

BSD - optyczny, analogowy deflektor promieniowania laserowego z ciekłokrystaliczną warstwą aktywną

Demonstrator technologii

1. Wprowadzenie i geneza badań

Jedną z najbardziej przydatnych właściwości lasera jest to, że generowana wiązka promieniowania spójnego, może rozprzestrzeniać na duże odległości wzdłuż zdefiniowanych linii prostych. Dla systemów pomiarów optycznych stabilne właściwości takiej wiązki są krytycznie ważne dla ich funkcjonowania. W szczególności, dla prawidłowego działania laserowych urządzeń pomiarowych konieczne jest utrzymanie stabilnego rozkładu gęstości mocy wiązki laserowej w obszarze celu (detektora pomiarowego). Tylko taka stabilna wiązka prawidłowo odzwierciedla parametry ośrodka, który penetruje lub powierzchnię, na której ulega odbiciu. Stabilność wiązki jest tu parametrem koniecznym, gdy wiązka musi być wprowadzona do światłowodu jednomodowego lub gdy wiązka musi dokładnie trafić w cel na dużą odległość. Źródła ewentualnej niestabilności rozkładu mocy wiązki laserowej w obszarze celu generują zarówno sam laser, jak i ośrodek, który wiązka penetruje. Wpływ niejednorodności optycznych ośrodka penetrowanego przez wiązkę laserową daje się w znacznym stopniu wyeliminować w warunkach pomiarów odległości poprzez zastosowanie wiązki odniesienia podążającej tym samym torem, co wiązka pomiarowa. Źródłami fluktuacji w obszarze lasera mogą być wibracje spowodowane oddziaływaniem otoczenia lub fluktuacje termiczne. Mogą one mieć wpływ na działanie rezonatora, przez co zakłóceniu ulega stabilność generacji wiązki. Wpływ fluktuacji termicznych może przejawiać się ponadto w występowaniu zjawisko termicznego soczewkowania wiązki laserowej, co może mieć także wpływ na kierunek biegu wiązki opuszczającej laser. Niestety fluktuacje wiązki generowane w obszarze samego lasera są niemal niemożliwe do usunięcia w całości mimo stosowania technik optycznych, kontroli wibracji i wartości oraz rozkładów temperatur. Dlatego też, dla zapewnienia stałych parametrów wiązki konieczne jest dokonywanie ich korekt poza układem optycznym lasera.

Inspiracją do podjęcia badań nad opracowaniem układu wykonującego funkcję optyczną dynamicznej korekty wybranych aberracji spójnej wiązki laserowej były m.in. doświadczenia firmy Lasertex specjalizującej się w projektowaniu i budowie precyzyjnych układów pomiarowych odległości i kątów prowadzonych metodami optycznymi.

Kolejną motywacją do podjęcia badań nad urządzeniami do elektronicznego sterowania kierunkiem biegu promienia i jego profilowania była potrzeba opracowania urządzenia, działającego poprawnie w warunkach mobilnych, gdzie działają takie czynniki duże przyspieszenia i zmienne warunki termiczne. W takich warunkach istniejące mechaniczne urządzenia do sterowania kierunkiem biegu promienia laserowego nie spełniają oczekiwań.

Innym wskazaniem do podjęcia prac nad urządzeniem do korekty parametrów wiązki laserowej były potrzeby w zakresie precyzyjnego (z precyzją rzędu sekundy kątowej) pozycjonowania pola opromieniowywanego wiązką laserową z wykorzystaniem elementów niemechanicznych, manifestowane przez grupy badawcze Instytutu optoelektroniki WAT.

Najważniejsze czynności, które powinny być wykonane to:

- korekta kierunku biegu promienia,
- korekta rozkładu mocy w wiązce laserowej,
- korekta rozbieżności wiązki.

Głównym celem prowadzonych prac było zaprojektowanie, wykonanie i charakteryzacja innowacyjnych elementów optycznych wykorzystujących warstwę ciekłokrystaliczną, jako ośrodek aktywny optycznie, o przestrzennym rozkładzie właściwości optycznych sterowanym zewnętrznym polem elektrycznym. Planowane rozwiązania w tym zakresie wymagały wyselekcjonowania drogi jednoczesnej realizacji założonych funkcji optycznych na drodze teoretycznej oceny i testów laboratoryjnych kilku alternatywnych koncepcji.

Zadaniem podjętym w ramach realizacji Projektu było **wykonanie w pełni funkcjonalnego demonstratora urządzenia do sterowania kierunkiem biegu promienia laserowego ($\lambda=632,8$ nm), ozn. BSD, w zakresie -100 arcsec do $+100$ arcsec, który nie degraduje stanu polaryzacji linowej i rozkładu gęstości mocy w profilu wiązki.** Jednocześnie podjęto zadanie rozpoznania możliwości:

- korekty rozkładu mocy w wiązce laserowej,
- korekta rozbieżności wiązki,
- modulacji (korekty) kształtu frontu falowego za pomocą profilu pola elektrycznego i badanie zakresu maksymalnego odchylenia kierunku biegu wiązki bez ww. deformacji.

