym ze

zwierciadłem dielektrycznym DM (Dielectric Mirror) i tylko jedną (tylną) elektrodą typu IPS „zasłoniętą” (dla promienia świetlnego) zwierciadłem DM.

W tej wersji wyeliminowano oddziaływanie promieniowania laserowego z jedną „tylną” przewodzącą elektrodą PITO, którą zastąpiła złota elektroda typu IPS przykryta dielektrycznym wielowarstwowym zwierciadłem DM.

W celu opracowania i zbudowania prototypu LCNP7

- opracowano próżniową technologię nanoszenia wielowarstwowych zwierciadła dielektrycznego DM o $R > 98\%$ dla $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,
- opracowano technologię nanoszenia i wytrawiania złotych, międzypalczystych elektrody typu IPS.

Stosując elektrody IPS wyeliminowano ostatecznie oddziaływanie światła laserowego z przewodzącymi elektrodami.

Stosując powyższe, opracowano i zbudowano LCNP7 o $d \sim 2 \mu\text{m}$ tylko z jedną złotą elektrodą typu IPS (o $b = 30 \mu\text{m}$ i $h = 10 \mu\text{m}$) nałożoną na płytki QP. Elektroda IPS została przykryta dielektrycznym zwierciadłem DM oraz warstwą porządkującą Al z naparowanego SiO_2 (pad zadany dla LCM7 kątem). W LCNP7 przewodząca elektroda IPS nie ma zatem bezpośredniego kontaktu ze światłem laserowym, gdyż jest przysłonięta zwierciadłem dielektrycznym DM oraz dielektryczną warstwą porządkującą AL.

Badania prowadzone w WAT oszacowały $\text{LDR} \sim 1,39 \text{ J/cm}^2$, co predysponuje LCNP7 do diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona.

Przetwornik LCNP8 (prototyp)

W oparciu o powyżej zdefiniowane i opisane technologie, podłoża QP, warstwy funkcyjne AR, PITO, BF, AL., DM oraz mieszaninę LCM7 opracowano prototyp zaworu optycznego, zwany również jako 1.06IFP. Jest to transmisyjny, elektronicznie przestrajalny interferometr typu Fabry-Perota (F-P) zbudowany (wg tej samej technologii jak LCNP5) z dwóch płytek QP z elektrodami PITO przykrytymi zwierciadłami dielektrycznymi DM na a które naniesiono w stosowne warstwy porządkujące z naparowanego pod kątem SiO_2 .

Znając dla LCM7 $n_o \sim 1,48$ i $n_e \sim 1,61$ dla $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ zbudowano interferometr F-P o uporządkowaniu HG i grubości $d \sim 1.8 \mu\text{m}$. Interferometr ten napełniono LCM7 (W 1974). Naszych obliczeń numerycznych (w których założono, że promień laserowy odbija się na powierzchni zwierciadła DM nie wnikając do jego głębi) wynika, że przykładając nieco pola elektryczne do warstwy (która bez pola elektrycznego ma $n_e = 1,61$ dla promienia laserowego $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ spolaryzowanego liniowo zgodnie z direktorem uporządkowania) możemy indykatrixę optyczną CK nieco obrócić aby otrzymać $n_{e \text{ EF}} = 1,59$. Wtedy Filtr F-P przepuści falę o $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ (nawet dużej mocy, ponieważ na zwierciadłach dielektrycznych będą strzałki, a w miejscu wysokooporowych elektrod P-ITO mogą być węzły).

Gdy zwiększymy pole E to Filtr F-P o grubości $d = 1.8 \mu\text{m}$ z W 1974 (która bez pola ma $n_o = 1,48$ i $n_e = 1,61$ dla $\lambda = 633 \text{nm}$) to efektywny współczynnik załamania zmaleje do $n_{e \text{ EF}} = 1,50$ i wtedy Filtr F-P nie przepuści (czyli odbije) falę o $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ (nawet dużej mocy, ponieważ na zwierciadłach dielektrycznych będą strzałki, a w miejscu wysokooporowych elektrod ITO mogą być węzły).

Po wielu próbach, stosując nawet QP polerowane do płaskości $\lambda/14 @ 1064 \text{nm}$ udało nam się zbudować „prawie dopasowanej optycznie” LCNP8. Przetwornik ten mimo potencjalnie najlepszych do diagnostyki plazmy predyspozycjach, nie nadaje się do tej aplikacji. Niewielkie zmiany temperatury zmieniają współczynniki n_o i n_e mieszaniny roboczej LCM7, z przetwornik przestaje działać.

5. Elektroniczne ciekłokrystaliczne półfalówki do interferometrów 3D i 5D

W numerycznej metrologii warsztatowej istnieje potrzeba kierowania trzech (lub) więcej spójnych promieni laserowych o $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ w trzy (ortogonalne) lub (w pięć) inne kierunki przestrzeni. Do tego celu potrzebne są wysokospecjalizowane przełączniki (0,63TN1 i 63TN2) stanu polaryzacji. Przetworniki 0,63TN1 i 63TN2 powinny precyzyjnie przełączać kąt płaszczyzny polaryzacji Φ o $90,0^\circ \pm 0,5^\circ$ w temperaturach pracy urządzenia (od 20°C to 85°C). Transmisja T tych przetworników winna być nie mniejsza niż 95%, a współczynnik odbicia wstecznego R powinien być mniejszy niż 1%.

