

(19)



URZĄD  
PATENTOWY  
RZECZYPOSPOLITEJ  
POLSKIEJ

(10) **PL 242315 B1**

(12)

## Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **424904**

(22) Data zgłoszenia: **2018.03.15**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2019.09.23 BUP 20/2019**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2023.02.13 WUP 07/2023**

(51) MKP:

**H01L 21/02** (2006.01)

**H01L 31/0232** (2014.01)

**H01L 31/0248** (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**INSTYTUT NISKICH TEMPERATUR I BADAŃ  
STRUKTURALNYCH IM. WŁODZIMIERZA  
TRZEBIATOWSKIEGO POLSKIEJ AKADEMII  
NAUK, Wrocław, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**MIKOŁAJ ŁUKASZEWICZ, Głogów, PL  
BARTŁOMIEJ CICHY, Mirków, PL  
WIESŁAW STRĘK, Bielany Wrocławskie, PL**

(74) Pełnomocnik:

**Joanna Janoszek, Warszawa, PL**

(54) Tytuł:

**Układ fototranzystora**

**PL 242315 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ fototranzystora mający zastosowanie w układach elektronicznych do wzmacniania i/lub przełączania sygnałów elektrycznych w szerokim zakresie częstotliwości.

Znany jest z opisów literaturowych i aplikacji sposób wytwarzania i zastosowania półprzewodnikowych tranzystorów oraz fototranzystorów posiadających zdolność wzmacniania i/lub przełączania sygnałów elektrycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Rozwiązania te obejmują m.in. tranzystor bipolarny: p-n-p, n-p-n, unipolarny złączowy JFET, unipolarny z izolowaną bramką MOSFET oraz ich modyfikacje, tj. tranzystory jedno-złączowe oraz tranzystory IGBT.

W tranzystorach bipolarnych prąd elektryczny przepływa przez złącza półprzewodnikowe charakteryzujące się różnym typem domieszkowania tj. typem n oraz typem p. Tranzystor bipolarny zbudowany jest z trzech warstw półprzewodnika tworzących dwa złącza n-p-n oraz p-n-p nazwane odpowiednio emiter (E), baza (B), kolektor (C). Cechą charakterystyczną tranzystorów bipolarnych jest fakt, iż niewielki prąd płynący przez złącze baza-emiter steruje znacznie większym prądem płynącym między emiterym i kolektorem.

W tranzystorach unipolarnych prąd elektryczny płynie między elektrodami źródła (S) i drenu (D) połączonymi tylko jednym typem półprzewodnika charakteryzującym się wybranym typem przewodnictwa (tj. n lub p). Sterowanie prądu płynącego w kanale między elektrodą S i D odbywa się za pośrednictwem trzeciej elektrody zwanej bazą (B). W przypadku tranzystorów unipolarnych złączowych elektroda ta wytworzona jest w postaci złącza p-n między elektrodą bramki a kanałem, którym płynie prąd. Odpowiednia polaryzacja elektrody bramki względem kanału pozwala modulować wartość prądu płynącego w kanale. W przypadku tranzystorów unipolarnych z izolowaną bramką elektroda bramki wytworzona jest w formie metalowej elektrody oddzielonej od kanału poprzez cienką warstwę dielektryka. Odpowiednia polaryzacja bramki pozwala wytworzyć w obszarze kanału odpowiednio wysokie natężenie pola elektrycznego modulującego przepływ prądu między elektrodami źródła i drenu.

Szczególnym przypadkiem tranzystora polowego jest fototranzystor, w którym sterowanie prądem płynącym w kanale odbywa się za pośrednictwem światła padającego na elektrodę bramki. W takim urządzeniu prąd jest funkcją gęstości mocy wzbudzenia optycznego.

W przypadku fototranzystorów składających się z jednego materiału (homostруктуры), wartość wzmocnienia zawiera się w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset razy. Znane są także fototranzystory z zastosowaniem kilku różnych materiałów (heterostруктуры), osiągających wzmocnienie rzędu  $10^4$ , są one jednak bardzo kosztowne w produkcji, co jest ich fundamentalną wadą. Co więcej, nawet w przypadku homostруктур koszty produkcji są wysokie ze względu na ceny materiałów półprzewodnikowych, w szczególności koszty wytworzenia materiałów w postaci monokryształów o wysokiej jakości. Kolejną wadą fototranzystorów półprzewodnikowych są ich rozmiary, większe niż w przypadku tranzystorów polowych ze względu na potrzebę oświetlenia stosunkowo dużej powierzchni materiału optycznie aktywnego. W porównaniu z izolatorami, półprzewodniki mają niższą wytrzymałość elektryczną (niższą wartość pola elektrycznego, powyżej której następuje przebicie) i wyższą przewodność w warunkach bez oświetlenia, przekładającą się na wyższy prąd ciemny (prąd płynący w układzie bez wzbudzenia optycznego, będący podstawą do oszacowania wydajności fototranzystora).

W amerykańskim zgłoszeniu patentowym US2005269564 (A1) ujawniono tranzystor połowy na bazie materiału polimerowego, fotoczuły na padające światło, który zapewnia poprawę charakterystyk tranzystora i sterowanie parametrami stanu tranzystora. Tranzystor zawiera strukturę metal-izolator-półprzewodnik, z warstwami izolującymi i półprzewodnikowymi wykonanymi z materiałów polimerowych. Fotoprzewodzący polimer półprzewodnikowy tworzy warstwę transportującą ładunek pomiędzy źródłem a drenem. Tranzystor wykazuje dużą fotoczułość objawiającą się znaczącymi zmianami w prądzie źródło-dren, o współczynnik z zakresu 100–1000, nawet w przypadku niskich poziomów natężenia padającego światła, takich jak około 1 mlux. Celem poprawy fotoczułości tranzystora, warstwa polimeru półprzewodzącego zawiera akceptory elektronowe wprowadzone w matrycę polimerową, pozwalające na zwiększenie transportu fotoindukowanych elektronów.

