

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 246920 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **439657**

(22) Data zgłoszenia: **2021.11.26**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.05.29 BUP 22/2023**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.03.31 WUP 13/2025**

(51) MKP:

G02B 6/00 (2006.01)

G02B 6/122 (2006.01)

H01L 33/00 (2010.01)

H01L 33/02 (2010.01)

H01L 33/32 (2010.01)

H01S 5/30 (2006.01)

H01S 5/34 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**TOPGAN SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Warszawa, PL
INSTYTUT WYSOKICH CIŚNIEŃ POLSKIEJ
AKADEMII NAUK, Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**ANNA KAFAR, Gdynia, PL
KIRAN SABA, Shorkot, PK
KRZYSZTOF GIBASIEWICZ, Warszawa, PL
SZYMON STAŃCZYK, Gdynia, PL
STEPHEN NAJDA, Warszawa, PL
PIOTR PERLIN, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Rafał Witek, Wrocław, PL

(54) Tytuł:

Układ lasera i światłowodu oraz sposób jego wytwarzania

PL 246920 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ lasera i światłowodu oraz sposób wytwarzania zintegrowanego układu lasera i światłowodu z półprzewodników III-N. Wynalazek znajduje zastosowanie w optoelektronice.

Z amerykańskiego zgłoszenia patentowego US2014376857A1 znany jest foniczny układ scalony, który może zawierać warstwę krzemu zawierającą falowód i co najmniej jeden inny element foniczny. Foniczny układ scalony może również zawierać pierwszy obszar izolujący umieszczony nad pierwszą stroną warstwy krzemu i otaczający co najmniej jeden poziom metalizacji, drugi obszar izolujący umieszczony nad drugą stroną warstwy krzemowej i otaczający co najmniej jeden środek wzmacniający źródło laserowe sprzężone optycznie z falowodem.

Z amerykańskiego patentu US10026723B2 znany jest zintegrowany foniczny układ scalony zawierający skupiający aktywny element optyczny, elektrodę skonfigurowaną do odbierania sygnału elektrycznego, gdzie co najmniej jedna charakterystyka skupiającego aktywnego elementu optycznego jest zmieniana w oparciu o sygnał elektryczny odebrany przez elektrodę, elektrodę uziemiającą oraz styk łączący elektrycznie połączony z elektrodą oraz wkładkę połączoną z co najmniej częścią chipa fonicznego układu scalonego, przy czym wkładka zawiera ścieżkę przewodzącą utworzoną na powierzchni wkładki, a ścieżka przewodząca jest elektrycznie połączona ze źródłem sygnału elektrycznego, element naziemny oraz przewodzący przewód połączony ze stykiem fonicznego układu scalonego, przy czym przewodzący przewód połączony jest elektrycznie z elementem przewodzącym w celu dostarczenia sygnału elektrycznego do elektrody fonicznego układu scalonego.

Z europejskiego patentu EP2567004B1 znane jest podłoże stanowiące zespół sąsiadujących ze sobą płaskich powierzchni w postaci pasków o szerokościach wynoszących od 1 do 2000 μm . Dłuższe krawędzie wszystkich tych płaskich powierzchni są do siebie równoległe, a ich płaszczyzny są zdeorientowane względem płaszczyzny krystalograficznej kryształu azotku galu określonej wskaźnikiem Millera-Bravais'ego równym (0001), (10-10), (11-22) lub (11-20). Kąt dezorientacji każdej z tych płaskich powierzchni wynosi od 0 do 3 stopni i jest różny dla każdych dwóch płaskich powierzchni sąsiadujących ze sobą. Podłoże według wynalazku umożliwia wzrost struktury warstwowej AlInGaN w procesie wzrostu epitaksjalnego MOCVD lub MBE, z której możliwie jest wykonanie diody laserowej o nieabsorbujących zwierciadłach emitującej światło o długości fali od 380 do 550 nm i matrycy diod laserowych emitującej jednocześnie światło o różnych długościach fali w zakresie od 380 do 550 nm.

Z polskiego patentu Pat.228006 znana jest dioda superluminescencyjna na bazie stopu AlInGaN, zawierająca objętościowe podłoże z azotku galu, dolną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu n, dolną warstwę światłowodową o przewodnictwie elektrycznym typu n, warstwę emitującą światło, warstwę blokującą elektrony o przewodnictwie elektrycznym typu p, górną warstwę światłowodu, górną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu p i warstwę podkontaktową o przewodnictwie elektrycznym typu p, przy czym objętościowe podłoże z azotku galu posiada przestrzennie zmienną dezorientację powierzchni w stosunku do płaszczyzny krystalograficznej M z zakresu od 0° do 10° .

Foniczne układy scalone (FUS) stają się coraz ważniejszym komponentem współczesnej optoelektroniki. Ich wielkość, łatwość użycia, odporność na przeciążenia oraz wielofunkcyjność decydują o coraz większej penetracji rynku przez takie układy. Pierwsze foniczne układy scalone zostały opracowane na platformie krzemowej i pracują z reguły w paśmie telekomunikacyjnym 1,55 μm . Problemem fotoniki krzemowej jest podstawowa trudność w integracji emiterów (laserów) na wspólnej platformie, ponieważ krzem jest półprzewodnikiem o skośnej przerwie energetycznej i nie może sam emitować światła. FUS oparte na krzemie wymagają zawsze zewnętrznych źródeł światła. Platforma InP daje możliwość integracji emiterów i falowodów na jednej płytce, ale ogranicza te systemy do pracy w średniej podczerwieni. Fundamentalnym problemem całkowicie zintegrowanych FUS działających w zakresie widzialnym, jest połączenie laserów z elementami biernymi takimi jak falowody, wytworzonymi na przezroczystym dla światła podłożu. Problemem jest nie tylko wyciek światła do podłoża, ale również opracowanie koncepcji światłowodu o dużym sprzężeniu do laserowego źródła światła.