Przetworniki 0,63TN1 i 63TN2 opracowano jako „optycznie dopasowany stosy” składające się z wyżej opisanych warstw funkcyjnych (AR, QP, PITO, BF, AL.). Przetworniki 0,63TN1 i 63TN2 to wysokospecjalizowana (elektronicznie sterowana) półfalówki (na efekcie TN o $d \sim 15 \mu\text{m}$) pracujące w „szóstym” maksimum interferencyjnym. Do budowy 0,63TN1 i 63TN2 zastosowano wysokodwójłomną mieszaninę W2020M. Półfalówki 63TNP1 i TNP2 zostały opracowane w Wojskowej Akademii Technicznej w ramach projektu POIG.01.03.01-14016/08 dla firmy LASERTEX we Wrocławiu. Mertyki tych urządzeń zamieszczono w Załączniku 6.

Publikacje

1. Z. Raszewski, E. Kruszelnicki-Nowinowski, J. Kędzierski, P. Perkowski, W. Piecek, R. Dąbrowski, P. Morawiak, K. Ogrodnik, „Electrically tunable liquid crystal filters”, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 525, 112 (2010),
2. M.M. Chrzanowski, J. Zieliński, E. Nowinowski-Kruszelnicki, W. Piecek, M. Olifierczuk, H. Lenzion, J. Brzeziński, „Orienting Layers Preparation Technology For Photoalignment In Liquid Crystal Displays”, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 544, 1158 (2011),
3. M.M. Chrzanowski, J. Zieliński, M. Olifierczuk, J. Kędzierski, E. Nowinowski-Kruszelnicki, „Photoalignment – an alternative aligning technique for Liquid Crystal Displays”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 48, 7-13 (2011).
4. E. Nowinowski-Kruszelnicki, L. Jaroszewicz, Z. Raszewski, L. Soms, W. Piecek, P. Perkowski, J. Kędzierski, R. Dąbrowski, M. Olifierczuk, K. Garbat, E. Miszczyk, „Liquid crystal cell for space-borne laser rangefinder to space mission applications”, *Opto-electronics Review*, 20, 3152 (2012),
5. M. M. Chrzanowski, J. Zieliński, M. Olifierczuk, J. Kędzierski, M. Zgutka, R. Mazur, W. Piecek, H. Maciejewski, "Liquid Crystal Aligning Ability of Photosensitive Polymer Material," *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 553 (1), 58-65 (2012).
6. Z. Raszewski, W. Piecek, L. Jaroszewicz, L. Soms, J. Marczak, E. Nowinowski-Kruszelnicki, P. Perkowski, J. Kędzierski, E. Miszczyk, M. Olifierczuk, P. Morawiak, R. Mazur, „Laser damage resistant nematic liquid crystal cell”, *Journal of Applied Physics* 114 (5), (2013).
7. L. Jaroszewicz, R., Z. Raszewski, W. Piecek, P. Perkowski, E. Nowinowski, *Liquid Crystal Light Modulators*. (Bel Studio Sp z o.o., Warszawa, 2014)
8. Z. Raszewski, W. Piecek, L. Jaroszewicz, E. Nowinowski-Kruszelnicki, P. Perkowski, L. Soms, R. Dąbrowski, J. Kędzierski, M. Olifierczuk, M. Mrukiewicz, E. Miszczyk, P. Morawiak, R. Mazur, K. Kowiorski, „High birefringence liquid crystals mixtures and their selected applications”, *Advanced Materials Research*, 909, 12-18 (2014).
9. Z. Raszewski, W. Piecek, L. Jaroszewicz, R. Dąbrowski, E. Nowinowski-Kruszelnicki, L. Soms, M. Olifierczuk, J. Kędzierski, P. Morawiak, R. Mazur, M. Mrukiewicz, K. Kowiorski,

„Transparent Laser Damage Resistant Nematic Liquid Crystal Cell LCNP3”, *Opto-electronics Review*, 22, 196 (2014),

Załącznik nr 1

**Metryka ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji LCC
do dalmierza laserowego łączownika Międzynarodowej Misji Kosmicznej „Phobos-Ground opracowanego
i wytworzonego w WAT dla State Optical Institute
in St. Petersburg (Rosja) w ramach POIG 01.03-14-016/08**



**UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO**



LIQUID CRYSTAL CELL for Space-Borne Laser Rangefinder for International Space Mission “Fobos-Grunt”

The Liquid Crystal Cell (1.06LCC) was developed and manufactured by Institute of Applied Physics at Military University of Technology (MUT) in Warsaw, Poland to satisfy all technical requirements that were sent to Institute of Applied Physics at Military University of Technology by Vavilov State Optical Institute in St. Petersburg, Russia on 15 February, 2010.