Przedmiotem amerykańskiego zgłoszenia US2015131685 (A1) jest urządzenie optoelektroniczne do przetwarzania impulsów optycznych i elektrycznych zawierające urządzenie fotoprzewodzące z obszarem czujnikowym, który wykonany jest z materiału posiadającego pasmo zabronione, na przykład krzemionki i który ma elektryczne kontakty, na przykład wykonane ze złota oraz urządzenie przetwarzające sygnały, połączone z kontaktami elektrycznymi. Urządzenie fotoprzewodzące wytwarza fotoprąd

między kontaktami elektrycznymi w odpowiedzi na napromieniowanie ultrakrótkimi impulsami laserowymi o energii mniejszej niż energia pasma zabronionego materiału, z którego wykonany jest obszar czujnikowy, przy czym fotoprąd ma niezerowy komponent pola elektrycznego zorientowany równoległe do linii pomiędzy kontaktami elektrycznymi i powoduje przesunięcie nośnika ładunku w materiale z pasmem zabronionym. Urządzenie przetwarzające sygnały wyprowadza sygnał elektryczny stanowiący charakterystykę dla co najmniej jednego z parametrów CE phase (ang. carrier-envelope phase), intensywności, właściwości chwilowych, intensywności spektralnej i fazy spektralnej impulsów lasera.

W amerykańskim patencie US9368667 (B1) ujawniono tranzystor połowy zawierający trzy warstwy materiałowe, przy czym trzecia warstwa materiałowa obejmuje podłoże krzemowe o przewodnictwie typu n oraz elektrodę bramki. Elektroda bramki zawiera podłoże izolujące z co najmniej jednym przewodzącym metalem. Na pierwszej warstwie materiałowej rozmieszczona jest elektroda źródła, a pierwsza warstwa materiałowa rozmieszczona jest na drugiej warstwie materiałowej. Z kolei na aktywnym kanale FET rozmieszczonych jest wiele nanostruktur złota, które są odizolowane elektrycznie od elektrody źródła, elektrody drenu i elektrody bramki. Padające światło (fotony) jest absorbowane przez nanostruktury złota, powodując generację gorących elektronów, które pokonując barierę Schottky'ego przemieszczają się do pierwszej warstwy materiałowej, powodując zwiększenie prądu związanego z dryfem (prądu drenu), tzn. plazmony indukują gorące elektrony mające udział w prądzie dryfu tranzystora FET.

Przedmiotem amerykańskiego patentu US9748735 (B2) jest tranzystor LET (ang. light-effect transistor), zawierający strukturę metal-półprzewodnik-metal, gdzie jedno złącze metal-półprzewodnik pełni rolę kontaktu S, a drugie złącze metal-półprzewodnik pełni rolę kontaktu D. Kontakty S i D oddzielone są kanałem półprzewodnikowym. Kanał półprzewodnikowy stanowi nanostrukturę, taką jak nanodrut wykonany z CdSe. W trakcie pracy tranzystora LET, wiązka optyczna kierowana jest na kanał półprzewodnikowy w celu modulowania przewodności pomiędzy kontaktami S i D, dzięki czemu tranzystor LET realizuje bramkowanie optyczne, poprzez absorpcję padającego światła powodującą generowanie nośników prądu, co kontrastuje ze sterowaniem elektrostatycznym FET poprzez przyłożone napięcie.

W publikacji naukowej L. Marciniak, R. Tomala, M. Stefański, D. Hreniak, W. Strek, Laser induced broad band anti-Stokes white emission from LiYbF<sub>4</sub> nanocrystals, Journal of Rare Earths, Volume 34, Issue 3, 2016 ujawniono właściwości spektroskopowe nanokryształów LiYbF<sub>4</sub> wywołane przez oświetlanie promieniowaniem NIR o dużej gęstości w warunkach próżni. W takich warunkach eksperymentu zaobserwowano szerokopasmową emisję promieniowania elektromagnetycznego z nanokryształów LiYbF<sub>4</sub> pokrywającą całą część widzialną spektrum. Intensywność tego promieniowania była silnie skorelowana z mocą pobudzenia, długością fali pobudzenia oraz ciśnieniem otoczenia. Co więcej, zaobserwowano ponadto silny fotoindukowany prąd z cząstek LiYbF<sub>4</sub>.

Z kolei w publikacji naukowej W. Strek, L. Marciniak, A. Bednarkiewicz, A. Lukowiak, R. Wiglusz, and D. Hreniak, White emission of lithium ytterbium tetraphosphate nanocrystals, Opt. Express 19, 14083–14092, 2011 przedstawiono badania naukowe, w których ujawniona została indukowana IR antistokeowska biała emisja z proszku nanokrystalicznego LiYbP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> w atmosferze otoczenia. Co istotne sprawność emisji białego promieniowania elektromagnetycznego wzrosła w próżni o dwa rzędy wielkości. Stwierdzono, że proces ASWE jest krytycznie zależny od temperatury i zachodzi po przekroczeniu progu w temperaturze 510°C. Temperatura próbki emitującej białe promieniowanie elektromagnetyczne była stosunkowo niska 510–550°C i nie wzrastała liniowo wraz ze wzrostem mocy wzbudzenia. W przeprowadzonych eksperymentach zaobserwowano ponadto wydajne fotoprzewodnictwo, które było proporcjonalne do P<sup>4</sup>. Wyniki przedstawione w niniejszej pracy pokazują, że pochodzenie białej emisji nanokryształów LiYbP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> jest związane z emisją klastra Yb<sup>2+</sup> – CT. Emisja ta może być wykorzystana do pomiaru ciśnienia atmosferycznego i temperatury oraz pomiaru mocy diody laserowej. Ponadto wysoka wydajność elektrooptyczna procesu ASWE sugeruje możliwość jego zastosowania jako nowego źródła światła białego.