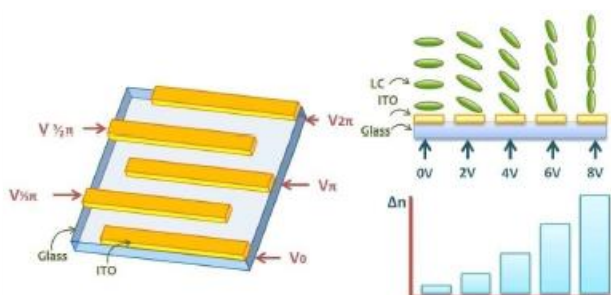
2. Element BSD do sterowania kierunkiem biegu promienia laserowego – koncepcja, konstrukcja, technologie wykonania

Podstawą działania planowanych elementów BSD było wykorzystanie przestrzennych, ciekłokrystalicznych struktur dwójłomnych optycznie, których efektywny współczynnik załamania (ten, którego doświadcza, spolaryzowany liniowo, modulowany promień laserowy) jest sterowany zewnętrznym polem elektrycznym. Koncepcja urządzenia do sterowania kierunkiem spolaryzowanej liniowo wiązki laserowej polega na wytworzeniu struktury pełniącej funkcję klina optycznego, gdzie sterowany elektrycznie, zmienny, liniowy, profil rozkładu efektywnego współczynnika załamania światła jest funkcjonalnym analogiem klina optycznego o zmiennym „kącie rozwarcia”. Założony „klin” optyczny dokonuje odchylenia kierunku biegu frontu falowego, który to kąt można sterować poprzez zmianę profilu rozkładu efektywnego współczynnika załamania. Opcja modulowanego polem elektrycznym profilu rozkładu współczynnika załamania niesie także ze sobą możliwość kształtowania go w formie struktur będących analogiem soczewek, siatek lub innych funkcjonalnych elementów optycznych. Jednocześnie poprzez zmianę rozkładu efektywnego współczynnika załamania ośrodka w przekroju klina, dokonuje się modyfikacja kształtu pomierzchu frontu falowego na wyjściu z układu optycznego. Dobrym przybliżeniem takiego „wielofunkcyjnego” klina jest siatka fazowa o wysokiej rozdzielczości z indywidualnie sterowanymi polami.

Źródła literaturowe donoszą o wadach tego typu struktur, polegających głównie na występowaniu efektów dyfrakcyjnych, powodujących wysokie straty mocy wiązki modulowanej, oraz zjawiskach wywołujących degradację stanu polaryzacji tej wiązki. Dlatego, na etapie projektowania elementów do sterowania kierunkiem wiązki laserowej, dokonano analizy funkcjonowania wcześniej realizowanych elementów tego typu (m.in. skorzystano z doświadczeń zespołu CEMDATIC, Madryt, Hiszpania). Przeprowadzone studia literaturowe i próby pilotażowe wskazały, że maksymalne wyeliminowanie strat energii i aberracji płaskiej fali spójnej, będzie wymagało

dostosowania technologii wykonania przetworników do sterowania kierunkiem biegu promienia laserowego (ozn. BSD) i nowo opracowanych materiałów ciekłokrystalicznych, w tym unikalnych, opracowanych w WAT materiałów o wysokiej dwójtomności ($\Delta n > 0,35$) do realizacji funkcji ww. klina optycznego. Kluczową rolę w realizacji projektu ma zastosowanie takich technologii jak:

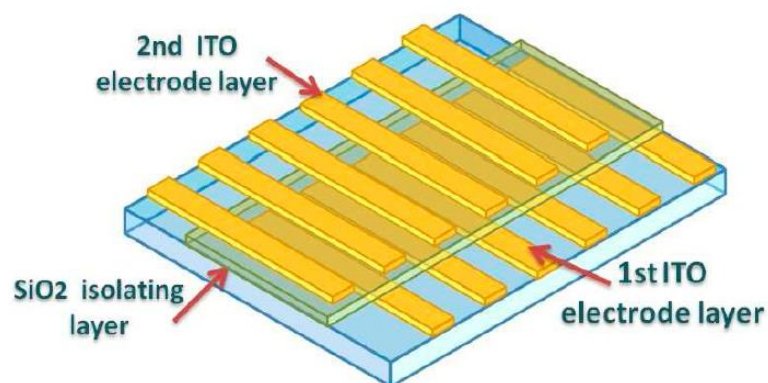
- wysokorozdzielcza litografia,
- suche, wysokorozdzielcze trawienie elektrod ITO laserem,
- zastosowanie podłoży optycznych o wysokiej płaskości i płasko równoległości
- zastosowanie innowacyjnych, wysokodwójtomnych materiałów ciekłokrystalicznych,
- sterowanie z wykorzystaniem generatora podającego (z wysoką rozdzielczością) różnicę potencjałów do każdego pola struktury optycznej,
- zastosowanie elektrod PITO, o współczynniku załamania dopasowanym po współczynnik załamania podłoża ze szkła kwarcowego ($n=1,51$) co jest kluczowym zagadnieniem dla eliminacji bariery optycznej na granicy szkło-elektroda,
- wyrównanie grubości warstwy izolującą warstwą amorficznego SiO_2 , nałożoną metodą próżniową zapewni ograniczenie dyfrakcji na strukturze elektrod.



