

DYFRAKCYJNE ELEMENTY OPTYCZNE DO FORMOWANIA WIĄZEK ŚWIATŁA EMITOWANYCH PRZEZ DIODY LASEROWE

Andrzej Kowalik¹, Krzysztof Góra¹, Jarosław Podgórski¹, Anna Rojek¹,
Paweł Typa¹

Dzięki miniaturowym rozmiarom i niskiej cenie laserowe diody krawędziowe znajdują coraz szersze zastosowanie jako niezawodne źródła wiązki światła. Duża rozbieżność i asymetria tych wiązek powoduje jednak, że w przypadku większości aplikacji muszą być one wcześniej transformowane. Ze względu na skomplikowany front falowy stosowane w tym celu tradycyjne układy optyczne składają się z wielu elementów, co powoduje znaczny wzrost rozmiarów, ciężaru i ceny systemu. Tracone są w ten sposób podstawowe zalety związane z zastosowaniem półprzewodnikowych źródeł światła. Stąd za bardzo istotne uznać należy poszukiwanie rozwiązań, w których wszystkie funkcje związane z transformacją wiązki światła spełniać będzie pojedynczy element optyczny. W pracy wskazano na możliwość użycia w tym celu dyfrakcyjnych elementów optycznych o prostej, miniaturowej budowie. Jako przykład zaprezentowano element służący do formowania wiązki emitowanej przez jednowymiarową macierz diod laserowych. Główne zalety tego elementu to możliwość koncentracji dużej energii w małym przekroju wiązki oraz zwarta budowa, pozwalająca na zachowanie miniaturowych wymiarów źródła wiązki światła.

Słowa kluczowe: dyfrakcyjny element optyczny, laserowa dioda krawędziowa

1. WSTĘP

Istotną i stałą cechą rozwoju techniki w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat jest postępująca miniaturyzacja. W coraz większej liczbie aplikacji najbardziej pożąda-

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa,
e-mail: akowalik@itme.edu.pl

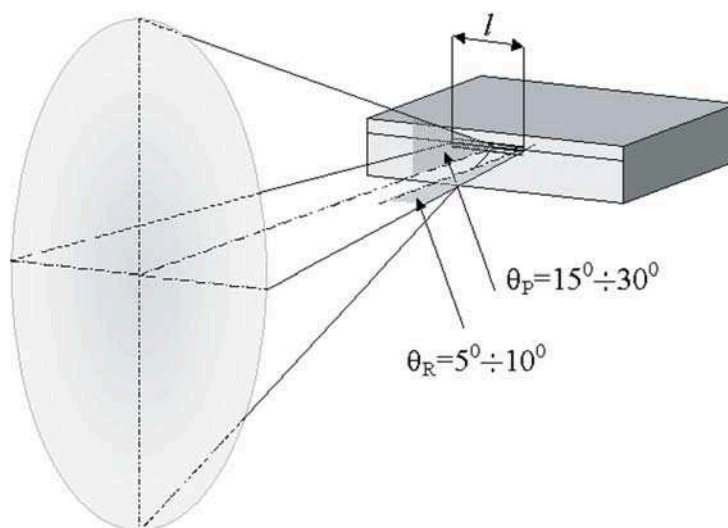
nymi cechami urządzeń są ich miniaturowe wymiary pozwalające na konstruowanie lekkich i zwartych systemów spełniających coraz więcej funkcji, a jednocześnie materiało- i energooszczędnych. Rozwój w dziedzinie półprzewodnikowych źródeł światła sprawił, że trend ten w coraz większym stopniu obejmuje również urządzenia optyczne i optoelektroniczne sprawiając, że fotonika i mikrooptyka stały się w ostatnich latach jednymi z najszybciej rozwijających się dziedzin mikrotechnologii. Diody świecące (LED) i laserowe diody krawędziowe (LD) dzięki miniaturowym rozmiarom i niskiej cenie znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie jako niezawodne źródła światła zarówno w produktach powszechnego użytku, jak i w rozwiązaniach z obszaru zaawansowanych technologii. Efektywna metoda formowania wiązek emitowanych przez laserowe diody krawędziowe pozostaje jednak nadal problemem otwartym. Generowany przez nie astygmatyczny front falowy wymaga w przypadku tradycyjnej optyki refrakcyjnej zastosowania układu składającego się z wielu elementów [1]. W najprostszymi rozwiązaniach wykorzystywane są soczewki sferyczne, nie pozwala to jednak na nadanie wiązce symetrycznego przekroju i często związane jest ze znacznymi stratami energii wynikającymi z braku dopasowania wiązki o dużej asymetrii do układów o symetrii kołowej. Znacznie lepsze rezultaty osiągane są przez zastosowanie układów, w których skład wchodzi soczewki cylindryczne [2-3] lub pryzmaty anamorfczne [4-5]. Duże znaczenie praktyczne ma pierwsze z tych rozwiązań, stosowane przez wytwórców modułów laserowych, zwłaszcza w przypadku macierzy diod [6]. Zasadniczą wadą takich rozwiązań jest jednak znaczny wzrost rozmiarów, ciężaru i ceny systemu. Tracone są w ten sposób podstawowe zalety półprzewodnikowych źródeł światła, tj. wymieniane wcześniej miniaturowe wymiary i niska cena, a nawet niezawodność, ponieważ złożony układ optyczny będzie na ogół wymagał okresowego justowania, zwłaszcza w przypadku trudnych warunków pracy (np. zmiany temperatury, wstrząsy mechaniczne). Stąd za bardzo istotne uznać należy poszukiwanie rozwiązań, w których wszystkie funkcje związane z transformacją wiązki światła spełniać będzie pojedynczy element optyczny, w dodatku prosty, miniaturowy i tańszy niż dioda.

Wymagania te najlepiej zdają się spełniać dyfrakcyjne elementy optyczne (DOE). Przewaga DOE nad elementami konwencjonalnymi (refrakcyjnymi lub odbiciowymi) wynika przede wszystkim ze względnej łatwości, z jaką w ich przypadku można wytworzyć funkcję fazową realizującą pożądane przekształcenie frontu falowego. Daje to o wiele bardziej realną szansę wytwarzania struktur właściwie transformujących światło diod laserowych niż w przypadku rozwiązań wskazujących na możliwość zastosowaniu pojedynczych elementów refrakcyjnych [7-8], ale których powierzchnie są tak złożone, że ich wykonanie przy obecnym stanie technologii byłoby – jeżeli w ogóle możliwe – to z pewnością wyjątkowo trudne. Istotna jest także planarna budowa DOE, pozwalająca na wytwarzanie lekkich i zwartych elementów spełniających wymogi związane z integracją struktur optycznych z elementami elektronicznymi i mikromechanicznymi. Co więcej, dzięki takiej budowie

elementy dyfrakcyjne mogą być także dość łatwo replikowane, co zapewnić może ich tanią masową produkcję.