W publikacji naukowej C. Brandt, S.T. Fredrich-Thomton, K. Petermann, et al. Photoconductivity in Yb-doped oxides at high excitation densities. Appl. Phys. B 102, 765–768, 2011 przedstawiono badania naukowe, w których zaobserwowano fotoprzewodnictwo w dielektrycznych materiałach laserowych Yb<sup>3+</sup>:YAG oraz Yb<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w wyniku oświetlania promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali 940 nm. W takim układzie uzyskano fotoprąd przekraczający 100 nanoamperów. Ponadto w przytoczonej publikacji naukowej zasugerowano, że nieliniowa zależność od intensywności wskazuje na występowanie kooperatywnego mechanizmu konwersji z udziałem 2–3 wzbudzonych jonów Yb<sup>3+</sup>

w YAG i 2 wzbudzonych jonów  $\text{Yb}^{3+}$  w  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ . Zgodnie z wynikami omówiono dwa wstępne modele tego procesu konwersji.

Problemem technicznym stawianym przed niniejszym wynalazkiem jest zaproponowanie takiego układu fototranzystora, który będzie pozwalał na znaczne obniżenie kosztów wytwarzania, przy równoczesnym uzyskaniu dużej wartości wzmocnienia sygnału, nie mniejszej niż w klasycznych półprzewodnikowych fototranzystorach. Pożądane jest, by układ fototranzystora zapewniał zdolność przełączania sygnału elektrycznego w zakresie niskich i wysokich napięć. Ponadto, pożądane jest opracowanie układu fototranzystora o bardzo wysokiej odporności na przebicia, izolacji galwanicznej między elektrodami a kanałem oraz wysokiej ruchliwości nośników swobodnych i niskiej wartości prądu ciemnego. Istotne jest również, aby układ fototranzystora pozwalał na zmniejszenie jego wymiarów geometrycznych przy zachowaniu uniwersalności pracy. Pożądane jest również zapewnienie układu fototranzystora z nieliniową zależnością mocy sygnału elektrycznego od gęstości promieniowania padającego. Co więcej, korzystne jest również aby układ fototranzystora pozwalał na uzyskanie efektu fotowoltaicznego i generowanie prądu elektrycznego. Nieoczekiwanie, wspomniane problemy techniczne rozwiązał prezentowany wynalazek.

Przedmiotem wynalazku jest układ fototranzystora obejmujący warstwę materiału optycznie aktywnego i co najmniej dwie elektrody, od których odchodzą wyprowadzenia elektryczne, oraz układ wzbudzenia optycznego, zawierający źródło promieniowania elektromagnetycznego, emitujące wiązkę promieniowania elektromagnetycznego przechodzącą przez układ optyczny i padającą na powierzchnię materiału optycznie aktywnego w obszarze zasadniczo pomiędzy elektrodami, przy czym co najmniej struktura materiału optycznie aktywnego z elektrodami zamknięta jest w hermetycznej obudowie, charakteryzujący się tym, że materiał optycznie aktywny stanowi materiał w postaci proszku, dla którego wymiar ziaren znajduje się w skali nanometrycznej lub mikrometrycznej lub też w postaci ceramiki uzyskanej w wyniku prasowania tego proszku, przy czym materiał optycznie aktywny jest izolatorem elektrycznym lub półprzewodnikiem o dużej szerokości pasma wzbronionego, nie mniejszej niż 6 eV, takim jak krystaliczne matryce tlenkowe z grup: granaty  $\text{A}_3\text{B}_2(\text{XO}_4)_3$ , gdzie A oznacza Y, Gd, Lu, Mn, Ca, Mg, Fe, B oznacza Ga, Ge, Al, Sc, Cr, X oznacza Ga, Al, Ge, V, Fe, Si; spinele  $\text{AB}_2\text{O}_4$ , gdzie A i B oznaczają Mg, Zn, Fe, Mn, Al, Cr, Ti, Si, Sr; ceran strontu  $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$ , przy czym źródło promieniowania elektromagnetycznego emituje promieniowanie elektromagnetyczne w spektralnym zakresie od 300 nm do 2000 nm.

W korzystnej realizacji wynalazku krystalizacja w materiale optycznie aktywnym domieszkowane są jonami pierwiastków ziem rzadkich z grupy obejmującej: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Y, Sc, Lu, La, Y lub materiał optycznie aktywny zawiera w podstawowym składzie chemicznym pierwiastki ziem rzadkich z grupy obejmującej: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Y, Sc, Lu, La, Y.

W następnej korzystnej realizacji wynalazku materiał optycznie aktywny wytworzony jest przez sprasowanie w ciśnieniu z zakresu od 1 MPa do 10 GPa lub poprzez naniesienie na podłoże przewodzące metodą elektroforetycznego nanoszenia.

Korzystnie ciśnienie w hermetycznej obudowie utrzymywane jest na poziomie poniżej  $10^{-3}$  hPa.

Równie korzystnie hermetyczna obudowa wykonana jest z kwarcu, szkła kwarcowego, przezroczystego polimeru, szkła sodowego, szkła sodowo-potasowego lub szkła boro-krzemianowego.

Jeszcze korzystniej hermetyczna obudowa wykonana jest materiału nieprzezroczystego i zawiera transparentne okno wykonane z kwarcu, szkła kwarcowego, polimeru przezroczystego, szkła sodowego, szkła sodowo-potasowego lub szkła boro-krzemianowego dla wiązki promieniowania elektromagnetycznego emitowanego z źródła promieniowania elektromagnetycznego.

W korzystnej realizacji wynalazku źródło promieniowania elektromagnetycznego stanowi laser, diodę laserową, diodę elektroluminescencyjną i emituje promieniowanie elektromagnetycznego w spektralnym zakresie od 300 nm do 2000 nm, korzystnie w zakresie bliskiej podczerwieni.

W kolejnej korzystnej realizacji wynalazku układ optyczny stanowi soczewkę skupiającą lub obiektyw.

W następnej korzystnej realizacji wynalazku średnica plamki padającej wiązki elektromagnetycznej na powierzchni materiału optycznie aktywnego jest mniejsza niż 200  $\mu\text{m}$ .