Rys. 1. Schemat struktury podłoża z indywidualnie sterowanymi elektrodami (po lewo), rozkład direktora w strukturze ciekłokrystalicznej (po prawo).

Starty mocy BSD mogą być znacznie ograniczone poprzez ujednorodnienie struktury optycznej warstwy ciekłokrystalicznej (rozkładu orientacji direktora), redukcję rozmiaru pojedynczego pola sterowanego sygnałem elektrycznym przy jednoczesnym zwiększeniu ich ilości w aperturze wiązki. Szczególnie niekorzystnym czynnikiem strukturalnym proponowanego elementu do sterowania kierunkiem biegu wiązki lasera jest istnienie stref między pikselami, rozdzielającymi pola elektrod, gdzie lokalny kierunek i wartość wektora pola elektrycznego w strukturze ciekłokrystalicznej ulegają znacznym odstępstwom od wartości obserwowany w obszarze elektrod sterujących. Te deformacje generują znaczne defekty struktury ciekłokrystalicznej a co za tym idzie i powierzchni frontu falowego opuszczającego przetwornik.

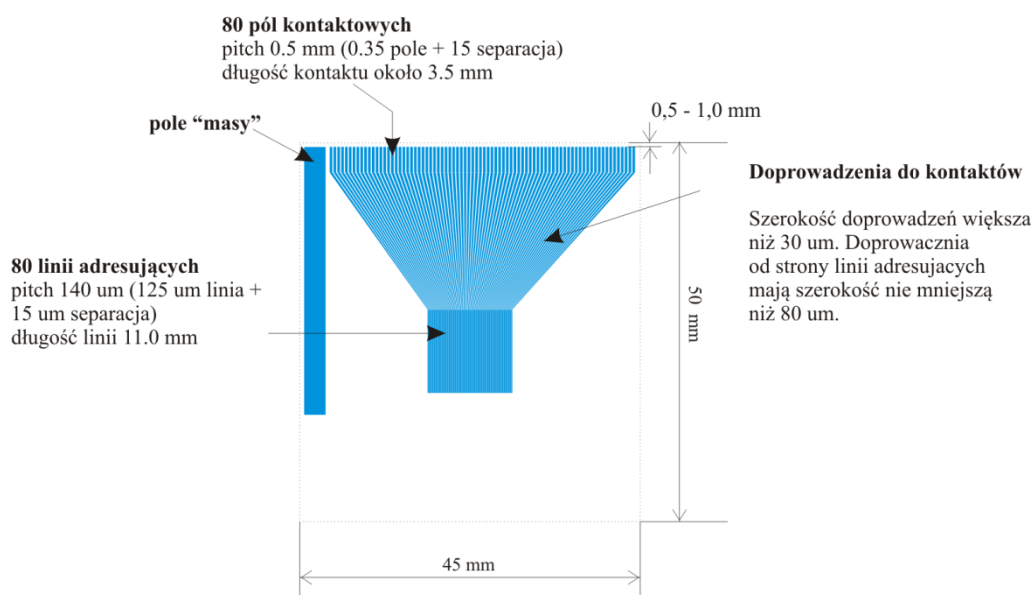
Dlatego dla potrzeb projektu przeprowadzono próbę wykonania przetwornika z dwuwarstwową strukturą elektrod. Przetwornik ten wykazywał jednak słabe efekty dyfrakcyjne.



Rys. 2. Struktura podłoża przetwornika wielowarstwowego, gdzie druga warstwa elektrod ITO przekrywa pola pomiędzy elektrodami pola warstwy pierwszej.

Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska były niedokładności technologiczne wykonania drugiej warstwy przetwornika wynikające z tego, że spasowanie położenia drugiej warstwy było ograniczone do 1 μm . Jest to ograniczenie precyzji pozycjonowania maski i podłoża w naświetlarce, jaką dysponuje laboratorium. Z powodu tych ograniczeń technologicznych i niezmiernie kosztownych komercyjnych technologii alternatywnych, zrezygnowano z wykonania tego typu elementu.

Docelowa konstrukcja przetwornika BSD zakładała wykonanie jednowarstwowych przetworników bazujących na podłożu ze szkła kwarcowego (typu JG3) o wysokiej jednorodności struktury, odprężonego, polerowanego do jakości optycznej ($\lambda/10$ @633 nm) z naniesioną warstwą przewodzącą ITO (o rezystancji specyficznej 500 Ohm/\square) lub PITO (o rezystancji specyficznej $> 500 \text{ Ohm}/\square$). Schemat podłoża służącego do wykonania przetwornika przedstawia Rys. 3.



Rys. 3. Schemat podłoża z elektrodami paskowymi o rozmiarach zewnętrznych 75x75 mm dla 80-cio elektrodowego przetwornika BSD o polu czynnym 11,2x11,2mm. Elektrody o szerokości 140 μm z przerwą 15 μm wykonano w technologii trawienia mokrego z wykorzystaniem maski chromowej (chrom na kwarcu).