2. MODELE DYFRAKCYJNYCH KOLIMATORÓW WIĄZKI LASEROWEJ

Model emisji światła przyjmowany powszechnie dla laserowej diody krawędziowej zakłada generację wiązki astygmatycznej (źródło w postaci szczeliny o długości l) o różnych kątach rozbieżności w osi prostopadłej ($2\theta_p$) i równoległej ($2\theta_r$) do złącza (Rys. 1) [9-12]. Kąt θ_p jest zazwyczaj kilkakrotnie większy od kąta θ_r , typowe wartości to odpowiednio: $\theta_p = 15^\circ, 30^\circ$ i $\theta_r = 5^\circ, 10^\circ$. Rozbieżna wiązka emitowana przez diodę będzie więc miała wydłużony eliptyczny przekrój, przy czym różnica długości osi elipsy będzie szybko rosła wraz z odległością od diody.

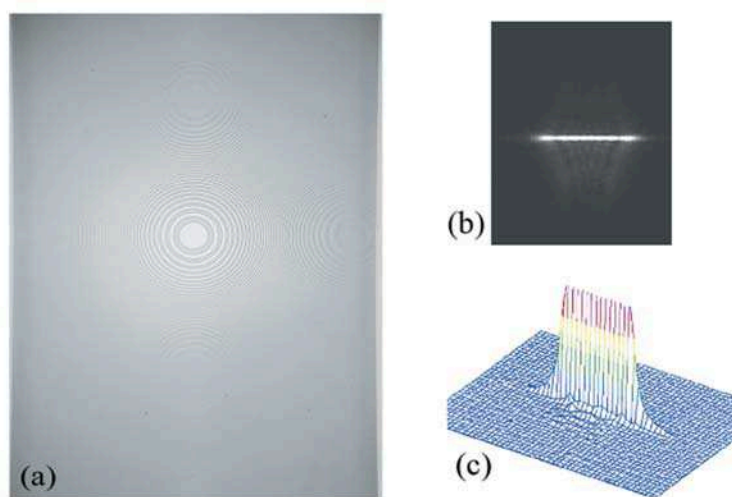


Rys. 1. Model wiązki światła emitowanej przez diodę laserową.

Fig. 1. Model of a light beam emitted by a laser diode.

Korekcja astygmatyzmu frontu falowego możliwa jest przez zastosowanie soczewki eliptycznej [13-14]. O ile wykonanie takiego elementu w wersji refrakcyjnej jest trudne i w praktyce jest on zastępowany układem obejmującym soczewkę cylindryczną i sferyczną, to dzięki zastosowaniu planarnych metod litograficznych wytwarzanie soczewek eliptycznych w wersji dyfrakcyjnej stało się niewiele trudniejsze od wytwarzania najprostszych elementów dyfrakcyjnych, to jest siatek dyfrakcyjnych.

Działanie eliptycznych soczewek dyfrakcyjnych sprawdzono eksperymentalnie wykonując fazowe płytki strefowe skupiające wiązkę równoległą w odcinek ogniskowy o zadanej długości l . Soczewki z binarnym profilem fazowym, dla których przyjęto $l = 0.1$ mm oraz apertury kątove $\theta_p = 15^\circ$ i $\theta_r = 5^\circ$, wykonano w procesach elektronolitografii w warstwie elektronorezystu PMMA naniesionej na szklane podłoża. Obserwacje rozkładu natężenia wiązki w płaszczyźnie ogniskowej potwierdziły poprawne działanie elementu: fala płaska uginana jest przez płytkę w założony odcinek ogniskowy (Rys. 2). Taka soczewka - przyjmując odwrotny bieg promieni - powinna więc zapewnić przekształcenie wiązki emitowanej przez diodę laserową



Rys. 2. Binarna eliptyczna płytka strefowa: a) centralny fragment soczewki wykonanej w warstwie elektronorezystu PMMA, b) obraz ogniska zarejestrowany kamerą CCD, c) trójwymiarowa mapa rozkładu natężenia światła w płaszczyźnie ogniskowej.

Fig. 2. Binary elliptical zone plate: a) central fragment of the lens fabricated in the PMMA e-beam resist, b) CCD image of the focal segment created by the lens, c) 3D map of the light intensity distribution in the focal plane.

w wiązkę równoległą. W przypadku ogólnym skolimowana wiązka miałaby jednak nadal przekrój eliptyczny. Jedynie umieszczenie elementu w płaszczyźnie, w której wiązka ma ten sam wymiar w obu prostopadłych kierunkach, to jest w odległości z_l od źródła określonej w przybliżeniu zależnością:

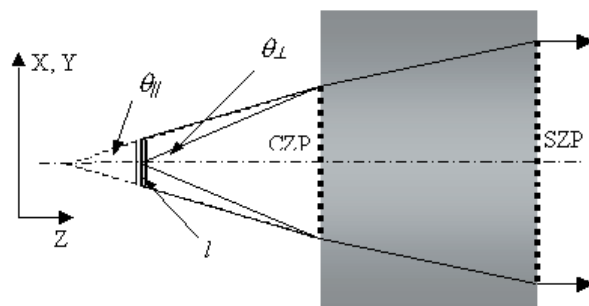
$$z_l = 0.5l[\text{tg}(\theta_p) - \text{tg}(\theta_r)]$$

co zapewniałoby wiązce wyjściowej symetryczny, kołowy przekrój. Takie rozwiązanie oferowałoby bardzo korzystną, niewiele większą od l średnicę wiązki a :

$$a = z_l \text{tg}(\theta_p) = l \text{tg}(\theta_p) / [\text{tg}(\theta_p) - \text{tg}(\theta_r)]$$

ale dla poprawnego działania wymagałoby submikronowej precyzji umieszczenia elementu optycznego względem krawędzi emitującej. Wydaje się to pociągać za sobą konieczność scalenia struktury optycznej z diodą laserową, co gorsza poprzez wykonanie soczewki na przełomie płytki podłożowej.