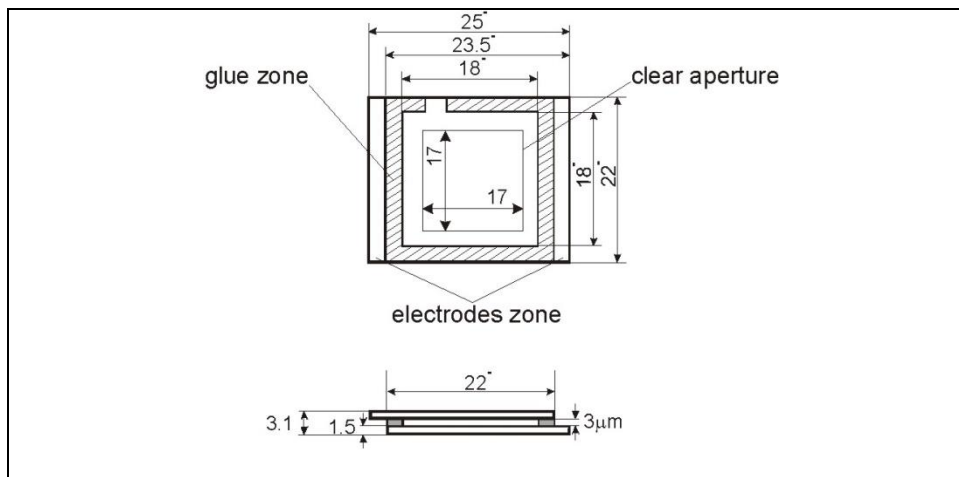
TECHNICAL PARAMETERS OF 1.06LCC Nr. 37

| Parameter | Value, Unit |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| External dimensions | 25,0 mm x 22,0 mm x 3,1 mm |
| Working aperture | 17 mm |
| Operating temperature | from 20°C to 40°C |
| Storage and transportation temperature | from -10°C to 50°C |
| Work wavelength λ | 1,064 μm |
| Electro-Optical Effect applied in LCN | TN (Twisted Nematic) |
| Liquid Crystal Mixture (LCM) applied in LCN | W1825K |
| Optical anisotropy Δn of LCM for $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ at 25°C | 0.37 |
| Ordinary refractive index n_o of LCM for 1,064 μm at 25°C | 1.53 |
| Dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$ of LCM for $f=1.5\text{Hz}$ at 25°C | 17.0 |
| Thickness d of LCM layer in LCC | 2.3μm |
| Transmission T at the wavelength 1,064 μm, | Not less than 95% |
| Reflection R at the wavelength 1,064 μm, | < 1% |
| Absorption A at the wavelength 1,064 μm, (A=100-T+R) | ~ 2% |
| Switch-on time t_{ON} for Driving Voltage $U_d = 10\text{V}$ | 0,89 ms |
| Switch-off time t_{OFF} for Driving Voltage $U_d = 10\text{V}$ | 2.70 ms |
| Contrast Ratio CR in switch-on regime | Not less than 300:1 |

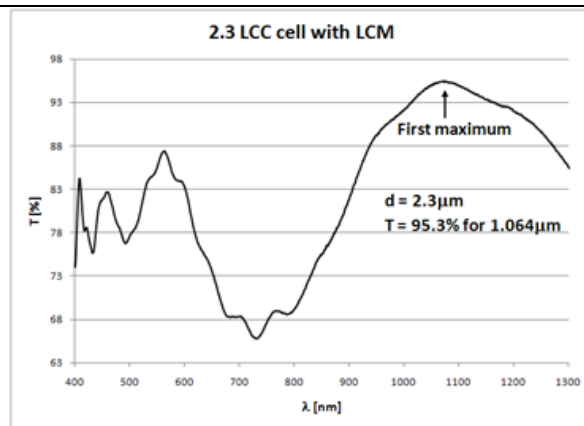


UNIA
EUROPEJSKA





Lay out of 1.06LCC



Transmission T versus wave-length λ of 2.3LCC nr.37 placed between crossed polarizers when the plane of polarization of incident light was perpendicular to n at the entrance of TN layer.

prof. Leszek Jaroszewicz
Warsaw, 11. 04. 2011

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl



Załącznik nr 2

Metryka ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji 0.81TN
do dalmierza laserowego na $\lambda=0.808\mu\text{m}$ opracowanego i wytworzonego w WAT
dla State Optical Institute in St. Petersburg (Rosja) w ramach POIG 01.03-14-016/08



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



NEMATIC LIQUID CRYSTAL CELL 0.81LCN **for Laser Wavelength $\lambda=0.808\mu\text{m}$**

Nematic Liquid Crystal Cell (0.81LCN) was developed and manufactured by Institute of Applied Physics at Military University of Technology (MUT) in Warsaw, Poland to satisfy all technical requirements that were sent to Institute of Applied Physics at Military University of Technology by Vavilov State Optical Institute in St. Petersburg, Russia on 21 February, 2012.

TECHNICAL PARAMETERS OF 0.81LCN5

| Parameter | Value, Unit |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| External dimensions | 25.0 mm x 22.0 mm x 3.1 mm |
| Working aperture | 17 mm |
| Operating temperature | from 20°C to 40°C |
| Storage and transportation temperature | from -10°C to 50°C |
| Work wavelength λ | 0.808 μm |
| Electro-Optical Effect applied in LCN | TN (Twisted Nematic) |
| Liquid Crystal Mixture (LCM) applied in LCN | W1820 (in the MUT abbreviation) |
| Optical anisotropy Δn of LCM for $\lambda=0.808 \mu\text{m}$ at 25°C | 0.28 |
| Ordinary refractive index n_o of LCM for 0.808 μm at 25°C | 1.54 |
| Dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$ of LCM for $f=1.5\text{Hz}$ at 25°C | 19.5 |
| Thickness d of LCM layer in LCC | 2.5 μm |
| Transmission T at the wavelength 0.808 μm , | Not less than 95% |
| Reflection R at the wavelength 0.808 μm , | < 1% |
| Absorption A at the wavelength 0.808 μm , ($A=100-T+R$) | ~ 2% |
| Switch-on time t_{ON} for Driving Voltage $U_d = 10V$ | 0.58 ms |
| Switch-off time t_{OFF} for Driving Voltage $U_d = 10V$ | 4.20 ms |
| Contrast Ratio CR in switch-on regime | Not less than 300:1 |

prof. Leszek Jaroszewicz
Warsaw, 27. 10. 2012

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl



UNIA
EUROPEJSKA



**Metryka ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji LCNP1
do diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona opracowanego i wytworzonego w WAT dla State
Optical Institute in St. Petersburg (Rosja) w ramach POIG 01.03-14-016/08**