Celem niniejszego wynalazku było opracowanie systemu pracującego w zakresie światła widzialnego. Takie systemy potrzebne są między innymi do optycznych zegarów atomowych. Do wytwarzania światła widzialnego w szerokim zakresie należy wykorzystać półprzewodniki oparte na AlInGaN (glin-ind-azotek galu). Lasery zbudowane z tych materiałów wytwarzane są zwykle na podłożu z azotku galu.

Nieoczekiwanie wszystkie wyżej wskazane problemy techniczne zostały rozwiązane przy pomocy niniejszego wynalazku.

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania układu lasera i światłowodu obejmujący następujące etapy:

- a) wytwarza się objętościowe podłoże z azotku galu, po czym na podłożu z azotku galu definiuje się obszary o zwiększonej dezorientacji względem otoczenia,
- b) nanosi się dolną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu n,
- c) nanosi się dolną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu n,
- d) nanosi się warstwę emitującą światło złożoną z jedno- lub wielostudni kwantowej ze związku o wzorze $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$,
- e) nanosi się górną niedomieszkowaną warstwę światłowodu,
- f) nanosi się warstwę blokującą elektrony o przewodnictwie elektrycznym typu p,
- g) nanosi się górną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu p,
- h) nanosi się górną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu p
- i) nanosi się warstwę podkontaktową o przewodnictwie elektrycznym typu p,
- j) wytwarza się strukturę przestrzenną światłowodu o kształcie grzbietu,
- k) wytwarza się szczelinę separującą laser i światłowód tworzącą jedno ze zwierciadeł lasera,

charakteryzujący się tym, że światłowód wytwarza się z tych samych warstw co strukturę lasera, zaś studnie kwantowe w obszarze światłowodu, posiadają co najmniej o 3,5% molowych mniej indu w porównaniu z obszarem lasera, a absorpcja optyczna światła lasera w światłowodzie jest mniejsza niż 12 cm^{-1} .

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że profil dezorientacji podłoża z azotku galu w obszarze szczeliny, pomiędzy zwierciadłem lasera a oknem wejściowym światłowodu określony jest wzorem:

$$\delta_{lok}(x) = \delta_1 + \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \text{Exp}\left(\frac{a_d(x-d)}{d}\right)}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera,

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu,

d – oznacza szerokość szczeliny,

x – oznacza współrzędną przestrzenną w szczelinie pomiędzy laserem a światłowodem,

a_d – oznacza stałą określającą profil zmian należąca do zakresu od 3 do 7.

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że dezorientacja podłoża z azotku galu w obszarze światłowodu jest większa od bazowej dezorientacji podłoża z azotku galu i określona jest wzorem:

$$\delta_2 > \frac{a_1 \delta_1 + 0.05a_2 - 20}{0.43a_1}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera,

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu,

a_1 i a_2 - oznaczają parametry zależne od warunków wzrostu warstw i opisujące przybliżenie liniowe zależności długości fali emisji struktury od kąta dezorientacji δ_1 .

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że szerokość szczeliny pomiędzy zwierciadłem lasera a oknem wejściowym światłowodu określona jest wzorem:

$$d < (1.5w_m - 0.5w_l) / \text{Tan}\left(\frac{2\lambda}{\pi w_l}\right)$$

gdzie,

d – oznacza szerokość szczeliny,

w_l i w_m – oznaczają odpowiednio szerokość modu optycznego w kierunku transwersalnym w obszarze lasera i obszarze światłowodu,

λ – oznacza długość fali emisji lasera.

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że ściany szczeliny od strony lasera pokrywa się warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła w zakresie 0,1–100%.

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że ściany szczeliny od strony światłowodu pokrywa się warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła poniżej 1%.

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że wytwarza się światłowód o zagiętym kształcie.

Korzystnie, sposób charakteryzuje się tym, że na podłożu z azotku galu wytwarza się układ obejmujący co najmniej dwa lasery ze światłowodami, przy czym światłowody te połączone są w jeden główny światłowód.

Kolejnym przedmiotem wynalazku jest układ lasera i światłowodu zawierający kolejno strukturyzowane, objętościowe podłoże z azotku galu, na którym zdefiniowane są obszary o zwiększonej dezorientacji względem otoczenia, dolną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu n, dolną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu n, warstwę emitującą światło złożoną z jedno- lub wielostudni kwantowej ze związku o wzorze $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, górną niedomieszkowaną warstwę światłowodu, warstwę blokującą elektrony o przewodnictwie elektrycznym typu p, górną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu p, górną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu p, warstwę podkontaktową o przewodnictwie elektrycznym typu p, strukturę przestrzenną światłowodu o kształcie grzbietu, szczelinę separującą laser i światłowód tworzącą jedno ze zwierciadeł lasera, charakteryzujący się tym, że światłowód zawiera te same warstwy co struktura lasera, przy czym studnie kwantowe w obszarze światłowodu, posiadają co najmniej o 3,5% molowych mniej indu w porównaniu z obszarem lasera, a absorpcja optyczna światła lasera w światłowodzie jest mniejsza niż 12 cm^{-1} .

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że profil dezorientacji podłoża z azotku galu w obszarze szczeliny, pomiędzy zwierciadłem lasera a oknem wejściowym światłowodu określony jest wzorem:

$$\delta_{lok}(x) = \delta_1 + \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \text{Exp}\left(\frac{a_d(x-d)}{d}\right)}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera,

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu,

d – oznacza szerokość szczeliny,

x – oznacza współrzędną przestrzenną w szczelinie pomiędzy laserem a światłowodem,

a_d – oznacza stałą określającą profil zmian należącą do zakresu od 3 do 7.

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że dezorientacja podłoża z azotku galu w obszarze światłowodu jest większa od bazowej dezorientacji podłoża z azotku galu i określona jest wzorem:

$$\delta_2 > \frac{a_1 \delta_1 + 0.05a_2 - 20}{0.43a_1}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera,

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu,

a_1 i a_2 – oznaczają parametry zależne od warunków wzrostu warstw i opisujące przybliżenie liniowe zależności długości fali emisji struktury od kąta dezorientacji δ_1 .