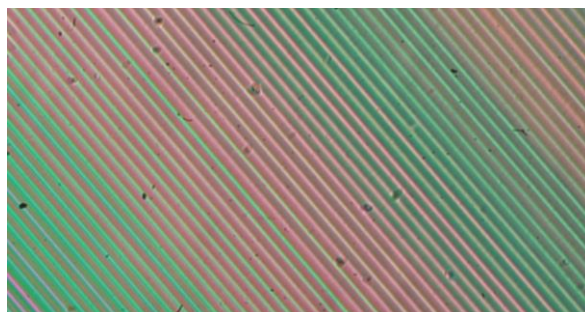
Przeciwna strona przetwornika została wykonana z takiego samego podłoża ze szkła optycznego, lecz z jednorodną elektrodą ITO, dostarczającą wspólnego potencjału odniesienia. Podłoża z

liniami adresującymi w strukturze ITO zostały wykonane w dwóch technologiach: fotolitografii wysokorozdzielczej oraz suchego trawienia wiązką laserową (robocza długość fali 405 nm, rozdzielczość 300 nm). W drugim przypadku, odległości międzyelektrodowe ograniczono do szerokości 2 μm , w celu zbadania wpływu jednorodności pola direktora w tym obszarze na straty dyfrakcyjne i inne parametry wiązki.

Tak spreparowane podłoża pokryto ok. 120 nm warstwą izolacyjną SiO_2 , nakładanego metodą próżniowego rozpylania elektronowego na gorące podłoże z dotlenianiem dla uzupełnienia stechiometrii składu osadzanego tlenku.

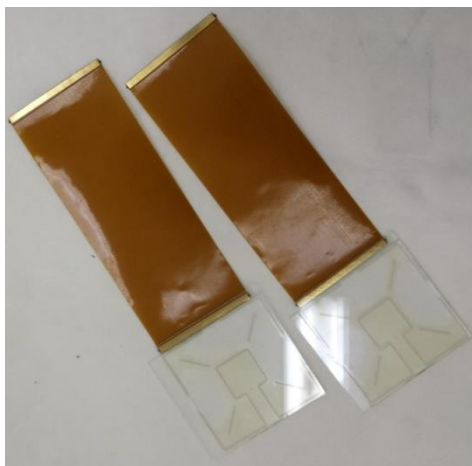
Przygotowane w ten sposób podłoża pokryto warstwą ok. 80 nm poliamidu SE-130 metodą nawieriania 0,4% roztworu prepolimeru w suchy DMF, który następnie poddano procedurze suszenia i procedurze utwardzania. Dla nadania cech anizotropowych porządkującej warstwy polimerowej, poddano ją procesowi rubbingowania z wykorzystaniem precyzyjnego instrumentu wyposażanego w wałek pokryty dedykowaną tkaniną technologiczną. Rubbingu dokonano w poprzek kierunku elektrod sterujących. Następnie na podłoża naniesiono (metodą sitodruku) przekładkę dystansującą - klejącą. Na podłoże ze wspólną elektrodą odniesienia nałożono metodą moką (poprzez rozpylanie z roztworu na bazie alkoholu etylowego w obecności silnego źródła podczerwieni) dystansowniki szklane w postaci wałków o średnicy 15 μm (alternatywnie 25 μm). W dalszej kolejności podłoże z elektrodami sterującymi i podłoże ze wspólną elektrodą złożono i umieszczono w ścisisku pneumatycznym. Po kontroli optyczną dokonano ścisiskania za pomocą bezgradientowego ścisisku pneumatycznego, warstwy dystansująco klejącej aż do całkowitego osadzenia podłoży na dystansownikach.

Finalne sprawdzenie i korekta płaskorównoległości powierzchni wewnętrznych odbyło przed utwardzeniem kleju poprzez obserwację interferencji w świetle monochromatycznym. Drobnych korekt grubości przetworników dokonano poprzez dodatkowy docisk punktowy. Klej utwardzano, gdy nie były widoczne żadne ślady grubościowych prążków interferencyjnych. Gotowe przetworniki napełniono materiałem ciekłokrystalicznym (wysoko dwójfomny materiał nematyczny 2091- $\Delta n=0,37$ i materiał nematyczny o niskiej lepkości 1823- $\Delta n=0,18$) metodą próżniową. Napełnione przetworniki poddano przegraniu do temperatury fazy izotropowej w celu usunięcia niejednorodności rozkładu direktora spowodowanego płynięciem materiału ciekłokrystalicznego podczas napełniania i schłodzono. Przetworniki zaklejono i zahermetyzowano dedykowanymi klejami polimerowymi. Konstrukcję wzmocniono klejem światłoutwardzalnym i niskiej lepkości, aplikowanym w szczelinę technologiczną w celu uniemożliwienia separacji podłoży związanych do tej pory jedynie przekładką dystansującą – klejącą.



Rys. 4. Widok fragmentu przetwornika BSD (materiał 2091, $d=15\mu\text{m}$) w polu sterującym z paskowymi elektrodami. Obserwacja dokonana w polichromatycznym świetle spolaryzowanym. Do elektrod przyłożono sinusoidalny profil napięcia.

Każda z 80 elektrod sterujących, za pośrednictwem elementu doprowadzającego jest podłączona do pola kontaktowego. Pole kontaktowe zostało skonfigurowane w sposób dopasowany do elastycznego okładu doprowadzającego, wykonanego na podłożu polimerowym (ang. *flexible printed circuit* - FPC), zawierającego 80, niskooporowych linii przewodzących. Montaż FPC do pola kontaktowego podłoża BSD odbywał się za pośrednictwem zgrzewanej na gorąco taśmy polimerowej ze zdyspergowanymi mikro- i nanodrobinami srebra.