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



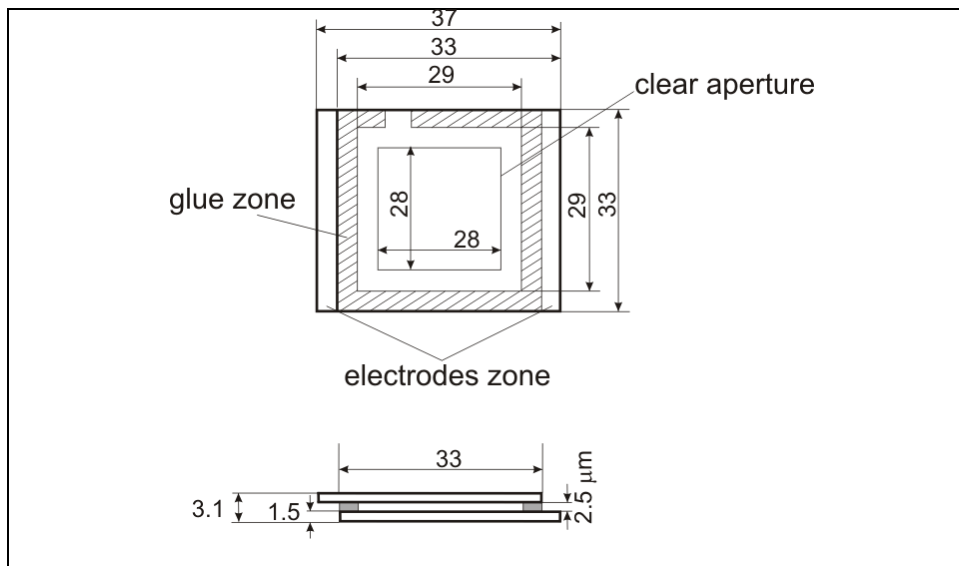
LIQUID CRYSTAL CELL

for diagnostic of a dense plasma (so-called Thomson diagnostic)

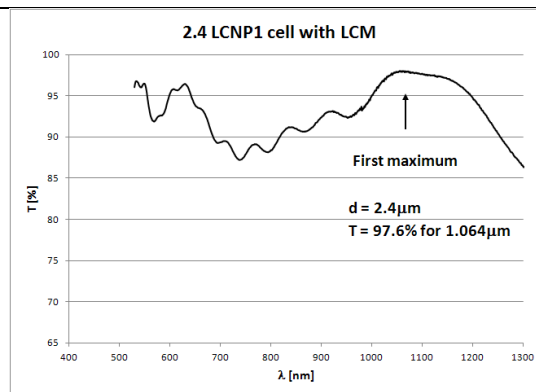
The Liquid Crystal Cell (LCNP1) was developed and manufactured by Institute of Applied Physics at Military University of Technology (MUT) in Warsaw, Poland to satisfy all technical requirements that were sent to Institute of Applied Physics at Military University of Technology by Vavilov State Optical Institute in St. Petersburg, Russia on 12 February, 2012.

TECHNICAL PARAMETERS OF 2.4LCNP1

| Parameter | Value, Unit |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| External dimensions | 37,0 mm x 33,0 mm x 3,1 mm |
| Working aperture | 28 mm |
| Operating temperature | from 20°C to 40°C |
| Work wavelength λ | 1,064 μm |
| Electro-Optical Effect applied in LCN | TN (Twisted Nematic) |
| Liquid Crystal Mixture (LCM) applied in LCN | W1825M |
| Optical anisotropy Δn of LCM for $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ at 25°C | 0.37 |
| Ordinary refractive index n_o of LCM for 1,064 μm at 25°C | 1.53 |
| Dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$ of LCM for $f=1.5\text{Hz}$ at 25°C | 17.0 |
| Thickness d of LCM layer in LCC | 2.4μm |
| Transmission T at the wavelength 1,064 μm, | Not less than 97% |
| Reflection R at the wavelength 1,064 μm, | < 1% |
| Absorption A at the wavelength 1,064 μm, ($A=100-T+R$) | < 2% |
| Switch-on time t_{ON} for Driving Voltage $U_d = 200\text{V}$ | 4,3 μs |
| Contrast Ratio CR in switch-on regime | Not less than 300:1 |
| Flatness of the wavefront | $\sim \lambda/6$ @ 633 nm |
| Laser Damage Resistant of LCNP1 | 0,42J/cm² |



Lay out of LCNP1



Transmission T versus wave-length λ of 2.4LCP1 placed between crossed polarizers when the plane of polarization of incident light was perpendicular to n at the entrance of TN layer.

prof. Leszek Jaroszewicz
Warsaw, 15. 07. 2012

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl



**Metryka ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji LCNP3
do diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona opracowanego i wytworzonego w WAT dla State
Optical Institute in St. Petersburg (Rosja) w ramach POIG 01.03-14-016/08**