Korzystnie do elektrod przyłożone jest napięcie z zakresu od -500 V do 500 V.

Równie korzystnie układ fototranzystora zawiera więcej niż jeden układ wzbudzenia optycznego, każdy zawierający źródło promieniowania elektromagnetycznego i układ optyczny, rozmieszczone

w taki sposób, że wiązka promieniowania elektromagnetycznego z każdego układu wzbudzenia optycznego oświetla inny obszar powierzchni materiału optycznie aktywnego pomiędzy elektrodami.

Jeszcze korzystniej struktura warstwy materiału optycznie aktywnego z elektrodami i/lub układ wzbudzenia optycznego umieszczony jest na układzie ruchomym, zapewniającym ruch w co najmniej jednym kierunku horyzontalnym, przy czym korzystnie układ ruchomy stanowi stolik mikrometryczny.

W korzystnej realizacji wynalazku warstwa materiału optycznie aktywnego ma grubość w zakresie od 30 nm do 500  $\mu\text{m}$ .

Układ fototranzystora według niniejszego wynalazku uzyskiwany jest w oparciu o mikro- i nanomateriały tworzące tzw. materiał optycznie aktywny i działa w oparciu o mechanizm foto-indukowania przypowierzchniowego ładunku elektrycznego na granicy faz, tj. materiał optycznie aktywny/próżnia, pełniący rolę kanału prądowego indukowanego w efekcie oddziaływania materiału optycznie aktywnego ze skupionym promieniowaniem elektromagnetycznym. Przypowierzchniowy ładunek elektryczny stanowi w niniejszym układzie fototranzystora odpowiednik kanału prądowego, w którym prąd może płynąć między elektrodami, a sterowanie przepływem prądu odbywa się poprzez zmianę intensywności wiązki promieniowania elektromagnetycznego.

Przedstawiony układ fototranzystora według niniejszego wynalazku zapewnia znaczne obniżenie kosztów wytwarzania fototranzystora, przy równoczesnym uzyskaniu urządzenia o wzmacnieniu sygnału nie mniejszym niż w przypadku półprzewodnikowych fototranzystorów na heterostrukturach i zdolności do przełączania sygnału elektrycznego w zakresie niskich i wysokich napięć. Co więcej przedmiotowy układ fototranzystora daje szerokie możliwości rozszerzenia jego zastosowania poprzez modyfikację poszczególnych parametrów na różnych etapach procesu wytwarzania materiału optycznie aktywnego lub poprzez wprowadzanie zmian w geometrii wewnętrznej samego urządzenia. Ponadto fototranzystor charakteryzuje się bardzo wysoką odpornością na przebicia, izolacją galwaniczną między bramką a kanałem oraz wysoką ruchliwością swobodnych nośników w próżni. Pozwala to zastosować ten element w pracy przy przełączaniu wysokich napięć oraz wysokich częstotliwości. Z kolei zastosowanie do wzbudzenia optycznego źródeł światła w zakresie bliskiej podczerwieni, w szczególności promieniowania laserowego o długości fali wynoszącej 975 nm, pozwala na użycie tanich i dobrze opracowanych źródeł laserowych, znanych z dziedziny telekomunikacji światłowodowej. Co więcej, ciepło generowane w związku z pochłanianiem promieniowania elektromagnetycznego przez materiał aktywny optycznie przyczynia się do zwiększenia wartości indukowanego ładunku przypowierzchniowego i wielokrotnienia maksymalnego prądu elektrycznego płynącego w kanale, a temperatura pracy urządzenia jest ograniczona jedynie wytrzymałością temperaturą zastosowanych w nim materiałów. Należy również podkreślić, że materiał aktywny wzbudzany optycznie cechuje się wysoką wytrzymałością temperaturową i nie ulega degradacji w zakresie wysokich gęstości optycznej wzbudzenia, co najmniej do 17 W/mm<sup>2</sup>. Natomiast w związku z małym obszarem wzbudzenia optycznego możliwe jest wytwarzanie urządzeń o rozmiarach mniejszych, niż w przypadku konwencjonalnych fototranzystorów opartych na materiałach półprzewodnikowych. Istotny jest również fakt, że materiał optycznie aktywny w postaci proszkowej, używany do wytwarzania nanokrystalicznych ceramiek, można otrzymywać w skali przemysłowej i nie wymaga wysoce zaawansowanych technik otrzymywania, a cena odczynników stosowanych w procesie wytwarzania jest znacznie niższa, niż w przypadku materiałów półprzewodnikowych. Należy ponadto zauważyć, że moc sygnału elektrycznego otrzymywanego na wyjściu przedmiotowego układu fototranzystora zależy w sposób nieliniowy od gęstości mocy promieniowania padającego, dzięki czemu możliwe jest silne wzmacnienie sygnału wyjściowego wraz ze wzrostem gęstości mocy optycznej oraz zapewniono dużą czułość urządzenia na zmianę wartości mocy źródła światła.

Z uwagi na fakt, że materiał optycznie aktywny jest izolatorem przy braku oświetlenia, skutkuje to niską wartością prądu ciemnego, bezpośrednio przekładającą się na zwiększenie wydajności układu fototranzystora. Ponadto, dla materiałów opartych na matrycy krystalicznej granatu aluminowo itrowego możliwe jest modyfikowanie stężenia domieszki w pełnym zakresie od 0 do 100%. Materiał optycznie aktywny wykazuje się ponadto wysoką wartością napięcia przebiciowego, zwłaszcza wynoszącą powyżej 500 V. Istotne jest również to, że dzięki przedmiotowemu układowi fototranzystora uzyskano wzmacnienie sygnału elektrycznego o dużej wartości zarówno w zakresie niskich, jak i wysokich wartości napięcia między elektrodami. Przy gęstości mocy wzbudzenia 17 W/mm<sup>2</sup> wzmacnienie sygnału elektrycznego w układzie fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji niniejszego wynalazku wynosi 10<sup>3</sup> dla napięcia 0,1 V i ponad 3\*10<sup>5</sup> dla napięcia 100 V dla materiału aktywnego w postaci nanokrystalicznego granatu aluminowo itrowego, co znacząco rozszerza możliwości zastosowania przedmiotowego wynalazku.