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że szerokość szczeliny pomiędzy zwierciadłem lasera a oknem wejściowym światłowodu określona jest wzorem:

$$d < (1.5w_m - 0.5w_l) / \text{Tan}\left(\frac{2\lambda}{\pi w_l}\right)$$

gdzie,

d – oznacza szerokość szczeliny,

w_l i w_m – oznaczają odpowiednio szerokość modu optycznego w kierunku transwersalnym w obszarze lasera i obszarze światłowodu,

λ – oznacza długość fali emisji lasera.

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że ściany szczeliny od strony lasera pokryte są warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła w zakresie 0,1–100%.

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że ściany szczeliny od strony światłowodu pokryte są warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła poniżej 1%.

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że światłowód posiada zagięty kształt.

Korzystnie, układ charakteryzuje się tym, że na podłożu z azotku galu rozmieszczone są co najmniej dwa lasery ze światłowodami, przy czym światłowody te połączone są w jeden główny światłowód.

Lokalna zmiana dezorientacji podłoża może być osiągnięta poprzez wielopoziomową fotolitografię w grubym pozytywowym fotorezycie oraz suche trawienie metodą reaktywnych jonów. Zgodnie z wynalazkiem, obszar o zwiększonej dezorientacji przyjmuje kształt zbliżony choć większy od przysłanego światłowodu, na przykład prostokąta. Po rozwirowaniu fotorezystu na podłożu GaN, prowadzona jest fotolitografia wielopoziomowa to znaczy oświetlanie fotorezystu ze zmienną przestrzennie dawką światła, przy czym dawka przyjmuje więcej niż dwie możliwe wartości. Możliwym rozwiązaniem jest liniowy profil dawki światła w kierunku krótszego boku prostokąta, gdzie skala szarości odpowiada dawce światła (biały – największa dawka, czarny – najmniejsza dawka). Tego typu wzór, przy odpowiednio dobranych parametrach procesu, prowadzi po wywołaniu fotorezystu do wykształcenia się trójwymiarowego kształtu zbocza. Następnie podłożę z ukształtowanym fotorezystem poddawane jest procesowi suchego trawienia metodą reaktywnych jonów, który przenosi trójwymiarowy wzór na powierzchnię podłoża GaN. Wartość kąta dezorientacji obszaru powinna być większa względem kąta dezorientacji podłoża GaN. Zmiana ta ma na celu zwiększenie przerwy energetycznej studni kwantowych w obszarze światłowodu, a co za tym idzie zmniejszenie absorpcji na długości fali emisji lasera. Zgodnie z wynalazkiem, relacja dezorientacji w obszarze światłowodu w stosunku do dezorientacji podłoża przyjmuje postać opisaną wzorem I:

$$\delta_2 > \frac{a_1 \delta_1 + 0.05a_2 - 20}{0.43a_1}$$

gdzie δ_1 to wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera, δ_2 to wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu, natomiast a_1 i a_2 to parametry zależne od warunków wzrostu warstw i opisujące przybliżenie liniowe zależności długości fali emisji struktury, λ , w nm od kąta dezorientacji δ_1 oszacowane w zakresie typowych dezorientacji podłoża od $0,4^\circ$ do 1° z wykorzystaniem wzoru II:

$$\lambda = a_1 \delta_1 + a_2$$

Następnie prowadzony jest wzrost struktury metodą epitaksji ze związków metaloorganicznych. Warstwy okładkowe są zbudowane z azotku galowo-glinowego $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, dla którego x zawiera się w przedziale od 0,05 do 0,12 i grubości od $0,5 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$. Dolna warstwa okładkowa jest domieszkowana krzemem na poziomie $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Górna warstwa okładkowa zwykle domieszkowana jest magnezem na poziomie od $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ do $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. Warstwy światłowodowe wykonane są zwykle z azotku galu o grubościach od $0,05 \mu\text{m}$ do $0,15 \mu\text{m}$. Dolna warstwa światłowodowa może być domieszkowana krzemem, a górna warstwa światłowodowa może być domieszkowana magnezem. Obie warstwy światłowodowe mogą być również niedomieszkowane lub mogą być domieszkowane tylko w części swojej grubości. Warstwy blokujące elektrony w przypadku diod o emisji w zakresie 390–550 nm zbudowane są z $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, dla którego x mieści się w zakresie od 0 do 0,2. Warstwa stanowiąca obszar aktywny generujący światło może składać się z pojedynczej studni kwantowej $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, dla której x mieści się w zakresie od 0 do 0,3 i ma grubość od 2 nm do 10 nm, jak również z kilku studni kwantowych o analogicznej budowie oddzielonych barierami GaN lub $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ o zawartości In mniejszej niż w przypadku studni kwantowej. Jako ostatnia warstwa, powyżej górnej warstwy okładkowej uzyskiwana jest warstwa podkontaktowa o wysokim domieszkowaniu magnezem na poziomie $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ do $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. Po zakończeniu wzrostu epitaksjalnego prowadzony jest szereg procesów w celu wytworzenia diody laserowej. Do głównych kroków technologicznych należy: wytworzenie grzbietu definiującego wnękę rezonansową (kontrast współczynnika załamania) wzdłuż przyrzędu oraz kształt światłowodu przy pomocy fotolitografii i trawienia reaktywnymi jonami, osadzenie warstwy izolującej obszary które nie mają być pobudzane elektrycznie (wykonanej np. z SiO_2 lub SiN), osadzenie kontaktu elektrycznego do strony typu p oraz osadzenie kontaktu elektrycznego o większym obszarze pozwalającego na wykonanie drutowych połączeń elektrycznych. Po skończeniu wytwarzania lasera wykonany jest kolejny proces fotolitografii i trawienia definiujący zwierciadła wnęki rezonansowej lasera oraz okno wejściowe

światłowodu. Dla obniżenia strat na sprzęganiu światła pomiędzy laserem i światłowodem, ważny jest dobór szerokości szczeliny pomiędzy oknem wejściowym światłowodu a najbliższym zwierciadłem lasera. Szerokość szczeliny pomiędzy laserem a światłowodem (parametr d) zależy od wybranej struktury epitaksjalnej lasera i światłowodu i opisana jest wzorem III:

$$d < (1.5w_m - 0.5w_l) / \tan\left(\frac{2\lambda}{\pi w_l}\right)$$

gdzie d to szerokość szczeliny, w_l i w_m to odpowiednio szerokość modu optycznego w kierunku transversalnym w obszarze lasera i obszarze światłowodu wyznaczona jako spadek intensywności na profilu światła o $1/(e^2)$, λ to długość fali emisji lasera.