W celu uzyskania symetrycznego przekroju wiązki zaproponować można także inne rozwiązanie, znacznie bliższe możliwościom technologicznym, polegające na zastosowaniu elementu dyfrakcyjnego o funkcji optycznej rozdzielonej pomiędzy dwa uzupełniające się profile dyfrakcyjne, wykonane na przeciwległych powierzchniach płaskorównoległego podłoża. Zadanie pierwszego profilu polega na takim ugięciu wiązki, by ta docierając do drugiej powierzchni miała ten sam przekrój w obu osiach (np. poprzez zmniejszenie rozbieżności wiązki w płaszczyźnie prostopadłej i zwiększenie w płaszczyźnie równoległej do złącza), a zadanie profilu drugiego - na wytworzeniu płaskiego frontu falowego. Ideę takiej integracji dwóch uzupełniających się profili autorzy przedstawili w pracy [15] rozważając strukturę, której pierwsza powierzchnia dyfrakcyjna wykonana jako cylindryczna płytka fazowa (CZP) doprowadza do częściowej kolimacji wiązki w kierunku prostopadłym do złącza, a druga dokonuje ostatecznej kolimacji w obu osiach za pomocą elementu sferycznego (SZP) (Rys. 3).



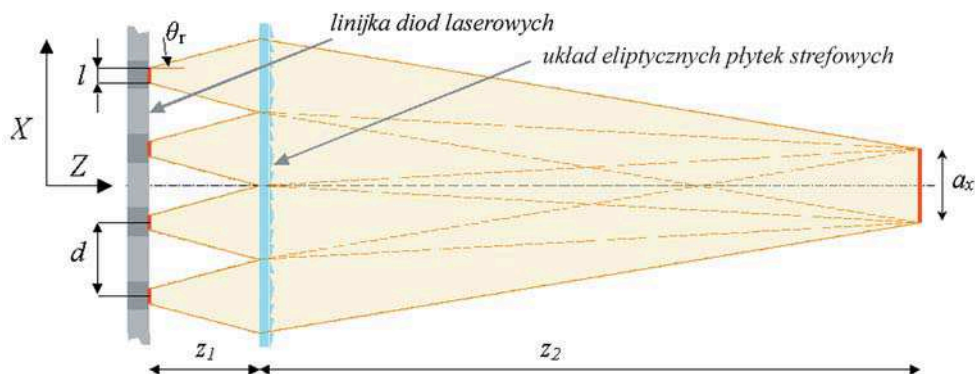
Rys. 3. Kolimacja wiązki diody laserowej za pomocą elementu o dwóch powierzchniach fazowych: CZP - cylindryczna płytka strefowa, SZP – sferyczna płytka strefowa.

Fig. 3. Double-sided diffractive element for collimation of a laser diode beam: CZP - cylindrical zone plate, SZP - spherical zone plate.

Działanie elementów o dwóch powierzchniach z profilami fazowymi (2SDOE) sprawdzone zostało doświadczalnie dla struktury dyfrakcyjnej obejmującej kinoformy odpowiadające soczewkom sferycznym [16]. Stwierdzono korzystne właściwości ogniskujące takich elementów: ogniska miały dwukrotnie mniejszą średnicę i w kon-

sekwencji ponad 3.5-krotnie większe maksymalne natężenie światła w płaszczyźnie ogniskowej niż w przypadku analogicznych struktur z tym samym wymiarem krytycznym i jedną powierzchnią dyfrakcyjną. Ponieważ rozdzielenie funkcji optycznej pozwala nawet dwukrotnie zmniejszyć częstotliwość przestrzenną każdego z profili, zastosowanie podobnych elementów do kolimacji wiązek emitowanych przez lasery krawędziowe zapewnić powinno nie tylko uzyskanie wiązki o pożądanym symetrycznym przekroju, ale również możliwość wykonywania elementów o większych aperturach numerycznych, co jest szczególnie istotne ze względu na duże rozbieżności wiązki w płaszczyźnie prostopadłej do złącza. Wytworzenie struktur 2SDOE wymaga jednak użycia dwukrotnie większej liczby procesów technologicznych oraz dwustronnego centrowania wzorów.

Przedstawiony powyżej model emisji światła, właściwy dla wiązek emitowanych przez diody laserowe o małej mocy, dla których długość emitera l nie przekracza zazwyczaj kilku mikrometrów, nie może być przyjmowany jako całkowicie poprawny dla diod dużej mocy. Wysoka moc takich diod osiągana jest m.in. poprzez znaczne zwiększenie poprzecznego wymiaru warstwy aktywnej (zazwyczaj $l > 50 \mu\text{m}$), co powoduje, że na krawędzi emitującej pojawia się kilka źródeł promieniowania i to zmieniających swoje położenie oraz intensywność w zależności od warunków pracy diody. Pełna kolimacja takiej wiązki możliwa jest tylko w osi prostopadłej do złącza. W płaszczyźnie równoległej transformowana wiązka po przejściu przez układ optyczny zawsze będzie miała pewną rozbieżność δ , wynikającą z odległości skrajnych źródeł na krawędzi emitującej oraz ogniskowej układu f w tej płaszczyźnie: $\delta \approx l/f$. W przypadku diod dużej mocy wymagana jest jednak na ogół nie tyle dokładna kolimacja, ile uzyskanie w zadanej odległości od źródła wiązki o jak największym natężeniu, to jest maksymalnie zogniskowanej. Zazwyczaj również dla osiągnięcia wysokiej mocy stosowane są nie pojedyncze diody, lecz ich macierze obejmujące od kilku do kilkudziesięciu diod (najczęściej w postaci tzw. linijek laserowych). Najważniejszą funkcją elementu optycznego staje się wtedy skierowanie wiązek emitowanych przez poszczególne diody do tego samego ogniska. Proponowane przez nas rozwiązanie spełniające powyższe wymagania opiera się na wykorzystaniu macierzy dyfrakcyjnych soczewek eliptycznych wykonanych na wspólnym podłożu jako przylegające do siebie fazowe płytki strefowe o prostokątnych aperturach. Zasada działania takiego koncentratora przedstawiona jest na Rys. 4.



Rys. 4. Schemat formowania wiązki emitowanej przez jednowymiarową matrycę diod laserowych za pomocą układu soczewek dyfrakcyjnych.

Fig. 4. The basic scheme of the diffractive concentrator for laser diode beams shaping.