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



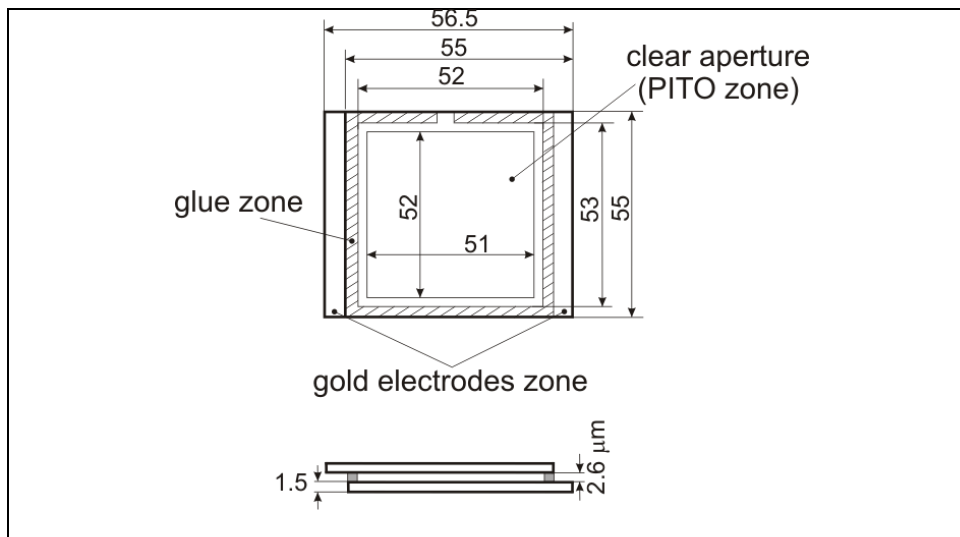
LIQUID CRYSTAL CELL

for diagnostic of a dense plasma (so-called Thomson diagnostic)

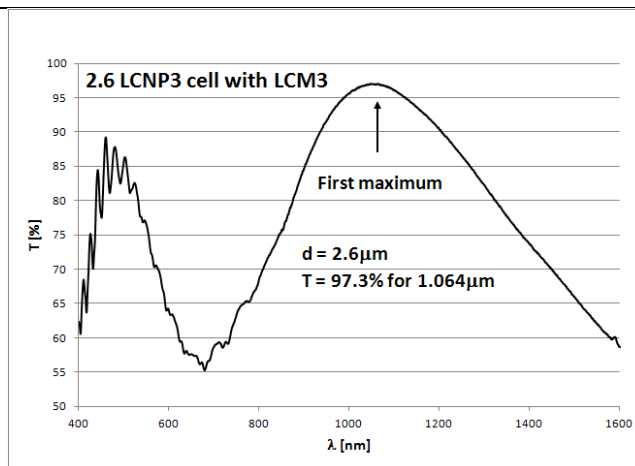
The Liquid Crystal Cell (LCNP3) was developed and manufactured by Institute of Applied Physics at Military University of Technology (MUT) in Warsaw, Poland to satisfy all technical requirements that were sent to Institute of Applied Physics at Military University of Technology by Vavilov State Optical Institute in St. Petersburg, Russia on 12 February, 2012.

TECHNICAL PARAMETERS OF 2.6LCNP3

| Parameter | Value, Unit |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| External dimensions | 56,6mm x 55,0mm x 3,1mm |
| Working aperture | 50 mm |
| Operating temperature | from 20°C to 40°C |
| Work wavelength λ | 1,064 μm |
| Electro-Optical Effect applied in LCNP3 | TN (Twisted Nematic) |
| Liquid Crystal Mixture (LCM3) applied in LCNP3 | W1791M |
| Optical anisotropy Δn of LCM3 for $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ at 25°C | 0.36 |
| Ordinary refractive index n_o of LCM3 for 1,064 μm at 25°C | 1.53 |
| Dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$ of LCM for $f=1.5\text{Hz}$ at 25°C | 17.0 |
| Thickness d of LCM layer in LCC | 2.6μm |
| Transmission T at the wavelength 1,064 μm, | Not less than 97% |
| Reflection R at the wavelength 1,064 μm, | < 1% |
| Absorption A at the wavelength 1,064 μm, ($A=100-T+R$) | < 2% |
| Switch-on time t_{ON} for Driving Voltage $U_d = 200\text{V}$ | 2,8 μs |
| Contrast Ratio CR in switch-on regime | Not less than 300:1 |
| Flatness of the wavefront | $\sim \lambda/6$ @ 633 nm |
| Laser Damage Resistant of LCNP3 | 0,48 J/cm² |



Lay out of LCNP3



Transmission T versus wave-length λ of 2.6LCNP3 placed between crossed polarizers when the plane of polarization of incident light was perpendicular to n at the entrance of TN layer.

prof. Leszek Jaroszewicz
Warsaw, 10. 06. 2013

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl



**Metryka ciekłokrystalicznego przełącznika stanu polaryzacji LCNP4
do diagnostyki gorącej plazmy metodą Thomsona opracowanego i wytworzonego w WAT dla State
Optical Institute in St. Petersburg (Rosja) w ramach POIG 01.03-14-016/08**