Dla obniżenia strat na sprzęganiu światła pomiędzy laserem i światłowodem, ważny jest również profil zmian dezorientacji w obszarze pomiędzy laserem a światłowodem. Lokalna dezorientacja δ_{lok} w obszarze szczeliny powinna zmieniać się w sposób ciągły i gładki. Lokalna dezorientacja δ_{lok} pomiędzy laserem a światłowodem zależy od dezorientacji podłoża, dezorientacji w obszarze światłowodu oraz szerokości szczeliny i opisana jest wzorem IV:

$$\delta_{lok}(x) = \delta_1 + \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \text{Exp}\left(\frac{a_d(x-d)}{d}\right)}$$

gdzie x to współrzędna przestrzenna w szczelinie pomiędzy laserem a światłowodem, przy czym $x = 0$ dla zwierciadła lasera, a a_d to stała określająca profil zmian należąca do zakresu od 3 do 7.

Wynalazek pozwala na wykonanie światłowodu nie tylko w postaci prostego paska, ale i na zmianę kierunku propagacji światła poprzez zakrzywienie światłowodu, jak i łączenie światła pochodzącego z kilku laserów poprzez światłowód o wielu oknach wejściowych.

Przedmiot wynalazku w przykładach wykonania jest uwidoczniony na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat pokazujący umiejscowienie lasera, światłowodu oraz obszaru o zwiększonej dezorientacji na podłożu GaN, fig. 2 przedstawia przekrój boczny układu lasera i światłowodu, fig. 3 przedstawia schemat pokazujący zestaw lasera oraz światłowodu o zagiętym kształcie, który pozwala na zmianę kierunku propagacji światła w stosunku do osi lasera, fig. 4 przedstawia schemat pokazujący układ wielu laserów, których sygnał jest sprzęgany do łączących się ze sobą odnog światłowodu o wspólnym wyjściu.

Sposób według wynalazku w przykładzie realizacji jest bliżej objaśniony w oparciu o rysunek, na którym fig. 5 przedstawia schemat wytwarzania lokalnej zmiany dezorientacji w kierunku „a” oraz w obszarze światłowodu, fig. 6 przedstawia schemat wytwarzania lasera i światłowodu.

Wykaz stosowanych oznaczeń:

- 1 – laser,
- 2 – światłowód,
- 3 – podłoże z azotku galu,
- 4 – obszar o zwiększonej dezorientacji,
- 5 – grzbiet lasera,
- 6 – warstwa izolującego materiału,
- 7 – warstwa o przewodnictwie elektrycznym typu p,
- 8 – pola/warstwy wykonane ze złota,
- 9 – zwierciadła lasera,
- 10 – okno wejściowe światłowodu,
- 11 – szczelina.

Przykład 1

Sposób wytwarzania układu lasera 1 i sprzężonego z nim światłowodu 2 rozpoczyna się od strukturyzowania objętościowego podłoża z azotku galu 3. Wybrano podłoże z azotku galu 3 o dezorientacji δ_1 równej $0,6^\circ$ o krystalograficznym kierunku M. Wstępne testy pozwoliły na wyznaczenie wartości stałych a_1 oraz a_2 we wzorze (I) jako, odpowiednio, $-29^\circ 1'$ oraz 465 nm. Przygotowany został wzór do fotolitografii wielopoziomowej prowadzący do zwiększenia dezorientacji podłoża do wartości $\delta_2 = 14^\circ$.

Jednocześnie wzór zakłada gładką zmianę dezorientacji pomiędzy przyszłym obszarem lasera 1 i światłowodu 2 zgodnie z zależnością opisaną wzorem (IV) dla parametru a_d wynoszącego 5.

Najpierw na podłoże z azotku galu 3 nakłada się warstwę fotorezystu pozytywowego o grubości 5 μm . Następnie warstwę fotorezystu pozytywowego naświetla się zmienną przestrzennie dawką światła zgodnie, która doprowadza do powstania zbocza o zwiększonej dezorientacji po wywołaniu fotorezystu. Otrzymuje się trójwymiarowy kształt fotorezystu, który przetransferowuje się na podłoże metodą suchego trawienia reaktywnymi jonami w plazmie argonowo-chlorowej. Po przygotowaniu podłoża przeprowadza się wzrost epitaksjalny metodą epitaksji ze związków metaloorganicznych. Najpierw nakłada się dolną warstwę okładkową $\text{Al}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{N}$ o grubości 1,7 μm domieszkowaną krzemem na poziomie $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Następnie nakłada się dolną warstwę światłowodową $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$ o grubości 0,1 μm domieszkowaną krzemem na poziomie $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Następnie nakłada się obszar aktywny generujący światło zawierający dwie studnie kwantowe $\text{In}_{0,09}\text{Ga}_{0,91}\text{N}$ o grubości 2 nm otoczone barierami z azotku galu o grubości 8 nm, przy czym obszar aktywny jest intencjonalnie niedomieszkowany. Następnie nakłada się górną warstwę światłowodową $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}$ o grubości 0,1 μm domieszkowaną magnezem na poziomie $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, przy czym w jej obrębie wytwarza się również warstwę $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$ o grubości 20 nm domieszkowaną magnezem na poziomie $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ w odległości 50 nm od interfejsu pomiędzy obszarem aktywnym a górną warstwą światłowodową. Następnie nakłada się górną warstwę okładkową $\text{Al}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{N}$ o grubości 0,5 μm domieszkowaną magnezem na poziomie $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Na koniec nakłada się warstwę podkontaktową o wysokim domieszkowaniu magnezem na poziomie $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ i grubości 50 nm.