Każdej diodzie odpowiada soczewka eliptyczna o osi optycznej przesuniętej w stosunku do emitera tak, by kierować wiązkę do tego samego punktu leżącego na osi układu w zadanej odległości z_2 . Jednocześnie każda z soczewek formuje w tej odległości wiązkę o takim samym przekroju. Niezależnie od liczby emitatorów przekrój wiązki uzyskiwany dla całego układu jest więc identyczny z przekrojem wiązki uzyskiwanym dla pojedynczej diody. Odległość z_1 oraz wymiary apertur soczewek w_x, w_y podyktowane są odległością d pomiędzy diodami (modułem macierzy diod) oraz rozbieżnością wiązki w obu osiach i wynoszą:

$$z_1 = d/\text{tg}(\theta_r), \quad w_x = d, \quad w_y = 2z_1 \text{tg}(\theta_r).$$

Minimalny przekrój wiązki a_y w płaszczyźnie prostopadłej do emitatorów wynika jedynie z ograniczeń dyfrakcyjnych:

$$a_y = 2\lambda/\sin(\theta_p),$$

a w płaszczyźnie równoległej ze względu na nieuniknioną rozbieżność wynosi:

$$a_x = 2z_2 \text{tg}(\theta_r)/(d-l).$$

Oczywiście dobierając odpowiednio ogniskowe w obu płaszczyznach można nadać wiązce kształt symetryczny (kwadrat o boku równym lub większym od a_x).

3. TECHNOLOGIA WYTWARZANIA FAZOWYCH ELEMENTÓW DYFRAKCYJNYCH

3.1. Ograniczenia technologiczne i dyfrakcyjne

Kluczowe znaczenie dla zastosowania DOE do kształtowania wiązek światła emitowanych przez diody laserowe ma możliwość uzyskania elementów o wysokiej wydajności dyfrakcyjnej i dużych aperturach numerycznych NA , pozwalających efektywnie kolimować wiązki o dużej rozbieżności. Z technologicznego punktu widzenia oznacza to konieczność wytwarzania struktur o submikronowych, gęsto upakowanych elementach i wielopoziomowym profilu fazowym, którego wymiary muszą być kontrolowane z dokładnością nawet kilku nanometrów. Wynika to z podstawowych zależności wiążących wydajność dyfrakcyjną η oraz wysokość h i minimalny wymiar porzeczný stopni fazowych w_{min} z liczbą poziomów fazowych L i aperturą numeryczną NA elementu:

$$\eta = \left(\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L} \right)^2 \quad h = \frac{\lambda}{L \cdot \Delta n} \quad w_{min} = (1/L) \frac{\lambda}{NA}$$

gdzie: λ - długość fali światła, Δn - różnica współczynników załamania materiału elementu i otaczającego go ośrodka, $L \geq 2$.

Wyższą wydajność uzyska się przyjmując większą liczbę poziomów fazowych – dla $L = 32$ będzie ona równa niemal 100% ($\eta_{32L} = 99.7\%$). Jednocześnie jednak nawet dla laserów o małych kątach rozbieżności wiązki oraz emitujących fale z zakresu podczerwieni (przyjmując np. $2\theta_p = 40^\circ$ i $\lambda = 808$ nm) wysokość stopni fazowych takiej struktury wykonywanej na podłożu kwarcowym ($n = 1.54$) musiałaby wynosić poniżej 50 nm, a ich minimalna szerokość 75 nm. Mając na względzie tak wysokie wymagania wymiarowe warto zwrócić uwagę na efektywność zwiększania liczby poziomów fazowych. Przechodząc od 2 do 4 i od 4 do 8 poziomów osiągamy znaczny wzrost wydajności – najpierw dwukrotny, a następnie o prawie 20%. Dalsze podwajanie liczby poziomów może już tylko w niewielkim stopniu zwiększyć sprawność elementu o $\sim 4\%$ przy przejściu od 8 do 16 i o 1% przy przejściu od 16 do 32 poziomów. Jednocześnie każdemu podwojeniu liczby poziomów towarzyszy dwukrotne zwiększenie wymagań wymiarowych, nawet jeśli możliwych do spełnienia, to z pewnością zwiększających wielokrotnie koszty wykonania struktur i co gorsza, niekoniecznie gwarantujących ich lepszą jakość (nawet bardzo małe błędy bezwzględne, rzędu kilku nanometrów, powodować będą znaczne błędy względne). Stąd za optymalne uznać można dążenie do wytwarzania – o ile pozwalają na to możliwości technologiczne – struktur z ośmioma poziomami fazowymi o teoretycznej wydajności dyfrakcyjnej równej 95%.

Istotne ograniczenia wynikają także ze ścisłej teorii dyfrakcyjnej. Podane powyżej trzy zależności mogą być przyjmowane jako dokładne tylko dla elementów spełniających warunki skalarnej teorii dyfrakcyjnej, to jest elementów, dla których okres struktury Λ jest wielokrotnie większy zarówno od długości fali światła λ , jak i od wysokości reliefu H ($H = \lambda/\Delta n$). Tylko wtedy można przyjąć z dobrym przybliżeniem, że skokowa zmiana profilu nie wprowadza, oprócz przesunięcia fazy o 2π , żadnych zaburzeń pola optycznego. W rzeczywistości nieciągłość na granicy stref powoduje modulację amplitudy i fazy. Związane z tym efekty będą pomijalne w odległościach znacznie większych od λ , lecz stają się istotne dla stref o szerokości $\Lambda < 5\lambda$, powodując w przypadku struktur o wielu poziomach wyraźny spadek wydajności dyfrakcyjnej – nawet poniżej wydajności struktur o dwóch poziomach fazowych [17]. Wydajność tych ostatnich ulega zresztą tylko niewielkim fluktuacjom i dla stref powyżej 2λ może być przyjmowana za niezmienną i równą wydajności określonej skalarnie. Z punktu widzenia projektowania DOE wynika z tego ważny wniosek: przy zmniejszającym się okresie struktury zastosowanie mniejszej liczby poziomów fazowych oznaczać może nie tylko łatwiejszą technologię wytwarzania, lecz także wyższą wydajność dyfrakcyjną.

Teoretycznie wymienionym powyżej ograniczeniom przeciwdziałać można poprzez zwiększenie rozmiaru stref wynikające z zastąpienia profilu o skoku fazy 2π profilem odpowiadającym zmianie fazy o $k2\pi$ ($A_{(k2\pi)} = kA_{(2\pi)}$) [18]. Jednak w przypadku kinoformów o skokowej, a nie ciągłej zmianie fazy (kinoformów schodkowych) takie rozwiązanie zamiast ułatwiać, komplikuje wykonanie struktury ponieważ wydajność dyfrakcyjna zależy od liczby poziomów przypadających na zmianę fazy o 2π , to k -krotne zwiększenie wysokości profilu powoduje, że liczba stopni wzrosnąć powinna również k -krotnie ($L_{(k2\pi)} = k \times L_{(2\pi)}$) [19]. W rezultacie szerokość i wysokość stopni pozostaje taka sama jak dla stref 2π , a do otrzymania profilu zastosowana musi być większa liczba procesów, do tego wykonywanych w trudniejszych warunkach, ponieważ głębokość reliefu jest większa. Ze względów technologicznych należy więc przyjąć, że dla kinoformów schodkowych wysokość profilu fazowego nie powinna przekraczać 2π . Proponowane poniżej rozwiązanie spełnia ten warunek i jednocześnie pozwala na wytwarzanie elementów o wymiarze minimalnym odpowiadającym strukturze o dwóch poziomach fazowych, a o wydajności dyfrakcyjnej wyższej niż osiągnięta dla takich profili.