Rys. 5. Egzemplarze BSD przeznaczone do sterowania wiązką o długości fali 633 nm w płaszczyźnie poziomej (po lewo) i w płaszczyźnie pionowej (po prawo).

Przetwornik BSD z zainstalowanym doprowadzeniem zaprezentowano na Rys. 5. Ponieważ technologia montażu za pomocą taśmy z nanosrebrem nie zapewnia zwykłej jednorodności rezystancji każdego z kontaktów, dokonano inspekcji rezystancji każdej z elektrod sterujących na zakończeniu FPC. Dla zapewnienia doprowadzenia właściwej efektywnej różnicy potencjałów, dokonano korekty montażu taśm za pomocą nagrzewnicy ultradźwiękowej dla każdej z elektrod sterujących.

Przetworniki BSD z doprowadzeniami FPC zamontowano w uchwycie zaprojektowanego i wykonanego specjalnie do tego celu układu sterującego (ozn. US160M1) zapewniającego niezależne sterowanie 2 przetworników BSD z 80-ciomą polami adresowanymi, każdy. Widok płyty 160 kanałowego sterownika US160M1 z zamontowanym elementem BSD do sterowania kierunkiem wiązki z płaszczyźnie poziomej przedstawia Rys. 6.

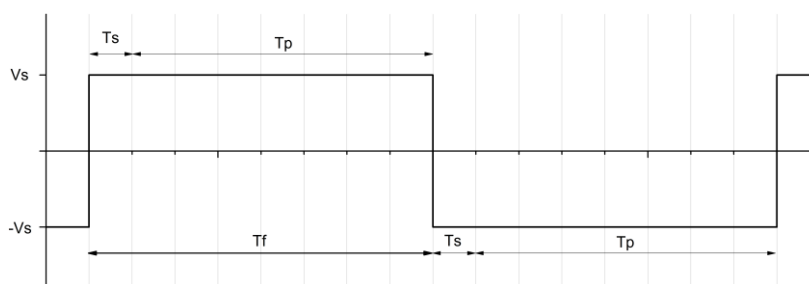
Tabela 1. Parametry sterownika elementów BSD.

Ilość kanałów	160 (2 x 80)
Amplituda max. napięcie sterowania [V] sygnałem prostokątnym	± 15 V
Rozdzielczość sterowania napięcia	<1 mV
Metoda sterowania	Usunięcie składowej stałej poprzez okresową inwersję napięcia na elektrodzie, multiplikacja w 8-kanałowych grupach, wstępne obciążenie pojemnościowe podtrzymujące napięcie między cyklami sterowania

Częstotliwość przełączania	0-400 Hz
Wydajność prądowa	$\geq 25\text{mA}$ na każdą z elektrod (w stanie sterowania)
Konfiguracja	Poprzez dołączony program komputerowy, indywidualnie dla każdej elektrody.
Interfejs komunikacyjny	USB (virtual COM)
Napięcie zasilania	24V DC

Zadaniem sterownika jest wytworzenie przebiegów napięciowych na wielu elektrodach komórki ciekłokrystalicznej, z niskimi zniekształceniami, wysoką rozdzielczością i możliwością indywidualnego wysterowania każdego ze 160 kanałów. Sterownik oparty jest o układ FPGA XC3S400A-4FGG400C, których zadaniem jest wytworzenie napięcia sterującego z przedziału 0-3.3V, kontrolowanie multiplekserów oraz komunikacja z komputerem. Napięcie $\pm 15\text{V}$ wytwarzane jest lokalnie przez podwójną przetwornicę LT8471HFE. Zasila ono wzmacniacze operacyjne ADA4177, które zwiększają napięcie sterowania z zakresu 0-3.3V do max $\pm 15\text{V}$. Użyte wzmacniacze charakteryzują się niskim napięciem offsetu, małym prądem polaryzacji oraz bardzo dobrymi współczynnikami tłumienia składowej stałej (CMRR 130dB) i wpływu napięcia zasilania (PSRR 145dB). Parametry te w połączeniu z zastosowaniem precyzyjnych elementów elektronicznych umożliwiają uzyskanie bardzo czystych sygnałów sterowania. Sygnały napięciowe generowane są z użyciem modulacji PWM, której częstotliwość to $\sim 98\text{kHz}$. Uzyskanie napięć o odpowiednich parametrach możliwe jest dzięki połączeniu wielorzędowych filtrów pasywnych i aktywnych dających ponad 90 dB tłumienia pierwszej harmonicznej. Opisany układ pozwala na uzyskanie napięć o zniekształceniach rzędu pojedynczych miliwoltów i jednocześnie dobrej dynamiki. Rozdzielczość napięcia możliwego do wysterowania każdej linii wynosi nie mniej niż 10mV. Komunikacja ze sterownikiem odbywa się za pomocą układu FT232RL, który tłumaczy protokół USART (używany w sterowniku) na USB.

Napięcie na każdej z elektrod ma przebieg zapewniający eliminację składowej stałej. Przykładowy przebieg napięcia na elektrodzie przedstawiony jest na poniższym rysunku.