Następnie wykonuje się przetwarzanie („processing”) struktury. Najpierw nakłada się fotorezyst pozytywowi i wykonuje się fotolitografię definiującą kształt grzbietu 5 przyszłego lasera 1 oraz światłowodu 2 w postaci paska o szerokości 2 μm i dłuższej osi skierowanej zgodnie z kierunkiem krystalograficznym M. Następnie przeprowadza się suche trawienie przy pomocy aktywnych jonów Ar oraz Cl na głębokość 520 nm. Następnie wytwarza się grzbiet 5 przechodzący z płaskiej części podłoża z azotku galu 3 na obszar o zwiększonej dezorientacji 4. Następnie na powierzchni całego „kryształu” osadza się warstwę izolującego materiału 6 w postaci SiO_2 o grubości 200 nm. Następnie wykonuje się procedurę mycia z udziałem ultradźwięków, dzięki której usuwa się fotorezyst wraz z izolacją znajdującą się na nim, pozostawiając odkryty fragment warstwy podkontaktowej o długości 900 μm na szczycie grzbietu 5. Następnie przeprowadza się kolejną fotolitografię definiującą okna w obrębie oraz dookoła obszaru niez izolowanego, a następnie osadza się warstwę złota (Au) 8 o grubości 200 nm będącą kontaktem elektrycznym od strony warstwy o przewodnictwie elektrycznym typu p 7 i przeprowadza się kolejną procedurę mycia usuwającą fotorezyst oraz fragmenty warstwy Au 8, które osadza się na fotorezyście. Następnie wykonuje się kolejny proces fotolitografii definiujący okna o mniejszej długości, a większej szerokości niż istniejące warstwy Au 8, a następnie osadza się kolejną warstwę Au 8 o grubości 500 nm. Po kolejnym procesie mycia pozostawia się prostokątne warstwy z Au 8 o szerokości 200 μm i długości 800 μm , pozwalające na późniejsze wykonanie połączenia elektrycznego przy pomocy drutów (metoda kulka-klin). Następnie przeprowadza się kolejny proces fotolitografii przy pomocy negatywowego fotorezystu o grubości 5 urn, tak, aby zdefiniować pozycję zwierciadeł lasera 9 oraz okna wejściowego światłowodu 10. Szerokość szczeliny 11 wybiera się w oparciu o wzór (III) i przyjmuje się wartość 1,8 μm . Następnie cały „kryształ” poddaje się procesowi trawienia przy pomocy aktywnych jonów Ar oraz Cl na głębokość 4 μm i usuwa się materiał poza laserem 1 oraz światłowodem 2, jednocześnie tworząc szczelinę 11 pomiędzy laserem 1 i światłowodem 2. Na koniec osadza się warstwę Au 8 o grubości 500 nm na spodniej stronie próbki tworząc tym samym kontakt elektryczny do typu n.

Następnie montuje się układ lasera 1 i światłowodu 2 w miedzianej obudowie przy pomocy cienkiej warstwy lutowni SnPb (cyna-ołów). Proces wygrzewania w temperaturze 200°C prowadzi się w celu trwałego połączenia układu lasera 1 i światłowodu 2 z podstawką. Następnie przy użyciu metody kulka-klin wytwarza się kontakt elektryczny z materiałem kontaktu górnego.

Przykład 2

Przykładem realizacji niniejszego wynalazku jest układ lasera 1 i światłowodu 2, przy czym zwierciadła lasera 9 oraz okno wejściowe światłowodu 10 pokryte są warstwami zmieniającymi ich współczynnik odbicia. Układ lasera 1 i światłowodu 2 wytwarza się analogicznie jak w przykładzie 1, przy czym po zakończeniu wytwarzania zwierciadeł 9 lasera 1, okna światłowodu 10 i szczeliny 11, wykonuje się proces fotolitograficzny zasłaniający większość powierzchni lasera 1, a odsłaniający jedynie zwierciadło 9 od strony okna wejściowego światłowodu 10. Następnie prowadzi się proces osadzania war-

stwy dielektrycznej z SiO_2 o grubości 85 nm obniżający współczynnik odbicia tego zwierciadła 9. Następnie usuwa się fotorezyst i wykonuje się kolejny proces fotolitografii odsłaniający jedynie zwierciadło 9 dalsze od okna światłowodu 10. Następnie osadza się dielektryczną wielowarstwę typu zwierciadła Bragga zwiększającą współczynnik odbicia tylnego zwierciadła 9 lasera 1. Stosuje się 5 powtórzeń naprzemiennego osadzania dwuwarstwy SiO_2 oraz Ta_2O_5 o grubościach odpowiednio 65 nm i 29 nm. Następnie usuwa się fotorezyst i wykonuje się kolejny proces fotolitografii odsłaniający jedynie okno światłowodu 10. Następnie prowadzi się proces osadzania warstwy dielektrycznej z SiO_2 o grubości 81 nm obniżający współczynnik odbicia tego zwierciadła 9 do wartości poniżej 1%. Po osadzeniu tych warstw, kontynuuje się montaż układu lasera 1 i światłowodu 2 analogicznie jak w przykładzie 1.

Przykład 3

Kolejnym przykładem realizacji niniejszego wynalazku jest układ lasera 1 i światłowodu 2, przy czym światłowód 2 posiada zagięty kształt umożliwiający zmianę kierunku propagacji światła emitowanego przez laser 1. Układ lasera 1 i światłowodu 2 wytwarza się analogicznie jak w przykładzie 1, przy czym obszar o zwiększonej dezorientacji 4 oraz grzbiet 5 w obszarze światłowodu 2 posiada zagięty kształt. W pobliżu lasera 1 zarówno obszar o zwiększonej dezorientacji 4 jak i grzbiet 5 są rozmieszczone równolegle do dłuższej osi lasera 1. W odległości 500 μm od zwierciadła 9 lasera 1 zginają się zgodnie z tukiem o promieniu 600 μm osiągając zmianę kierunku o 30° względem początkowego kierunku światłowodu 2. W dalszej części obszar o zwiększonej dezorientacji 4 oraz grzbiet 5 utrzymują stały kierunek na odległości 600 μm .