3.2. Elementy dyfrakcyjne o zmiennej liczbie poziomów fazowych

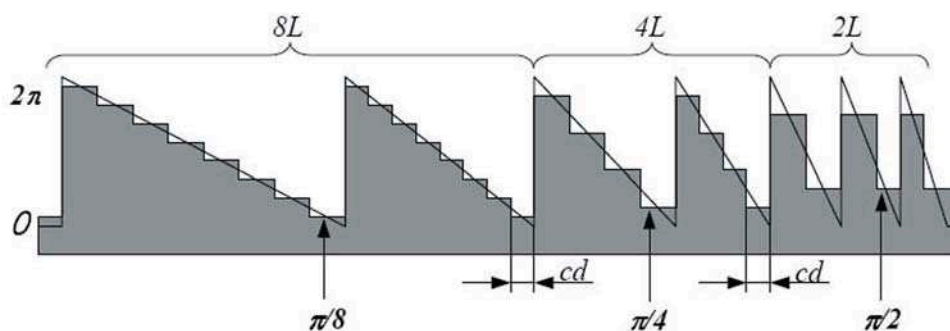
Istota rozwiązania polega na zastąpieniu profilu o stałej liczbie poziomów profilem o zmiennej liczbie stopni fazowych, zależnej od lokalnego okresu struktury $\Delta(x,y)$ i dobranej tak, by ich szerokość nie była mniejsza niż wymiar krytyczny cd , a więc by zachowany był warunek:

$$\frac{\Lambda(x, y)}{L_i} \geq cd$$

gdzie: L_i – lokalna liczba poziomów fazowych, $L_i = 2^i$, $i=1,2,\dots,n$.

Przez wymiar krytyczny rozumie się przy tym minimalny wymiar struktury, dla którego – biorąc po uwagę zarówno ograniczenia technologiczne, jak i dyfrakcyjne – wydajność profilu odbiega w niewielkim stopniu od wyznaczonej zgodnie z teorią skalarną.

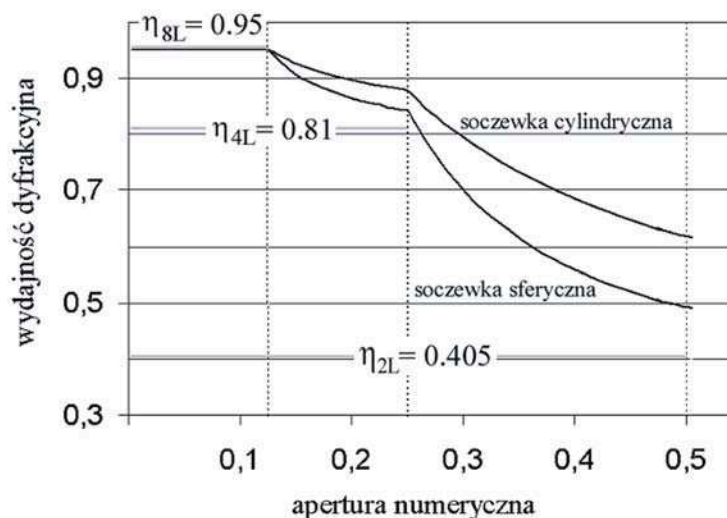
Schemat profilu o zmiennej liczbie poziomów fazowych (ZLP) pokazano na Rys. 5. Zwraca uwagę fakt, że ze względu na przesunięcia fazowe pomiędzy poszczególnymi obszarami profil taki wymaga wykonania dodatkowego procesu wprowadzającego zmianę fazy o π/L_n (w przypadku pokazanym na rysunku o $\pi/8$).



Rys. 5. Schemat profilu dyfrakcyjnego o zmiennej liczbie poziomów fazowych: cd – wymiar krytyczny struktury, $2L \div 8L$ – liczba poziomów fazowych.

Fig. 5. Diffractive profile with variable number of the phase steps: cd – critical dimension, $2L \div 8L$ – number of the phase level.

Teoretyczną wydajność dyfrakcyjną η takich profili w zależności od ich apertury numerycznej NA przedstawiono na Rys. 6 na przykładzie soczewek sferycznej i cylindrycznej (wydajność soczewek eliptycznych będzie miała wartości pośrednie w zależności od stosunku długości osi). Rozważono profile o maksymalnie ośmiu poziomach. Taką liczbę stopni fazowych soczewki miałyby w części środkowej, a w miarę powiększania NA ich liczba zmniejszałaby się najpierw do czterech, a następnie dwóch. Zmiany wydajności wyznaczano na podstawie stosunku powierzchni zajmowanych przez poszczególne profile. Abstrahując od możliwości technologicznych przyjęto przy tym, że wymiar krytyczny równy jest długości fali światła dla jakiego projektowane są soczewki, uwzględniając w ten sposób warunek zachowania wydajności dyfrakcyjnej na poziomie określonym teorią skalarną.



Rys. 6. Wydajność dyfrakcyjna soczewek o zmiennej liczbie stopni fazowych.
Fig. 6. Diffraction efficiency of zone plates with variable number of the phase steps.