Dodatkowo, należy zauważyć, że przy prostej zmianie geometrycznego usytuowania elektrod i umieszczeniu materiału optycznie aktywnego w strukturze: dolna elektroda/materiał optycznie aktywny/szczelina próżniowa/górna elektroda, możliwe jest uzyskanie efektu fotowoltaicznego i generacja prądu elektrycznego.

Natomiast w kontekście sterowania układem fototranzystora, przy zmianie odległości plamki promieniowania padającego od elektrod, możliwe jest uzyskanie urządzenia o różnych właściwościach fotoelektrycznych, tj. dla plamki usytuowanej w równej odległości od obu elektrod uzyskuje się pełną symetrię charakterystyki prądowo-napięciowej, podczas gdy dla plamki usytuowanej możliwie blisko jednej z elektrod prąd przepływający w jednym kierunku jest znacznie większy od prądu mierzonego w kierunku przeciwnym, co dalej pozwala na rozszerzenie możliwości zastosowania niniejszego wynalazku.

Przykładowe realizacje wynalazku zaprezentowano na rysunku, na którym:

- fig. 1 przedstawia schemat układu fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji niniejszego wynalazku,
- fig. 2 przedstawia schemat układu fototranzystora według drugiego przykładu realizacji, nie stanowiącego niniejszego wynalazku,
- fig. 3 przedstawia schemat układu fototranzystora według trzeciego przykładu realizacji, nie stanowiącego niniejszego wynalazku,
- fig. 4 przedstawia schemat układu fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji niniejszego wynalazku w widoku z boku a) i w widoku z góry b), obrazujący sposób sterowania układem fototranzystora,
- fig. 5 przedstawia schemat układu fototranzystora według kolejnego przykładu realizacji niniejszego wynalazku,
- fig. 6 przedstawia w widoku z góry schematu układu fototranzystora według kolejnego przykładu realizacji niniejszego wynalazku, obrazujący sposób sterowania układem fototranzystora,
- fig. 7 przedstawia schemat układu fototranzystora według kolejnego przykładu realizacji niniejszego wynalazku w widoku z góry a) i w powiększonym widoku przekrojowym b),
- fig. 8 przedstawia wykres natężenia prądu na wyjściowej elektrodzie w funkcji gęstości mocy optycznej wiązki diody laserowej emitującej wiązkę o długości fali 975 nm dla układu fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji wynalazku,
- fig. 9 przedstawia wykres zależności prądu przepływającego między elektrodami od przyłożonego napięcia w zakresie napięć od -500 do 500 V, przy braku oświetlenia, dla układu fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji wynalazku,
- fig. 10 przedstawia wykres wzmocnienia prądu na elektrodzie wyjściowej w funkcji przyłożonego napięcia dla kolejnych wartości gęstości mocy wzbudzenia, dla układu fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji wynalazku,
- fig. 11 przedstawia wykresy ilustrujące wartości prądu indukowanego w układzie fototranzystora z fig. 3 w funkcji gęstości mocy wzbudzenia dla trzech wartości napięcia między elektrodami: 0 V (lewy wykres), 10 V (środkowy wykres) i 50 V (prawy wykres),
- fig. 12 przedstawia wykres prądu (wartość bezwzględna) w funkcji przyłożonego napięcia dla kolejnych wartości gęstości mocy wzbudzenia, gdzie plamka na powierzchni materiału optycznie aktywnego zlokalizowana jest blisko jednej z elektrod w układzie fototranzystora z fig. 1, natomiast
- fig. 13 przedstawia wykres prądu (wartość bezwzględna) w funkcji przyłożonego napięcia dla kolejnych wartości gęstości mocy wzbudzenia, gdzie plamka na powierzchni materiału optycznie aktywnego zlokalizowana jest w równej odległości od obu elektrod w układzie fototranzystora z fig. 1.

#### Przykład 1

Pierwszy przykład realizacji układu fototranzystora według niniejszego wynalazku został przedstawiony schematycznie na fig. 1. W ogólności układ fototranzystora zawiera warstwę materiału optycznie aktywnego 3 z naniesionymi elektrodami 4 i 5, do których przyłączone są odpowiednio wyprowadzenia elektryczne. Materiał optycznie aktywny 3 stanowi dielektryczny materiał nanokrystaliczny w postaci proszku lub ceramiki lub cienkiej warstwy naniesionej na podłożu przewodzące. W prezentowanym przykładzie realizacji układu fototranzystora materiał optycznie aktywny 3 stanowi izolator elektryczny i ma strukturę nanokrystaliczną o rozmiarze krystalitów w zakresie 50–80 nm z granatu aluminiowo itrowego domieszkowanych jonami iterbu (lub w szczególnym przypadku, gdy stężenie domieszki wynosi

nominalnie 100%, granatu aluminiowo iterbowego) o szerokości przerwy wzbronionej 7,5 eV, otrzymanych metodą Pechini'ego przy temperaturze wypalania żywicy 900°C, następnie skonsolidowany materiał został wytworzony poprzez sprasowanie krystalicznego proszku w ciśnieniu 200 MPa. Uzyskano w ten sposób okrągłą pastylkę o średnicy 5 mm i grubości 1 mm.

Sposób wytworzenia materiału optycznie aktywnego 3 nie stanowi ograniczenia niniejszego wynalazku i w innych przykładach realizacji materiał optycznie aktywny 3 może być wytworzony z ceramiki lub krystalicznego proszku poprzez sprasowanie w ciśnieniu z zakresu od 1 MPa do 10 GPa lub też poprzez naniesienie na podłoże przewodzące metodą elektroforetycznego nanoszenia.