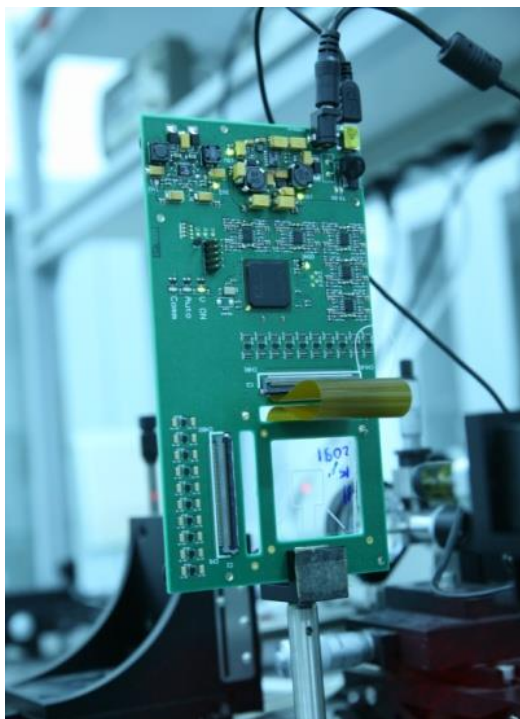
Rys. 6. Przebieg napięcia sterującego na elektrodzie adresującej pojedyncze pole przetwornika BSD. T_s - okres sterowania, T_p - okres podtrzymania, V_s - amplituda napięcia sterującego.

W czasie okresu sterowania (T_s) na elektrodę podawane jest odpowiednie napięcie i jednocześnie ładowany jest kondensator podtrzymujący. Ponieważ komórka ciekłokrystaliczna ma bardzo dużą rezystancję, która nie spowoduje znacznego zmniejszenia napięcia na kondensatorze podtrzymującym uzyskuje się dużą stabilność tego napięcia w trakcie adresowania. W każdym kolejnym cyklu adresowania zmieniana jest polaryzacja napięcia.

3. Badania BSD i wstępne parametry.

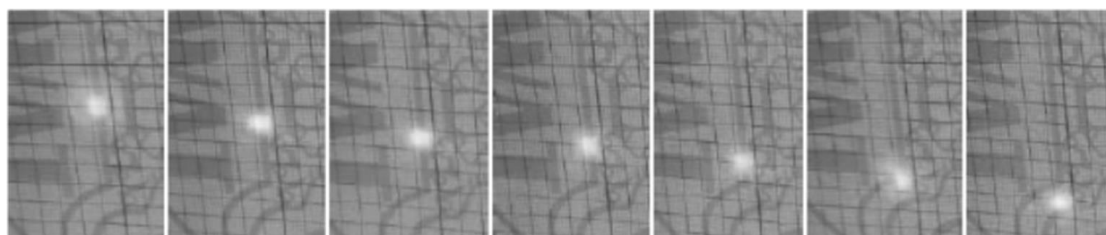
Badania elementów BSD przeprowadzono po zamontowaniu ich w specjalnym uchwycie płyty głównej sterownika US160M1. Na Rys. 7 przedstawiono widok płyty 160 kanałowego sterownika z zamontowanym elementem BSD do sterowania kierunkiem wiązki z płaszczyźnie poziomej.

W trakcie badań BSD wykorzystano wiązkę lasera HeNe padającą, po przejściu przez polaryzator, normalnie na powierzchnię przetwornika. Promień pomiarowy formowano z wykorzystaniem zespołu formującego składającego się z obiektywu mikroskopowego z układem wejściowym, pinhole'a o średnicy $2r=15\ \mu\text{m}$ oraz soczewki z zespołem kolimatorów. Finalna wiązka padającą na BSD i podlegającą kierowaniu miała aperturę 8 mm. Spójność promieniowania padającego na przetwornik i przechodzącego badano w układzie interferencyjnym. Badanie właściwości funkcjonalnych BSD prowadzono z wykorzystaniem przetworników o grubości $15\ \mu\text{m}$ i osia optyczną struktury ciekłokrystalicznej zorientowaną poprzecznie do kierunku elektrod pól sterujących. Plamkę lokalizowano w dowolnym obszarze pola sterującego.

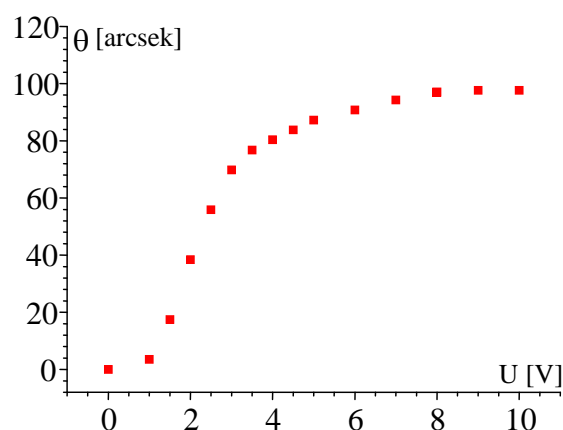


Rys. 7. Widok płyty 160 kanałowego sterownika US160M1 z zamontowanym elementem BSD (materiał 1823, $d=15\ \mu\text{m}$) do sterowania kierunkiem wiązki z płaszczyźnie poziomej.