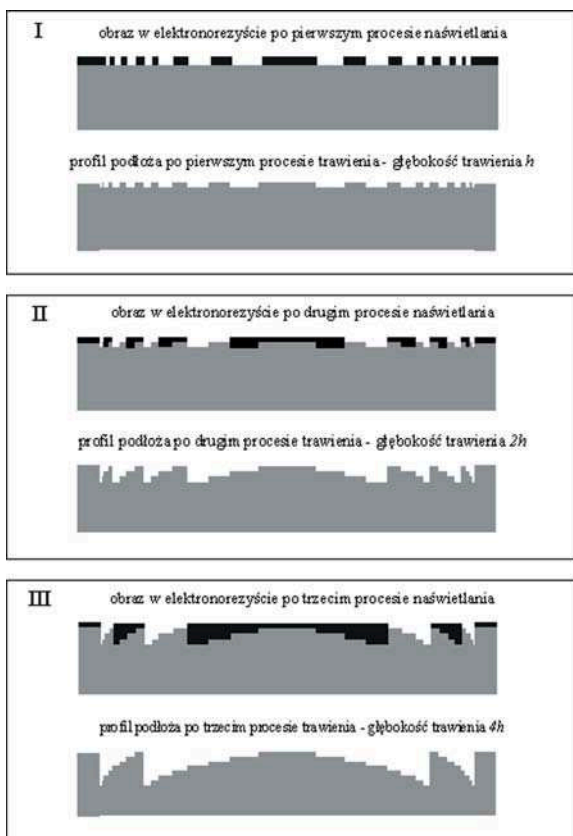
Jak wynika z wykresu w całym zakresie apertur numerycznych powyżej 0.125 (granica pomiędzy profilem 8- i 4-poziomowym) wydajność soczewek ZLP jest wyższa niż ich odpowiedników ze stałą liczbą poziomów fazowych (poziome linie $\eta_{4L}=0.81$ i $\eta_{2L}=0.405$). W przypadku granicznym wynikającym z przyjętego wymiaru krytycznego, to jest dla $NA = 0.5$, wydajność soczewki sferycznej pozostaje nadal o ponad 20%, a cylindrycznej nawet o ponad 50% wyższa niż możliwa do uzyskania przy zastosowaniu profili standardowych. Jeżeli weźmie się pod uwagę, że najmniejszy wymiar stopni elementów ZLP jest taki sam jak dla struktury o dwóch poziomach fazowych (a więc czterokrotnie większy niż dla elementów o 8 poziomach), oraz że w czasie wytwarzania struktury unika się krytycznego centrowania najwyższych zewnętrznych stref [20], to zarówno z punktu widzenia wydajności dyfrakcyjnej, jak i wymagań technologicznych rozwiązanie takie uznać można za bardzo korzystne.

3.3. Binarna metoda elektronolitograficzna

Najbardziej zaawansowaną metodą generacji wzorów mikrostruktur jest w chwili obecnej elektronolitografia. W procesach wytwarzania DOE jest ona wykorzystywana w dwojaki sposób: bądź do bezpośredniej rejestracji fazowego lub amplitudowego profilu struktury poprzez zróżnicowanie dawek ekspozycji (tzw. metody analogowe) [21-22], bądź do wykonywania kompletów fotomasek, z których – podobnie jak w przypadku układów półprzewodnikowych – kopiowane są kolejne poziomy fazowe struktury (metody binarne) [23-24]. Obie metody, analogowa i binarna, mają jednak

istotne wady nie pozwalające na pełne wykorzystanie rozdzielczości oferowanej przez elektronolitografię. W przypadku metody analogowej dotyczą one przede wszystkim ograniczonej kontroli profilu fazowego, w przypadku metody binarnej – ograniczonej dokładności wzorów wskutek nieuniknionych błędów centrowania i mniejszej rozdzielczości metod optycznych, a ich skutkiem jest ograniczenie bądź częstotliwości przestrzennej, bądź wydajności dyfrakcyjnej elementu [20].

Wady te eliminuje w istotnym stopniu binarna metoda elektronolitograficzna, którą szerzej omówiono w pracy [20]. Jej istota polega na wykorzystaniu wiązki elektronów zarówno do generacji wzorów, jak i ich wzajemnego centrowania w kolejnych procesach litograficznych. Naświetlony i wywołany wzór stanowi w każdym procesie maskę do formowania profilu fazowego w procesach reaktywnego trawienia jonowego. Metoda taka stwarza najkorzystniejsze warunki kontrolowania wymiarów poprzecznych (bezpośrednia generacja wzoru wiązką elektronów), wysokości profilu fazowego (głębokość trawienia niezależna od grubości warstwy maskującej), jak i zapewnia największą dokładność centrowania kolejnych poziomów technologicznych, niemożliwą do osiągnięcia innymi metodami, a mającą zasadniczy wpływ na jakość i wydajność profili dyfrakcyjnych [20, 25-26].



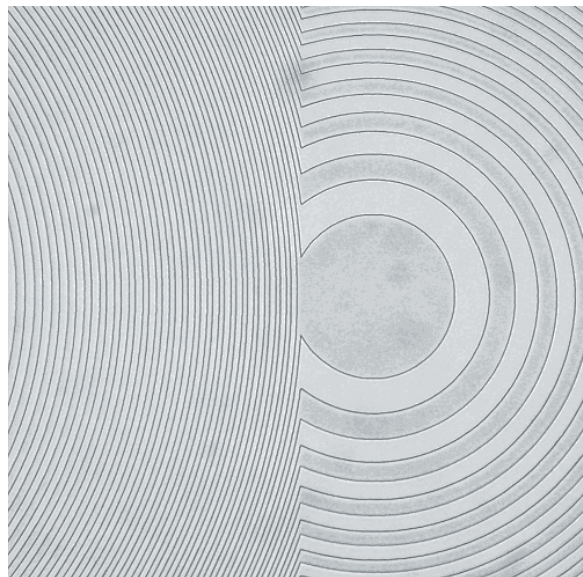
Rys. 7. Schemat procesu wytwarzania soczewki dyfrakcyjnej o ośmiu poziomach fazowych.

Fig. 7. Fabrication scheme of an 8-phase level diffractive lens.

Zastosowanie zasady, w myśl której głębokość trawienia podwajana jest w każdym kroku technologicznym, pozwala na uzyskanie w n etapach struktury o $L = 2^n$ poziomach. Schemat metody na przykładzie wytwarzania soczewki o 8 poziomach fazowych w 3 kolejnych procesach trawienia przedstawiono na Rys. 7.

4. EKSPERYMENT

Zaproponowane rozwiązania sprawdzono eksperymentalnie wykonując element dyfrakcyjny, którego zadaniem było formowanie wiązki emitowanej przez macierz diod laserowych dużej mocy. Projekt przygotowano uwzględniając jednowymiarowe macierze (tzw. linijki diod) wytwarzane w ITME, obejmujące osiem laserów krawędziowych o mocy 2 W, długości fali światła $\lambda = 808$ nm, module $d = 0.5$ mm i długości krawędzi emitującej $l = 0.1$ mm. Założono uzyskanie wiązki o kwadratowym przekroju 2×2 mm² w odległości ~ 50 mm od źródła przyjmując apertury kątowe $\theta_p = 23^\circ$ i $\theta_r = 5^\circ$ zapewniające wykorzystanie ponad 90% promieniowania emitowanego przez linijkę. Zgodnie z modelem koncentratora przedstawionym w pkt. 2 konsekwencją tych założeń jest element dyfrakcyjny składający się z 8 eliptycznych strefowych płytek fazowych o aperturach $w_x = 0.5$ mm, $w_y = 1.94$ mm, ogniskowych $f_x = 2.176$ mm i $f_y = 2.190$ mm oraz odległościach $z_1 = 2.286$ mm i $z_2 = 45.720$ mm. Fragment struktury pokazano na Rys. 8.