W innych przykładach realizacji materiał optycznie aktywny 3 może charakteryzować się strukturą nanokrystaliczną (krystality o rozmiarze ziaren od 1 do 1000 nm) lub mikrokryształiczną (krystality o rozmiarze ziaren od 1 do 1000  $\mu\text{m}$ ), przy czym krystality mogą być domieszkowane jonami pierwiastków ziem rzadkich z grupy obejmującej: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Y, Sc, Pm, Lu, La, Y. W alternatywnych realizacjach układu fototranzystora materiał optycznie aktywny 3 może zawierać wymienione wyżej pierwiastki ziem rzadkich w podstawowym składzie chemicznym bez domieszkowania. W jeszcze innym przykładzie realizacji materiał optycznie aktywny 3 może być izolatorem elektrycznym lub półprzewodnikiem o dużej szerokości pasma wzbronionego między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa tj. o szerokości pasma zabronionego nie mniejszej niż 6 eV.

Co więcej, materiał optycznie aktywny 3 wykazuje się wytrzymałością elektryczną wynoszącą nie mniej niż 500 kV/m, tj. przy odległości 1 mm między elektrodami wartość napięcia przebicia dla zastoso- wanego materiału optycznie aktywnego 3 wynosi 500V.

W przedstawionym układzie tranzystora, struktura materiału optycznie aktywnego 3 z naniesio- nymi elektrodami 4 i 5 zamknięta jest w hermetycznej obudowie 7, w której ciśnienie utrzymywane jest na poziomie poniżej  $10^{-3}$  hPa. Hermetyczna obudowa 7 wykonana jest z materiału przezroczystego, takiego jak szkło sodowe.

Należy jednak podkreślić, że materiał hermetycznej obudowy 7 nie jest ograniczony do szkła sodowego, a w innych realizacjach wynalazku możliwe jest wykonanie hermetycznej obudowy 7 z szkła kwarcowego, przezroczystego polimeru, kwarcu, szkła sodowo-potasowego, czy szkła boro-krzemiano-owego. W jeszcze innych przykładach realizacji możliwe jest wykonanie hermetycznej obudowy 7 z ma- teriałów nieprzezroczystych, z uwzględnieniem transparentnego okna wykonanego z materiału przezro- czystego, takiego jak kwarc, szkło kwarcowe, polimer przezroczysty, szkło sodowe, szkło sodowo-po- tasowe czy szkło boro-krzemianowe, rozmieszczonego w taki sposób, że możliwe jest oświetlanie po- wierzchni materiału optycznie aktywnego 3 z zewnętrznego źródła promieniowania elektromagnetycz- nego 1.

Układ fototranzystora zawiera ponadto źródło promieniowania elektromagnetycznego 1 stano- wiące półprzewodnikową diodę laserową emitującą wiązkę promieniowania elektromagnetycznego o długości fali 975 nm. Wiązka promieniowania elektromagnetycznego emitowana z źródła 1 skupiana jest za pośrednictwem układu optycznego 2 w postaci soczewki skupiającej, na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3, tworząc plamkę o średnicy 200  $\mu\text{m}$ .

Ponownie rodzaj źródła promieniowania elektromagnetycznego 1 nie stanowi w tym przypadku ograniczenia zakresu wynalazku i w innych realizacjach układu fototranzystora możliwe jest zastoso- wanie lasera, diody elektroluminescencyjnej lub innego źródła światła emitującego w spektralnym za- kresie od 300 nm do 2000 nm. Analogicznie układ optyczny 2 może być realizowany za pośrednictwem innych układów skupiających, przykładowo obiektywu, pod warunkiem, że wynikowa średnica plamki padającej wiązki elektromagnetycznej na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 jest mniejsza niż 300  $\mu\text{m}$ . W jeszcze innych realizacjach możliwe jest umieszczenie źródła promieniowania elektro- magnetycznego 1 wraz z układem optycznym 2 wewnątrz hermetycznej obudowy 7.

Efekt tranzystorowy w prezentowanym układzie fototranzystora uzyskiwany jest poprzez skupie- nie światła emitowanego ze źródła 1 przez soczewkę skupiającą 2 na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 w postaci ceramiki nanokrystalicznej przy polaryzacji elektrod 4 i 5 napięciem elektrycznym w zakresie 0 do 500 V. Oświetlenie materiału optycznie aktywnego 3 ponad wartość progową 7 W/mm<sup>2</sup> prowadzi do indukowania przypowierzchniowego ładunku elektrycznego 6 umożliwiającego przepływ prądu między elektrodami 4 i 5, przy czym przepływ prądu elektrycznego jest zgodny z kierunkiem przy- łożonego pola elektrycznego. Zmiana intensywności wiązki promieniowania elektromagnetycznego ma wpływ na wartość prądu między elektrodą 4 i 5.

Na fig. 8 przedstawiono wykres natężenia prądu na wyjściowej elektrodzie 5 w funkcji gęstości mocy optycznej promieniowania elektromagnetycznego diody laserowej 1 emitującej wiązkę o długości

fali 975 nm. Należy zauważyć, że w układzie fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji niniejszego wynalazku, uzyskano potężowy przyrost wartości prądu. Z kolei na fig. 9 przedstawiono wykres ilustrujący liniową zależność prądu przepływającego między elektrodami 4 i 5 od przyłożonego napięcia w zakresie napięć od -500 do 500 V, przy braku oświetlenia. Linią przerywaną zaznaczono regresję liniową. Wartości ujemne odpowiadają prądowi/napięciu w kierunku przeciwnym (w odniesieniu do elektrod 4 i 5), niż dla wartości dodatnich. Natomiast na fig. 10 przedstawiono wykres wzmocnienia prądu na elektrodzie wyjściowej 5 w funkcji przyłożonego napięcia dla kolejnych wartości gęstości mocy wzbudzenia z diody laserowej 1. Na wykresie z fig. 10 można zauważyć, że wzmocnienie sygnału elektrycznego jest wysokie zarówno w zakresie niskich, jak i wysokich wartości napięcia między elektrodami 3 i 4 i przy gęstości mocy wzbudzenia  $17 \text{ W/mm}^2$  wynosi ono  $10^3$  dla napięcia 0,1 V i ponad  $3 \cdot 10^5$  dla napięcia 100 V.