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



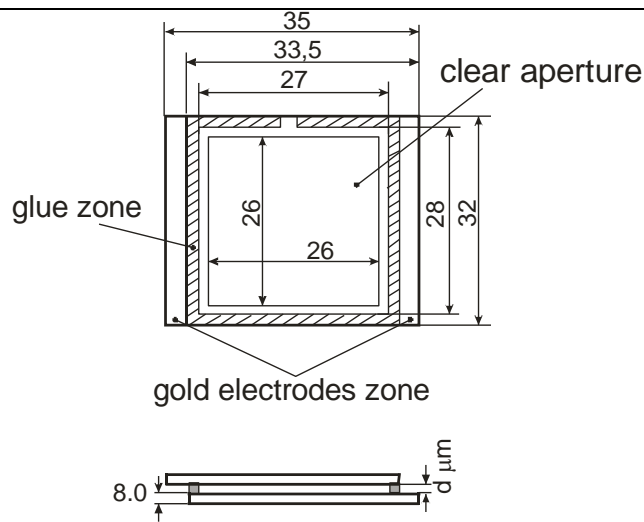
LIQUID CRYSTAL CELL

for diagnostic of a dense plasma (so-called Thomson diagnostic)

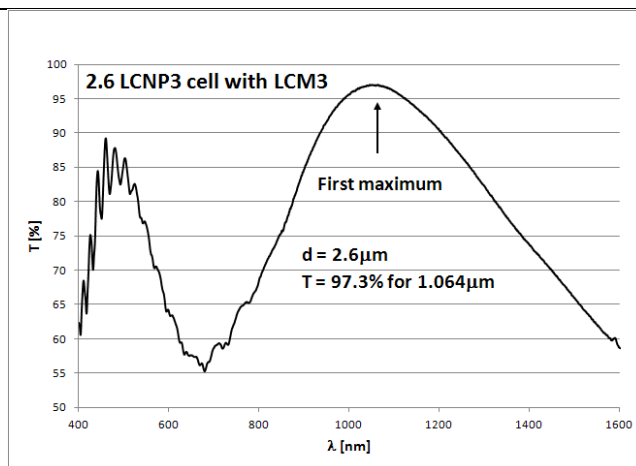
The Liquid Crystal Cell (LCNP4) was developed and manufactured by Institute of Applied Physics at Military University of Technology (MUT) in Warsaw, Poland to satisfy all technical requirements that were sent to Institute of Applied Physics at Military University of Technology by Vavilov State Optical Institute in St. Petersburg, Russia on 12 February, 2012.

TECHNICAL PARAMETERS OF 2.5LCNP4

| Parameter | Value, Unit |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| External dimensions | 35,0 mm x 32,0 mm x 16,1 mm |
| Working aperture | 26 mm |
| Operating temperature | from 20°C to 40°C |
| Work wavelength λ | 1,064 μm |
| Electro-Optical Effect applied in LCNP4 | TN (Twisted Nematic) |
| Liquid Crystal Mixture (LCM3) applied in LCNP4 | W1791M |
| Optical anisotropy Δn of LCM3 for $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ at 25°C | 0.36 |
| Ordinary refractive index n_o of LCM3 for 1,064 μm at 25°C | 1.53 |
| Dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$ of LCM for $f=1.5\text{Hz}$ at 25°C | 17.0 |
| Thickness d of LCM layer in LCC | 2.5μm |
| Transmission T at the wavelength 1,064 μm, | Not less than 98% |
| Reflection R at the wavelength 1,064 μm, | < 1% |
| Absorption A at the wavelength 1,064 μm, ($A=100-T+R$) | < 1% |
| Switch-on time t_{ON} for Driving Voltage $U_d = 200\text{V}$ | 2,7 μs |
| Contrast Ratio CR in switch-on regime | Not less than 300:1 |
| Flatness of the wavefront | $\sim \lambda/6$ @ 633 nm |
| Laser Damage Resistant of LCNP4 | 0,59J/cm² |



Lay out of LCNP4



Transmission T versus wave-length λ of 2.5LCP4 placed between crossed polarizers when the plane of polarization of incident light was perpendicular to n at the entrance of TN layer.

prof. Leszek Jaroszewicz
Warsaw, 15. 12. 2013

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl



Metryka elektronicznej ciekłokrystalicznej półfalówki LCHWP opracowanej i wytworzonej w WAT dla LASERTEX (Wrocław) w ramach POIG 01.03-14-016/08



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



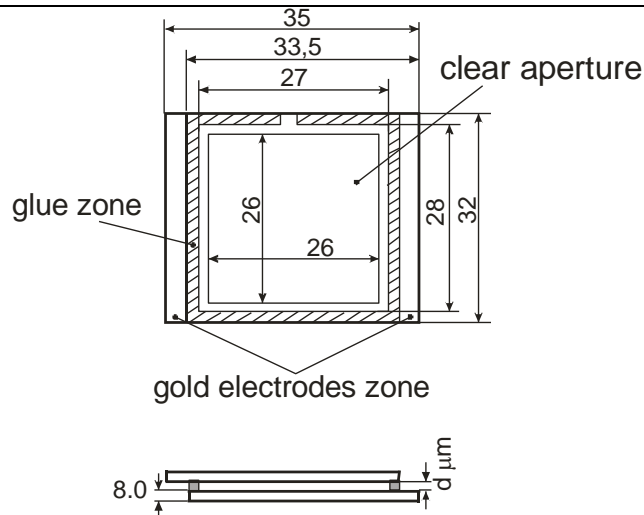
ELEKTRONICZNA CIEKŁOKRYSTALICZNA PÓLFALÓWKA TYP 0,63TNP1

0,63TNP1 TO IZOLATOR OPTYCZNY NA $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$, TRANSMISYJNY NA EFEKCIE TN (TWISTED NEMATIC), Z NAPAROWANYMI ELEKTRODAMI PITO (POROUS INDIUM TIN OXIDE), WARSTWAMI BLOKUJĄCYMI BF I ANTYREFLEKSYNMI AR.