Obserwacje położenia plamki spolaryzowanej wzdłuż kierunku rubbiungu podczas badania zdolności wykonanego BSD do kierowania promieniem laserowym przedstawia Rys. 8. Podczas adresowania BSD liniowym profilem napięcia obserwowano dyfrakcję promieniowania. Widoczne były prążki 1 rzędu i b. słabe prążki wyższych rzędów. Badanie mocy promieniowania plamki zerowej wykazało, że rejestrowane jest w tym obszarze ok. 50% do 52% (w zależności od amplitudy napięcia sterującego) mocy promieniowania wiązki padającej. Moc rejestrowana w 1 rzędzie dyfrakcji to c.a. $2 \times 16\ \%$. Reszta mocy wiązki była wstecznie odbita (c.a. 6%), pochłonięta i rozproszona.

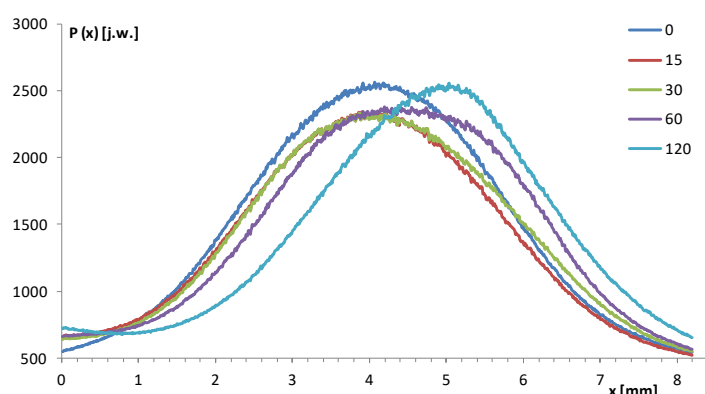


Rys. 8. Zależność położenia wiązki lasera ekranie pomiarowym od amplitudy napięcia dla BSD o grubości $25\ \mu\text{m}$ z materiałem wysokodwójtymnym 2091. Maksymalne wychylenie plamki z położenia „zerowego” odpowiada odchyleniu 178 arcsec w jedną stronę.

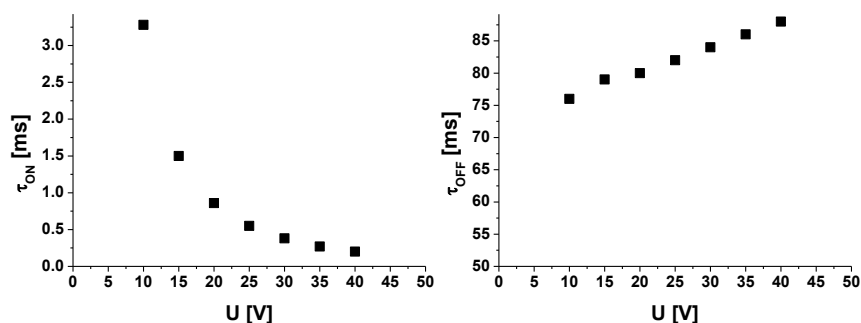


Rys. 9. Zależność kąta θ odchylenia wiązki lasera w funkcji przyłożonej amplitudy napięcia sterującego dla przetwornika BSD z materiałem 2091 ($d=15\ \mu\text{m}$). Zastosowano sygnał z liniową modulacją napięcia U w profilu przetwornika.

Włączenie napięcia pól sterujących wywoływało ruch plamki zerowej i plamek 1 rzędu na ekranie. W zależności od maksymalnej wartości napięcia (rozumianej jako wartość napięcia na ostatniej elektrodzie) obserwowano zmienne położenie plamki lasera (Rys. 8 i Rys. 9) na ekranie oddalonym o 29,6 m. Dla przetwornika BSD z materiałem 2091 o grubości warstwy ciekłokrystalicznej $25\ \mu\text{m}$ uzyskano odchylenie promienia o 178 arcsec w jedną stronę. Odwrócenia profilu rozkładu napięć na strukturze elektrod powodowało analogiczne odchylenie promienia w przeciwną stronę. Osiągnięty maksymalny zakres kątowy kierowania wiązki to 350 arcsec. Nie obserwowano znacznych zmian rozkładu gęstości mocy wiązki (Rys. 10) dla sterowania w dolnym zakresie kątów.



Rys. 10. Rozkład mocy P w przekroju wiązki dla różnych wartości kąt odchylenia (od 0 do 120 arcsec) kierunku biegu promienia laserowego. Odchylenia dokonano przy zastosowaniu liniowego rozkładu napięcia w przekroju przetwornika BSD o grubości $15\ \mu\text{m}$ z materiałem ciekłokrystalicznym 2091 o wysokiej dwójtymności.