Rys. 8. Zewnętrzny fragment elementu dyfrakcyjnego obejmującego 8 soczewek eliptycznych.

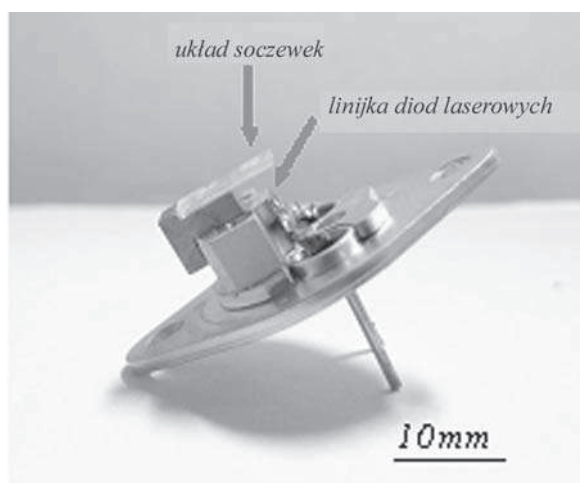
Fig. 8. Outer fragment of the 8-element elliptical lens array.

Dyfrakcyjne elementy optyczne do formowania wiązek światła...

W projektach soczewek przyjęto profil dyfrakcyjny o zmiennej liczbie stopni fazowych, obejmujący 2 i 4 poziomy fazowe z wymiarem krytycznym $0.8 \mu\text{m}$, o teoretycznej wydajności dyfrakcyjnej 65%. Struktury wykonano na monokrystalicznych podłożach kwarcowych (płytki o średnicy 50 mm i grubości 0.8 mm) posługując się binarną metodą elektronolitograficzną. Do naświetlania wzorów w warstwie elektronorezystu (PMMA-350k) użyto elektronolitografu ZBA-20 Carl-Zeiss-Jena (obecnie VISTEC), a do formowania profilu fazowego w podłożu kwarcowym zastosowano procesy reaktywnego trawienia jonowego we fluorometanie z dodatkiem tlenu ($\text{CF}_4 + 4\% \text{O}_2$) prowadzone w reaktorze planarnym RDE300 Alcatel.

Uzyskano struktury o wydajności dyfrakcyjnej wynoszącej 61%, a więc w niewielkim stopniu odbiegającej od założonej, co świadczy o poprawnym wykonaniu profilu fazowego.

Po rozcięciu podłoża na pojedyncze elementy (na płytce wykonywano jednocześnie 12 koncentratorów) wytworzone układy optyczne zmontowano z linijkami diod laserowych w standardowych obudowach TO3 (Rys. 9). Do obserwacji i pomiarów rozkładu natężenia wiązki użyto kamery cyfrowej LaserCamIII z oprogramowaniem BeamViemAnalyzer firmy Coherent. Stwierdzono poprawne działanie systemu soczewek dyfrakcyjnych transformujących światło emitowane przez diody.

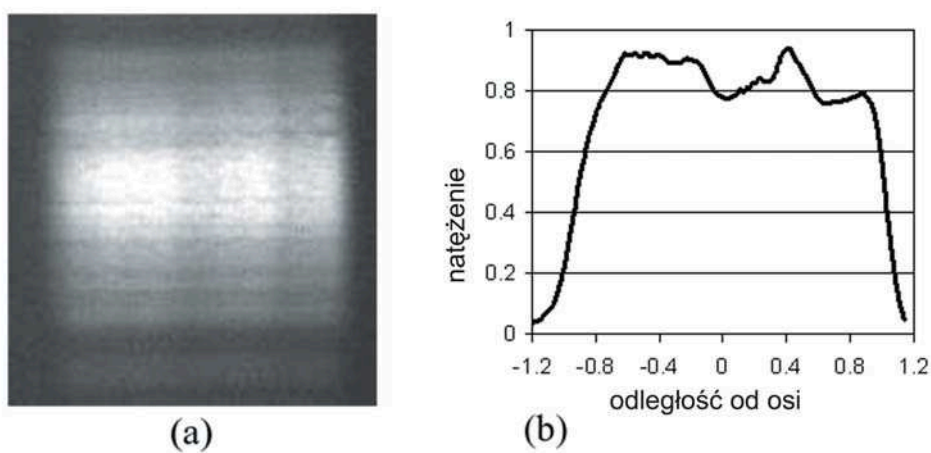


Rys. 9. Macierz diod laserowych w standardowej obudowie TO3 z elementem dyfrakcyjnym formującym wiązkę.

Fig. 9. Laser diode bar in a standard package TO3 equipped with the diffractive beam concentrator.

W zadanej odległości uzyskano wiązkę o niemal kwadratowym przekroju $2 \times 2 \text{ mm}^2$ (Rys. 10). Stromy przebieg rozkładu natężenia w osi równoległej do krawędzi emitujących (brak rozmycia wiązki) wskazuje na wysoką precyzję układu soczewek

dyfrakcyjnych. Za istotną zaletę tak zaprojektowanego elementu uznać należy także wyrównanie natężenia światła w przekroju formowanej wiązki wynikające z nakładania się wiązek światła emitowanych przez poszczególne diody linijki. Z punktu widzenia miniaturyzacji korzystne są także małe wymiary układu optycznego (maksymalny wymiar koncentratora odpowiada długości linijki), dzięki czemu może być on z powodzeniem montowany w standardowych obudowach diod laserowych.



Rys. 10. Kształt wiązki formowanej przez 8-elementowy układ dyfrakcyjny: a) obraz wiązki zarejestrowany kamerą CCD, b) rozkład natężenia wiązki wzdłuż osi równoległej do krawędzi emitującej.

Fig. 10. Beam spot focused by the 8-element concentrator: a) CCD image of the beam cross-section, b) intensity distribution of the beam spot in direction parallel to the emitting edge.

5. PODSUMOWANIE

W pracy zaproponowano zastosowanie dyfrakcyjnych elementów optycznych do transformacji wiązek światła emitowanych przez laserowe diody krawędziowe.

Przedstawiono modele takich elementów oparte na wykorzystaniu eliptycznych fazowych płytek strefowych oraz technologię ich wytwarzania w procesach elektronolitografii i reaktywnego trawienia jonowego.