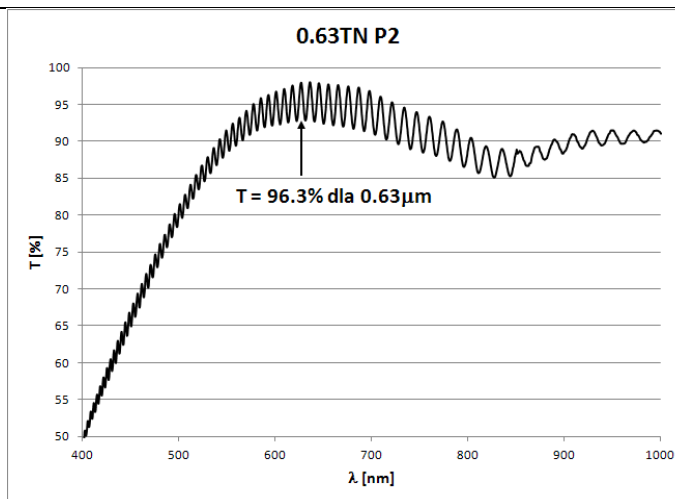
63TNP1 OPRACOWANY W WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ
W RAMACH PROJEKTU POIG.01.03.01-14016/08 DLA
FIRMY LASERTEX WE WROCŁAWIU

PRZETWORNIK 0,63TN1 (NR 3) WYKAZUJE NASTĘPUJĄCE PARAMETRY:

| PARAMETR | WARTOŚĆ, JEDNOSTKA |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Wymiary zewnętrzne | 35,0 mm x 32,0 mm x 16,1 mm |
| Apertura | 26 mm |
| Temperatura pracy | od 20°C to 85°C |
| Temperatura przechowywania | od -10°C to 100°C |
| Długość fali pracy przetwornika λ | 0,6328 μm |
| Efekt elektrooptyczny | TN (Twisted Nematic) |
| Mieszanina ciekłokrystaliczna | W2020 (wg. oznaczeń WAT) |
| Anizotropia optyczna Δn dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T=25^\circ\text{C}$ | 0.585 |
| Zwycz. współ. załama. n_o dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T=25^\circ\text{C}$ | 1.4608 |
| Anizotropia dielektryczna $\Delta \epsilon f$ dla $f=1.5\text{Hz}$ i 25°C | 15.0 |
| Grubość warstwy ciekłokrystalicznej | 15,2 μm |
| Transmisja T dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T=25^\circ\text{C}$, | Nie mniej niż 95% |
| Odbicie R dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T=25^\circ\text{C}$, | Mniej niż 1% |
| Absorpcja A dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T=25^\circ\text{C}$, | ~ 2% |
| Czas włączenia t_{ON} dla $U_d = 10\text{V}$ | 7,9 ms |
| Czas wyłączenia t_{OFF} dla $U_d = 10\text{V}$ | 90 ms |
| Kontrast CR | Nie mniej niż 300:1 |
| Kąt przełączenia płasz. pol. dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T=25^\circ\text{C}$ | $90,0^\circ \pm 0,5^\circ$ |
| Płaskość frontu falowego | Nie gorsza niż $\lambda/4 @ 0,6328 \mu\text{m}$ |



Schemat budowy przetwornika 0,63TN1



Widmowa charakterystyka transmisji $T(\lambda)$ przetwornika 0,63TNP1 dla układu birefrakcyjnego.

prof. Leszek Jaroszewicz
Warszawa, 26. 06. 2014

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl



Metryka elektronicznej ciekłokrystalicznej półfalówki LCHWP opracowanej i wytworzonej w WAT dla LASERTEX (Wrocław) w ramach POIG 01.03-14-016/08



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



ELEKTRONICZNA CIEKŁOKRYSTALICZNA PÓŁFALÓWKA DO INTERFEROMETRU 3D TYP 0,63TNP2

0,63TNP2 TO IZOLATOR OPTYCZNY NA $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$, TRANSMISYJNY NA EFEKCIE TN (TWISTED NEMATIC) Z „DOPASOWANYMI OPTYCZNIEMI” ELEKTRODAMI (PITO), WARSTWAMI PORZĄDKUJĄCYMI (SE130), BLOKUJĄCYMI (SiO_2) I ANTYREFLEKSYNMI (AR).