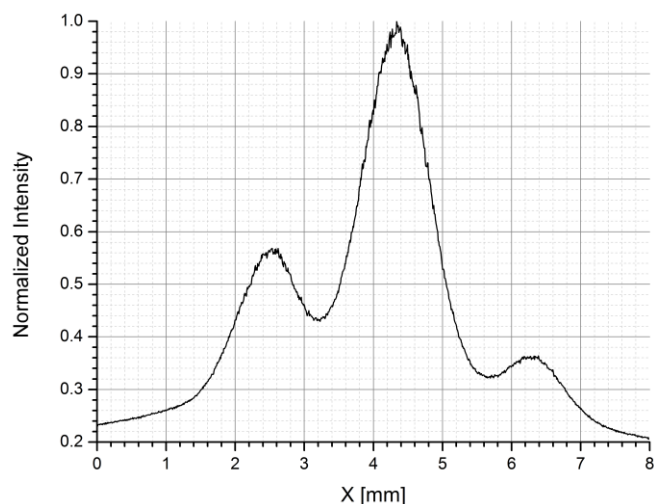


Rys. 11. Czasy włączenia τ_{ON} (wysterowania) i wyłączenia (powrotu) τ_{OFF} maksymalnego przesunięcia materiału 2091 wykorzystanego do wypełnienia przetwornika BSD.

Badania wpływu rozkładu napięć przyłożonych do każdej z 80 elektrod przetwornika BSD na takie parametry jak kąt odchylenia położenia środka rozkładu gęstości mocy w wiązce laserowej, szerokość połówkowa wykazały, że istnieje możliwość sterowania tymi parametrami poprzez manewrowanie rozkładem napięć na elektrodach sterujących. Opracowano profil napięcia dany wielomianem 4 rzędu, który generuje minimalne starty dyfrakcyjne i jednocześnie minimalne deformacje rozkładu gęstości mocy w wiązce odchylanej (prążek zerowy). Na obecnym etapie badań uznano, że uzyskany rozkład napięć generuje niemal linowy gradient efektywnego współczynnika załamania w strukturze BSD.

Nałożenie na taki rozkład napięcia dodatkowego napięcia o profilu paraboli z minimum znajdującym się w środku przetwornika spowodowało efekt zmiany rozbieżności wiązki (soczewkowanie). Możliwe było zarówno skupienie wiązki jak i jej rozproszenie. Obecnie trwają dalsze prace nad opracowaniem właściwych profili sterujących rozkładem napięcia i algorytmów korekcji frontu falowego wiązki odchylanej oraz modułów programowych sterownika dla umożliwienia modyfikacji kształtu frontu falowego fali przechodzącej. Badania wykazały, że fala przechodząca, sterowana przetwornikiem BSD interferuje z falą pierwotną dla niemal całego zakresu kątów odchylenia tej wiązki (Rys. 12), co wskazuje, że wykonany element BSD nie degraduje spójności wiązki promieniowania spolaryzowanego liniowo. Jednocześnie wykazano, że promień spolaryzowany w kierunku poprzecznym do kierunku rubbingu nie jest modulowany w stopniu mierzalnym.

Stwierdzono, że możliwym jest manewrowanie pojedynczym elementem BSD kierunkiem promienia laserowego (linowo spolaryzowanego) w jednej płaszczyźnie. Kaskada 2 takich przetworników umożliwia sterowanie kierunkiem przemiana w stożku o kącie rozwarcie do ok. 350 arcsec. Czasy wysterowania położenia plamki są w przypadku przetwornika BSD z materiałem 2091 o grubości 15 μm , rzędu pojedynczych milisekund (patrz Rys. 11) co daje możliwość szybkiego, niemechanicznego sterowania parametrami wiązki przechodzącej.



Rys. 12. Obraz interferencyjny fali pierwotnej i odchylonej.

Wstępne badania w firmie Lasertex potwierdziły, że opracowany element działa w układzie interferometru laserowego, nie wpływając na parametry pomiarów odległości, co wskazuje na jego znaczący potencjał aplikacyjny urządzenia BSD. Pierwszym z zastosowań tego urządzenia, umożliwiającemu stosunkowo szybkie manewrowaniem kierunkiem propagacji fali pomiarowej, może być właśnie go układu pomiarowego pracującego w warunkach niewielkich wibracji jako elementu korygującego kierunek wiązki.

Dotychczasowe wyniki badań wskazujące na potencjał wykonanego elementu BSD prezentuje metryka wykonanego elementu zamieszczona w załączeniu.

Tabela 2. BSD metryka

PARAMETR	WARTOŚĆ, JEDNOSTKA
Wymiary zewnętrzne bez płyty sterującej	49 mm x 49 mm x 1,5 mm
Pole czynne	11,2 mm x 11,2 mm
Temperatura pracy	od 8°C to 60°C
Temperatura przechowywania	Od -10°C do 80°C
Długość fali pracy przetwornika λ	0,6328 μm
Efekt elektrooptyczny	ECB
Mieszanina ciekłokrystaliczna	W2091 (wg. oznaczeń WAT)
Transmisja T dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^{\circ}\text{C}$ w stanie niesterowanym	Nie mniej niż 87%
Moc promienia sterowanego	Nie mniejsza niż 50% mocy wejściowej
Maksymalny kąt odchylenia promienia $\Delta\alpha$	± 100 ercsec
Czas wysterowania kąta odchylenia dla $\lambda=0,6328 \mu\text{m}$ i $T= 25^{\circ}\text{C}$	5 ms
Czas powrotu do położenia zerowego	90 ms
Płaskość frontu falowego w aperturze do 5 mm	Nie gorsza niż $\lambda/4$ @ 0,6328 μm