Ideę kolimatorów dyfrakcyjnych sprawdzono eksperymentalnie wykonując element przeznaczony do formowania wiązki emitowanej przez jednowymiarową macierz diod laserowych. Zgodnie z założeniami struktura, którą zaprojektowano jako układ soczewek eliptycznych o prostokątnej aperturze, pozwoliła na uzyskanie w zadanej odległości wiązki o dużym i bardziej równomiernym niż w przypadku pojedynczych diod natężeniu oraz symetrycznym przekroju. Podstawowe zalety takich struktur to zdolność do efektywnej koncentracji wiązek emitowanych przez diody

oraz prosta i zwarta budowa pozwalająca na zachowanie miniaturowych rozmiarów półprzewodnikowych źródeł światła.

LITERATURA

- [1] Lerner E. J.: Diode arrays boost efficiency of solid-state lasers, *Laser Focus World*, (1998), 97-103
- [2] Liew S. K., Carlson N. W.: Method of obtaining a collimated near-unity aspect ratio beam from DFB-GSE laser with good beam quality, *Appl. Opt.* 31, (1992), 2743
- [3] Tari T., Richter P.: Correction of astigmatism and ellipticity of an astigmatic Gaussian beams, *Opt. Quant. Electron.* 26, (1994), 903
- [4] Fantone S. D.: Anamorphic prism: a new type, *Appl. Opt.* 30, (1991), 5008-5009
- [5] Marchant A. B.: Focusing elliptical laser beams, *Appl. Opt.* 23, (1984), 670
- [6] http://www.doriclenses.com/article_details.php?rubid=27
- [7] Xiao-qun Z., Ann B. N. K., Seong K. S.: Single aspherical lens for deastigmatism, collimation, and circularization of a laser beam, *Appl. Opt.* 39, (2000), 1148–1151
- [8] Serkan M., Kirkici H.: Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams, *Appl. Opt.* 47, (2008), 5489–5499
- [9] Serkan M., Kirkici H., Cetinkaya H.: Off-axis mirror based optical system design for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams, *Appl. Opt.* 46, (2007), 5489–5499
- [10] Miler M., Pala J., Aubrecht I., Hradil M.: Off-axis colimation of diode laser beams by means of single-element holographic diffractive optics, *Optics and Lasers in Eng.* 44, (2006), 991-1007
- [11] Xiao-qun Z., Ann B. N. K., Seong K. S.: Single aspherical lens for deastigmatism, collimation, and circularization of a laser beam, *Appl. Opt.* 39, (2000), 1148–1151
- [12] Sinzinger S., Brenner K. H., Moisel J., Spick T., Testorf M.: Astigmatic gradient-index elements for laser-diode collimation and beam shaping, *Appl. Opt.* 34, (1995), 6626-6632
- [13] Gomez-Reino C., Cuadrado J. M., Perez M. V.: Elliptical and hyperbolic zone plates, *Appl. Opt.* 19, (1980), 1541-1545
- [14] Jaroszewicz Z., Kołodziejczyk A., Mouriz D., Sochacki J.: Generalized zone plates focusing light into arbitrary line segments, *J. Mod. Opt.* 40, (1993), 601-612
- [15] Kowalik A., Góra K., Adamkiewicz G., Ziętek M., Mięka G., Kołodziejczyk A., Jaroszewicz Z.: Efficient diffractive collimator for edge-emitting laser diodes, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 6189, (2006), 61871E
- [16] Kowalik A., Góra K., Jaroszewicz Z., Podgórski J., Typa P.: Dyfrakcyjne elementy optyczne o dwóch powierzchniach fazowych, IX Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa ELTE 2007, Kraków, 4-7.09.2007

A. Kowalik, K. Góra, J. Podgórski, ...

- [17] Noponen E., Turunen J., Vasara A.: Parametric optimization of multilevel diffractive optical elements by electromagnetic theory, *Applied Optics* 31, (1992), 5910-5912
- [18] Jaroszewicz Z., Staronski R., Sochacki J., Righini G.: Planar fresnel lens with multiple phase jump, *Pure Applied Optics* 3, (1994), 667-677
- [19] Jaroszewicz Z., Kołodziejczyk A., Kowalik A., Restrepo R.: Determination of phase step errors of blazed lithographic gratings by inspection of their diffraction efficiencies, *Opt. Eng.* 40, (2001), 692-697
- [20] Kowalik A., Góra K., Jaroszewicz Z., Kołodziejczyk A.: Multi-step electron beam technology for the fabrication of high performance diffractive optical elements, *Microelectronic Engineering*, 77, (2005), 347-357
- [21] Kley E. B.: Continuous profile writing by electron and optical lithography, *Microelectronic Engineering*, 34, (1997), 261-298
- [22] Daschner W., Larsson M., Lee S. H.: Fabrication of monolithic diffractive optical elements by the use of e-beam direct write on a analog resist and a single chemically assisted ion-beam-etching step, *Applied Optics*, 34, (1995), 2534-2539
- [23] Pawlowski E., Engel H., Ferstl M., Fuerst W., Kuhlow B.: Two-dimensional array of AR-coated diffractive microlenses fabricated by thin film deposition, *Proc. SPIE*, 1751, (1993), 13-21
- [24] Stern M. B.: Binary optics: a VLSI-based microoptics technology, *Microelectronic Engineering*, 32, (1996), 369
- [25] Farn M. W., Goodman J.: Effect of VLSI fabrication on kinoform efficiency, *Proc. SPIE*, 1211, (1990), 125-136
- [26] Kuittinen M., Turunen J.: Mask misalignment in photolithographic fabrication of resonance-domain diffractive elements, *Optics Communications*, 142, (1997), 14-18

SUMMARY

DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR LASER DIODE BEAMS SHAPING

Recent years have shown a rapid growth in the application of edge emitting laser diodes (LDs). They are small, efficient, low voltage, and have operating lifetimes much larger than conventional light sources. However, the output beams of the laser diode are highly divergent and astigmatic, thus for almost all applications they have to be first reshaped. Because of complicated wave front, conventional refractive optics fulfilling such a task usually consists of two or more elements, what results in a significant increase of the system size, cost, and assembly difficulties. In this way the most important advantages of LDs, that is their small size and simplicity, are wasted. Therefore it is interesting to integrate all optical functions of the

reshaping system within a single microoptical element. The aim of this paper is to present simple and compact diffractive elements that can be used to transform light beams emitted by laser diodes. As an example, a single-element beam concentrator for linear LD array is demonstrated, consisting of a line of rectangularly apertured elliptical diffractive microlenses. It was proved that such a system generates in the output plane a regular spot with a relatively uniform density. Its main advantages lie in simplicity, possibility to concentrate a large amount of light in a small spot and to preserve the compactness of LDs.

Słowa kluczowe: diffractive optical element, LD