Przykład 4

Kolejnym przykładem realizacji niniejszego wynalazku jest układ trzech laserów 1 sprzęgniętych do tego samego światłowodu 2, przy czym światłowód 2 posiada osobne odnogi dla każdego lasera 1, które połączone są ze sobą prowadząc do wspólnego zakończenia światłowodu 2. Układ laserów 1 i światłowodu 2 wytwarza się analogicznie jak w przykładzie 1 i/ albo 2, przy czym podczas każdego z kroków produkcyjnych wytwarza się jednocześnie trzy lasery 1, a światłowód 2 posiada kształt pozwalający na zbieranie światła z wszystkich trzech laserów 1. Pojedyncze odnogi światłowodu 2 prowadzące światło z poszczególnych laserów 1 połączone są przy pomocy łuków w obszarze o zwiększonej dezorientacji 4 oraz grzbiecie 5 o promieniu 600 μm .

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wytwarzania układu lasera i światłowodu obejmujący następujące etapy:
 - a) wytwarza się objętościowe podłoże z azotku galu, po czym na podłożu z azotku galu definiuje się obszary o zwiększonej dezorientacji względem otoczenia,
 - b) nanosi się dolną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu n,
 - c) nanosi się dolną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu n,
 - d) nanosi się warstwę emitującą światło złożoną z jedno- lub wielostudni kwantowej ze związku o wzorze $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$,
 - e) nanosi się górną niedomieszkowaną warstwę światłowodu,
 - f) nanosi się warstwę blokującą elektrony o przewodnictwie elektrycznym typu p,
 - g) nanosi się górną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu p,
 - h) nanosi się górną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu p,
 - i) nanosi się warstwę podkontaktową o przewodnictwie elektrycznym typu p,
 - j) wytwarza się strukturę przestrzenną światłowodu o kształcie grzbietu,
 - k) wytwarza się szczelinę separującą laser i światłowód tworzącą jedno ze zwierciadeł lasera, **znamienny tym**, że światłowód wytwarza się z tych samych warstw co strukturę lasera, zaś studnie kwantowe w obszarze światłowodu, posiadają co najmniej o 3,5% molowych mniej indu w porównaniu z obszarem lasera, a absorpcja optyczna światła lasera w światłowodzie jest mniejsza niż 12 cm^{-1} .
2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że profil dezorientacji podłoża z azotku galu w obszarze szczeliny, pomiędzy zwierciadłem lasera a oknem wejściowym światłowodu określony jest wzorem:

$$\delta_{lok}(x) = \delta_1 + \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \text{Exp}\left(\frac{a_d(x-d)}{d}\right)}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera,

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu,

d – oznacza szerokość szczeliny,

x – oznacza współrzędną przestrzenną w szczelinie pomiędzy laserem a światłowodem,

a_d – oznacza stałą określającą profil zmian należącą do zakresu od 3 do 7.

3. Sposób według dowolnego z zastrz. 1–2, **znamienny tym**, że dezorientacja podłoża z azotku galu w obszarze światłowodu jest większa od bazowej dezorientacji podłoża z azotku galu i określona jest wzorem:

$$\delta_2 > \frac{a_1 \delta_1 + 0.05a_2 - 20}{0.43a_1}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera,

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu,

a_1 i a_2 – oznaczają parametry zależne od warunków wzrostu warstw i opisujące przybliżenie liniowe zależności długości fali emisji struktury od kąta dezorientacji δ_1 .

4. Sposób według dowolnego z zastrz. 1–2, **znamienny tym**, że szerokość szczeliny pomiędzy zwierciadłem lasera a oknem wejściowym światłowodu określona jest wzorem:

$$d < (1.5w_m - 0.5w_l) / \text{Tan}\left(\frac{2\lambda}{\pi w_l}\right)$$

gdzie,

d – oznacza szerokość szczeliny,

w_l i w_m – oznaczają odpowiednio szerokość modu optycznego w kierunku transwersalnym w obszarze lasera i obszarze światłowodu,

λ – oznacza długość fali emisji lasera.

5. Sposób według dowolnego z zastrz. 1–2, 4, **znamienny tym**, że ściany szczeliny od strony lasera pokrywa się warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła w zakresie 0,1–100%.
6. Sposób według dowolnego z zastrz. 1–2, 4, **znamienny tym**, że ściany szczeliny od strony światłowodu pokrywa się warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła poniżej 1%.
7. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wytwarza się światłowód o zagiętym kształcie.
8. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że na podłożu z azotku galu wytwarza się układ obejmujący co najmniej dwa lasery ze światłowodami, przy czym światłowody te połączone są w jeden główny światłowód.
9. Układ lasera i światłowodu zawierający kolejno strukturyzowane, objętościowe podłoże z azotku galu, na którym zdefiniowane są obszary o zwiększonej dezorientacji względem otoczenia, dolną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu n, dolną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu n, warstwę emitującą światło złożoną z jedno- lub wielostudni kwantowej ze związku o wzorze $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, górną niedomieszkowaną warstwę światłowodu, warstwę blokującą elektrony o przewodnictwie elektrycznym typu p, górną warstwę światłowodu o przewodnictwie elektrycznym typu p, górną warstwę okładkową o przewodnictwie elektrycznym typu p, warstwę podkontaktową o przewodnictwie elektrycznym typu p, strukturę przestrzenną światłowodu o kształcie grzbietu, szczelinę separującą laser i światłowód tworzącą jedno ze zwierciadeł lasera, **znamienny tym**, że światłowód (2) zawiera

te same warstwy co struktura lasera (1), przy czym studnie kwantowe w obszarze światłowodu (2), posiadają co najmniej o 3,5% molowych mniej indu w porównaniu z obszarem lasera (1), a absorpcja optyczna światła lasera (1) w światłowodzie (2) jest mniejsza niż 12 cm^{-1} .