Układ fototranzystora według pierwszego przykładu realizacji niniejszego wynalazku pozwala na sterowanie charakterystykami prądowo-napięciowymi poprzez zmianę położenia plamki wiązki promieniowania elektromagnetycznego z źródła promieniowania elektromagnetycznego 1 na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 oraz poprzez zmianę intensywności wiązki promieniowania elektromagnetycznego. W szczególności zmianę położenia plamki wiązki promieniowania elektromagnetycznego na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 można realizować poprzez ruch translacyjny układu oświetlającego zawierającego źródło promieniowania elektromagnetycznego 1 i układ optyczny 2 przy nieruchomym materiale optycznie aktywnym 3 lub poprzez ruch translacyjny materiału optycznie aktywnego 3 przy nieruchomym układzie oświetlającym. Obydwa powyższe przypadki można zrealizować przy pomocy układu ruchomego, przykładowo stolika mikrometrycznego, zwłaszcza sterowanego komputerowo. Możliwości sterowania charakterystykami prądowo-napięciowymi układu fototranzystora według niniejszego wynalazku zobrazowano na wykresach przedstawionych na fig. 12 i 13.

Jak wynika z fig. 12, przedstawiającej wykres prądu (wartość bezwzględna) w funkcji przyłożonego napięcia dla kolejnych wartości gęstości mocy wzbudzenia, gdzie plamka na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 zlokalizowana jest blisko jednej z elektrod 5 (w odległości około  $200 \mu\text{m}$  od elektrody 5, co stanowi  $1/10$  odległości pomiędzy elektrodami 4 i 5), prąd przepływający w jednym kierunku jest znacznie większy od prądu mierzonego w kierunku przeciwnym. Z kolei jak wynika z fig. 13, przedstawiającej wykres prądu (wartość bezwzględna) w funkcji przyłożonego napięcia dla kolejnych wartości gęstości mocy wzbudzenia, gdzie plamka na powierzchni materiału optycznie aktywnego zlokalizowana jest w równej odległości od obu elektrod 4 i 5 uzyskano pełną symetrię charakterystyki prądowo-napięciowej.

Alternatywnie mierząc przepływ prądu między elektrodami 4 i 5 w dwóch kierunkach można określić położenie punktu padania wiązki elektromagnetycznej na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 na osi pomiędzy elektrodami 4 i 5.

#### Przykład 2

Drugi przykład realizacji układu fototranzystora, niestanowiący niniejszego wynalazku, został przedstawiony schematycznie na fig. 2. Drugi przykład realizacji układu fototranzystora zawiera analogiczną strukturę do pierwszego przykładu realizacji, tj. obejmuje warstwę materiału optycznie aktywnego 3 z naniesionymi elektrodami 4 i 5. W odróżnieniu od pierwszego przykładu realizacji, struktura materiału optycznie aktywnego 3 z naniesionymi elektrodami 4 i 5 osadzona jest na cienkiej warstwie przewodzącej 8, wykonanej z tlenku indowocynowego (ITO) o grubości 100 nm, przy czym jest ona lateralnie równoległa względem elektrod 4 i 5 znajdujących się na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 i znajduje się w kontakcie elektrycznym z materiałem optycznie aktywnym 3 od strony wertykalnie przeciwnej względem powierzchni materiału optycznie aktywnego 3. Rodzaj materiału warstwy przewodzącej 8 nie stanowi ograniczenia i w innych przykładach realizacji warstwa przewodząca 8 może być wykonana z tlenku fluorowocynowego (FTO), tlenku cynku, polimeru przewodzącego (np. PEDOT), siatki nanorurek węglowych, siatki metalicznych nanodrutów, monowarstwy lub wielowarstwy grafenu. Dodatkowo warstwa przewodząca 8 naniesiona jest na podłożu szklanym 10. Warstwa przewodząca 8 z podłożem szklanym rozciągają się horyzontalnie na odległość większą niż warstwa materiału optycznie aktywnego 3, tworząc strukturę stopniową z odsłoniętą częścią powierzchni górnej warstwy przewodzącej 8, na której naniesiona jest trzecia elektroda 9, obejmująca trzecie wyprowadzenie. Analogicznie do pierwszego przykładu realizacji, taka wielowarstwa zamknięta jest w hermetycznej obudowie 7 z utrzymywaniem ciśnienia wewnątrz poniżej  $10^{-3}$  hPa, a układ fototranzystora obejmuje ponadto źródło fali elektromagnetycznej 1 z układem optycznym 2.

Efekt tranzystorowy w prezentowanym układzie fototranzystora uzyskiwany jest poprzez skupienie światła emitowanego ze źródła 1 przez układ optyczny 2 na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 naniesionego na warstwę przewodzącą 8 na podłożu szklanym 10 przy jednoczesnym przyłożeniu napięcia między naniesionymi na powierzchnię materiału optycznie aktywnego 3 elektrodami 4 i 5, co prowadzi do generacji nośników w obszarze przypowierzchniowym 6 i wzmocnienia sygnału elektrycznego na elektrodzie 5. Sterując napięciem między lateralnie równoległą warstwą przewodzącą 8 (w połączeniu z elektrodą 9) a elektrodą 5, możliwa jest dodatkowa kontrola prądu przepływającego w układzie, gdzie większe napięcie w kierunku między elektrodą 9 i 5 prowadzi do zwiększenia prądu między elektrodami 4 i 5, a zwiększanie napięcia w kierunku przeciwnym, prowadzi do zmniejszenia prądu płynącego między elektrodami 4 i 5.