PÓŁFALÓWKA 63TNP2 ZOSTAŁA OPRACOWANA
W WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ
W RAMACH PROJEKTU POIG.01.03.01-14016/08
DLA FIRMY LASERTEX WE WROCŁAWIU

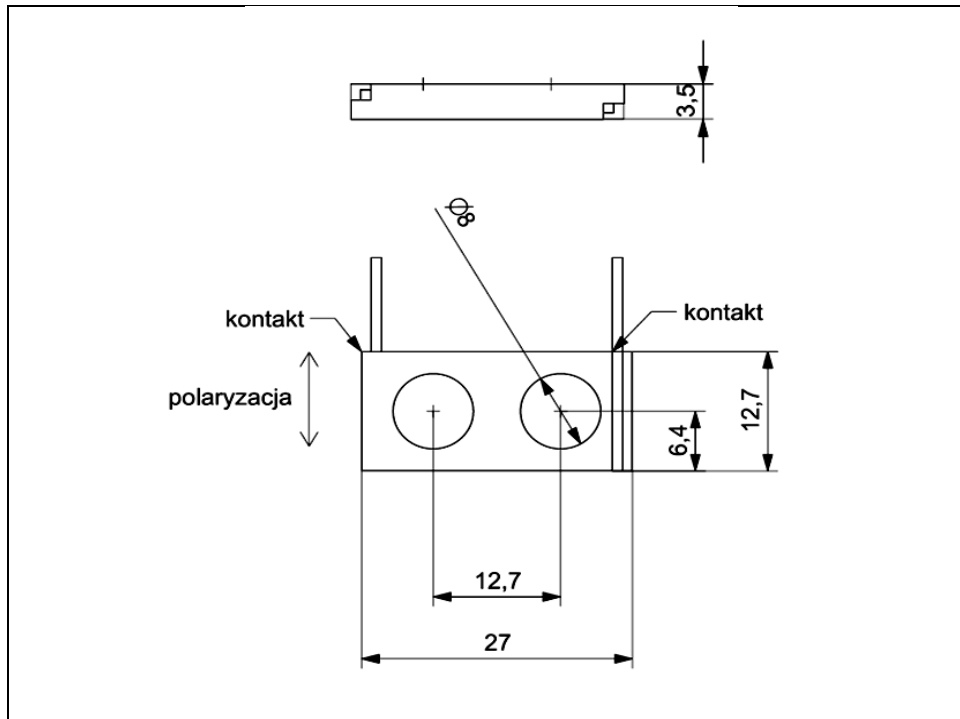
PRZETWORNIK 0,63TN2 (Nr 4) WYKAZUJE NASTĘPUJĄCE PARAMETRY:

| PARAMETR | WARTOŚĆ, JEDNOSTKA |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Wymiary zewnętrzne | 25,4 mm x 12,7 mm x 3,5 mm |
| Apertura | 2 tory optyczne po $\Phi 8.0$ mm z separacją 4,7 mm |
| Temperatura pracy | od 20°C to 85°C |
| Temperatura przechowywania | od -10°C to 100°C |
| Długość fali pracy przetwornika λ | 0,6328 μm |
| Efekt elektrooptyczny | TN (Twisted Nematic) |
| Mieszanina ciekłokrystaliczna | W2020M* (wg. oznaczeń WAT) |
| Anizotropia optyczna Δn dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^\circ\text{C}$ | 0.41 |
| Zwycz. współ. załama. n_o dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^\circ\text{C}$ | 1.54 |
| Anizotropia dielektryczna $\Delta \epsilon f$ dla $f=1.0\text{kHz}$ i 25°C | 15.4 |
| Grubość warstwy ciekłokrystalicznej | 13.3 μm |
| Transmisja T dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^\circ\text{C}$, | Nie mniej niż 95% |
| Odbicie R dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^\circ\text{C}$, | Mniej niż 0,8% |
| Absorpcja A dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^\circ\text{C}$, | ~ 2% |
| Czas włączenia t_{ON} dla $U_d = 10V$ | 2,0 ms |
| Czas wyłączenia t_{OFF} dla $U_d = 10V$ | 60 ms |
| Kontrast CR | Nie mniej niż 300:1 |
| Kąt przełączenia płasz. pol. dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^\circ\text{C}$ | 90,0 $^\circ$ ±0,5 $^\circ$ |
| Płaskość frontu falowego | Nie gorsza niż $\lambda/4$ @ 0,6328 μm |

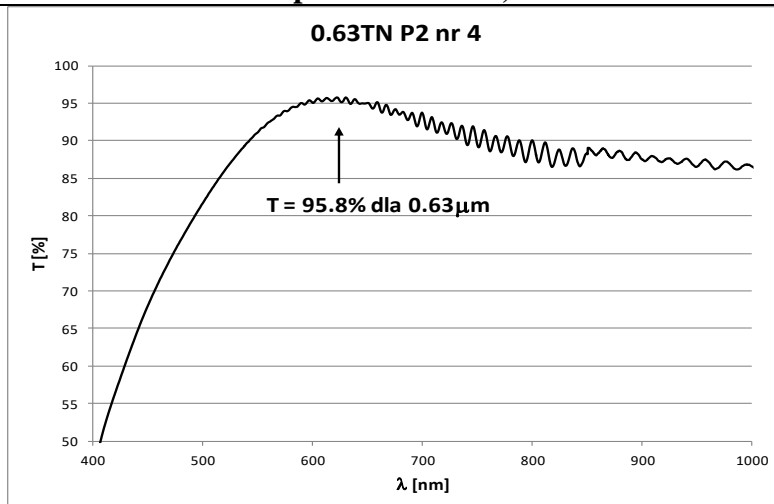


UNIA
EUROPEJSKA





Schemat przetwornika 0,63TNP2



Widmowa charakterystyka transmisji $T(\lambda)$ przetwornika 0,63TNP2 nr 4 dla światła zdepolaryzowanego.

prof. Leszek Jaroszewicz
Warszawa, 10. 02. 2015

Military University of Technology
Institute of Applied Physics
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warsaw, POLAND

phone: +48 22 683-9014
fax: +48 22 683-9317
www.photonics-kp.eu
jarosz@wat.edu.pl