10. Układ według zastrz. 9, **znamienny tym**, że profil dezorientacji podłoża z azotku galu (3) w obszarze szczeliny (11), pomiędzy zwierciadłem (9) lasera (1) a oknem wejściowym światłowodu (10) określony jest wzorem:

$$\delta_{lok}(x) = \delta_1 + \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \text{Exp}\left(\frac{a_d(x-d)}{d}\right)}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera (1),

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu (2),

d – oznacza szerokość szczeliny (11),

x – oznacza współrzędną przestrzenną w szczelinie (11) pomiędzy laserem (1) a światłowodem (2),

a_d – oznacza stałą określającą profil zmian należąca do zakresu od 3 do 7.

11. Układ według dowolnego z zastrz. 9–10, **znamienny tym**, że dezorientacja podłoża z azotku galu (3) w obszarze światłowodu (2) jest większa od bazowej dezorientacji podłoża z azotku galu (3) i określona jest wzorem:

$$\delta_2 > \frac{a_1 \delta_1 + 0.05a_2 - 20}{0.43a_1}$$

gdzie,

δ_1 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze lasera (1),

δ_2 – oznacza wartość kąta dezorientacji podłoża występująca w obszarze światłowodu (2),

a_1 i a_2 – oznaczają parametry zależne od warunków wzrostu warstw i opisujące przybliżenie liniowe zależności długości fali emisji struktury od kąta dezorientacji δ_1 .

12. Układ według dowolnego z zastrz. 9–10, **znamienny tym**, że szerokość szczeliny (11) pomiędzy zwierciadłem (9) lasera (1) a oknem wejściowym światłowodu (10) określona jest wzorem:

$$d < (1.5w_m - 0.5w_l) / \text{Tan}\left(\frac{2\lambda}{\pi w_l}\right)$$

gdzie,

d – oznacza szerokość szczeliny (11),

w_l i w_m – oznaczają odpowiednio szerokość modu optycznego w kierunku transwersalnym w obszarze lasera (1) i obszarze światłowodu (2),

λ – oznacza długość fali emisji lasera (1).

13. Układ według dowolnego z zastrz. 9–10, 12, **znamienny tym**, że ściany szczeliny (11) od strony lasera (1) pokryte są warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła w zakresie 0,1–100%.
14. Układ według dowolnego z zastrz. 9–10, 12, **znamienny tym**, że ściany szczeliny (11) od strony światłowodu (2) pokryte są warstwami optycznymi o wartościach współczynnika odbicia światła poniżej 1%.
15. Układ według zastrz. 9, **znamienny tym**, że światłowód (2) posiada zagięty kształt.
16. Układ według zastrz. 9, **znamienny tym**, że na podłożu z azotku galu (3) rozmieszczone są co najmniej dwa lasery (1) ze światłowodami (2), przy czym światłowody (2) te połączone są w jeden główny światłowód (2).

Rysunki

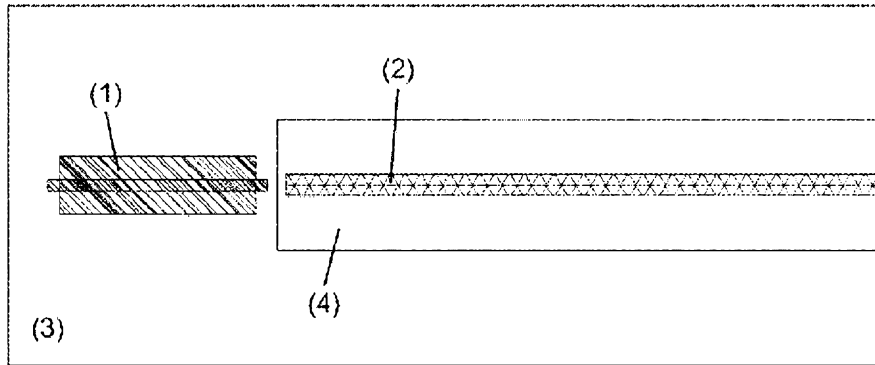


Fig. 1

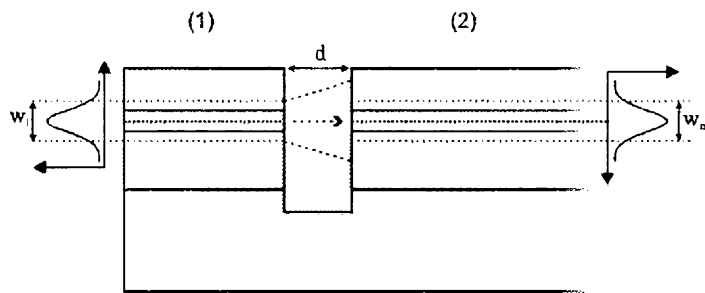


Fig. 2

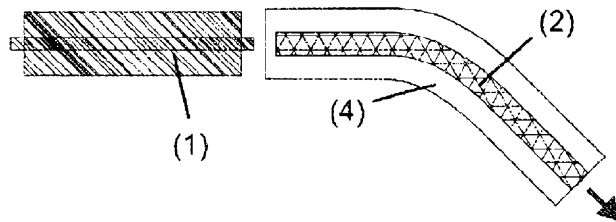


Fig. 3

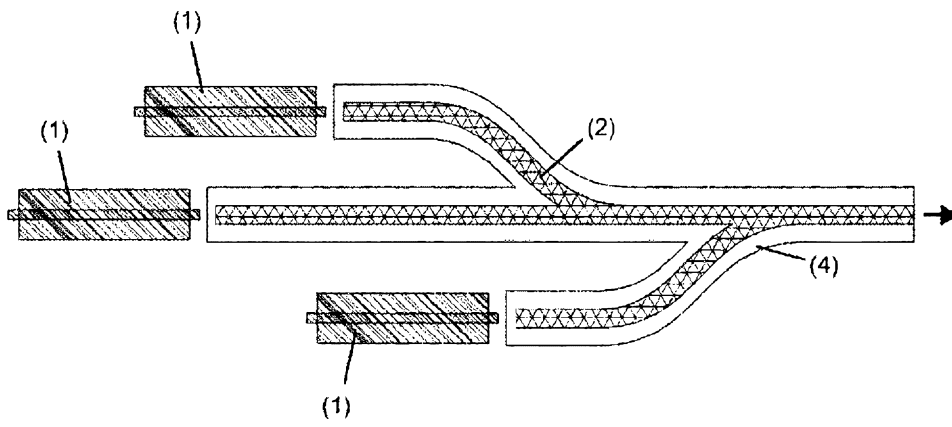


Fig. 4

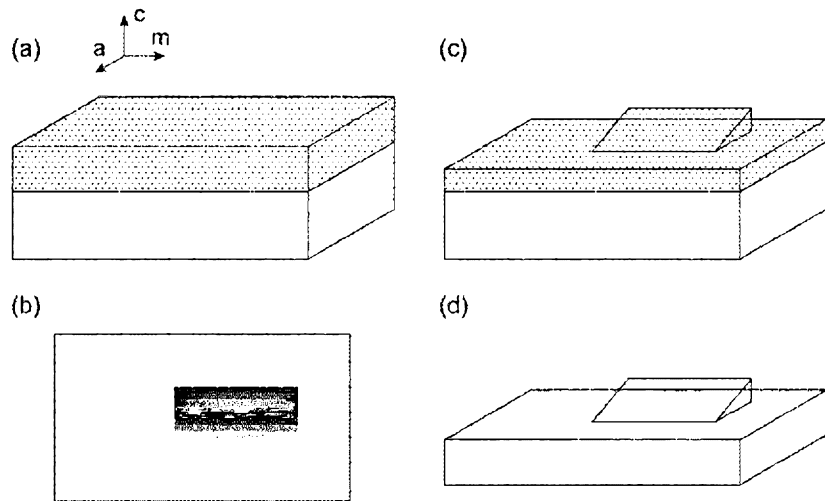


Fig. 5

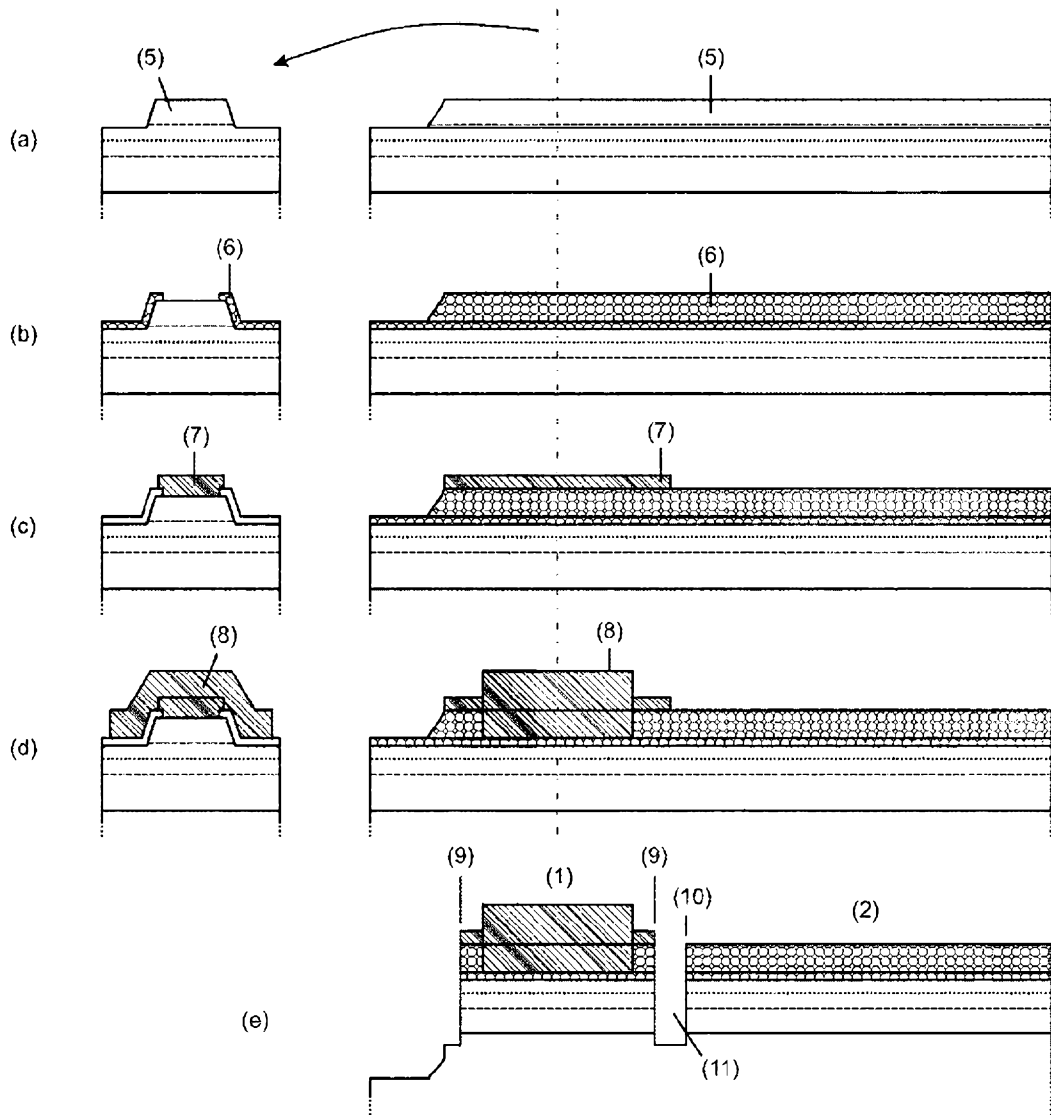


Fig. 6