W tym przykładzie realizacji materiał optycznie aktywny 3 stanowi nanokrystaliczny ceran strontu ( $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$ ) domieszkowany w 20% jonami iterbu, o średnim rozmiarze ziarna 50 nm. Grubość warstwy materiału optycznie aktywnego 3 wynosi natomiast 50  $\mu\text{m}$ .

#### Przykład 3

Trzeci przykład realizacji układu fototranzystora, niestanowiący niniejszego wynalazku, został przedstawiony schematycznie na fig. 3. Ten przykład układu fototranzystora stanowi konfigurację pozwalającą na generację prądu w układzie pod wpływem wzbudzenia skupioną wiązką światła. Konstrukcja układu fototranzystora według trzeciego przykładu realizacji jest podobna do poprzednich przykładów realizacji. Istotę stanowi materiał optycznie aktywny 3, który w tym przykładzie realizacji przyjął postać warstwy ceranu strontu ( $\text{Sr}_2\text{CeO}_4$ ) domieszkowanego w 20% jonami neodymu o grubości 50  $\mu\text{m}$  i średnim rozmiarze krystalitów 50 nm.

Materiał optycznie aktywny 3 osadzony jest na warstwie przewodzącej 8 wykonanej z tlenku indowo-cynowego (ITO) o grubości 100 nm, lateralnie równoległej względem powierzchni górnej materiału optycznie aktywnego 3. Struktura materiału optycznie aktywnego 3 z pierwszą warstwą przewodzącą 8 naniesiona jest na pierwsze podłoże szklane 10. Analogicznie do drugiego przykładu realizacji układu fototranzystora, pierwsza warstwa przewodząca 8 z podłożem szklanym 10 rozciągają się horyzontalnie na odległość większą niż warstwa materiału optycznie aktywnego 3, tworząc strukturę stopniową z odsłoniętą częścią powierzchni górnej pierwszej warstwy przewodzącej 8, na której naniesiona jest elektroda 4. Układ fototranzystora według niniejszego przykładu realizacji zawiera ponadto drugą warstwę przewodzącą 11, wykonaną z ITO, o grubości 100 nm naniesioną na drugie podłoże szklane 12, przy czym struktura ta jest oddzielona od powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 szczeliną próżniową o grubości 100  $\mu\text{m}$ . Struktura drugiej warstwy przewodzącej 11 i drugiego podłoża szklanego 12 przesunięta jest horyzontalnie względem struktury materiału optycznie aktywny 3 – pierwsza warstwa przewodząca 8 – pierwsze podłoże szklane 10 w taki sposób, że przedłużenie horyzontalne struktury druga warstwa przewodząca 11 – drugie podłoże szklane 12 rozciąga się horyzontalnie poza strukturę z materiałem optycznie aktywnym 3, a na powierzchni drugiej warstwy przewodzącej 11 naniesiono elektrodę 5. Analogicznie do poprzednich przykładów realizacji taki układ fototranzystora zamknięty jest w hermetycznej obudowie 7 z utrzymywanym ciśnieniem wewnątrz poniżej  $10^{-3}$  hPa i obejmuje dodatkowo źródło fali elektromagnetycznej 1 z układem optycznym 2.

Dzięki przedstawionej strukturze w układzie fototranzystora, przy wzbudzeniu optycznym, na elektrodzie 5 oddzielonej elektrycznie od powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 wzbudzany jest prąd powstały w wyniku zaabsorbowania promieniowania przez materiał optycznie aktywny 3, co prowadzi do generacji ładunku przypowierzchniowego 6 (emisji elektronów), stanowiącego wolne nośniki wpływające na indukowanie prądu na elektrodzie 5 (anodzie).

Fig. 11 przedstawia wykresy ilustrujące wartości prądu indukowanego w układzie fototranzystora według trzeciego przykładu realizacji, w funkcji gęstości mocy wzbudzenia dla trzech wartości napięcia między elektrodami: 0 V (lewy wykres), 10 V (środkowy wykres) i 50 V (prawy wykres), co stanowi potwierdzenie uzyskania generacji prądu w układzie fototranzystora pod wpływem wzbudzenia skupioną wiązką światła.

#### Przykład 4

Kolejny przykład realizacji, niestanowiący niniejszego wynalazku, dotyczy sposobu sterowania układem fototranzystora. Przykład ten zobrazowano za pomocą fig. 4 a)-b). Na fig. 4 a) przedstawiono układ fototranzystora zbieżny z układem fototranzystora stanowiącym pierwszy przykład realizacji niniejszego wynalazku. W odróżnieniu od pierwszego przykładu realizacji układ fototranzystora przedstawiony na fig. 4a) zapewnia ruch translacyjny materiału optycznie aktywnego 3 i elektrod 4 i 5 względem źródła światła 1 i układu optycznego 2, przekładający się na zmianę odległości plamki oświetlenia od

elektrod 4 i 5, skutkującą zmianą stosunku między wielkościami prądu zmierzonymi w kierunku od elektrody 4 do 5 i w przeciwnym. Na fig. 4b) przedstawiono uproszczony schemat układu fototranzystora w rzucie z góry z zaznaczonymi wariantami określania odległości punktu plamki od elektrod 4 i 5, gdzie I i II oznaczają osie ruchu materiału optycznie aktywnego 3 i elektrod 4 i 5 względem źródła światła 1 i układu optycznego 2, A i B oznaczają przykładowe punkty padania wiązki na powierzchnię materiału optycznie aktywnego 3, X oznacza oś między dwiema elektrodami 4 i 5,  $x_A$  i  $x_B$  oznaczają współrzędne punktów A i B na osi X, natomiast  $r_1$  i  $r_2$  oznaczają odległości punktu B od elektrod, odpowiednio 4 i 5.

W przypadku, gdy punkt padania wiązki nie leży bezpośrednio na osi rozpiętej między elektrodami 4 i 5, obserwuje się zmniejszenie sumy zmierzonych natężeń. Rozważając oddalanie się punktu od osi X w kierunku prostopadłym do tej osi: punkt oddala się bardziej od obu elektrod 4 i 5, podczas gdy stosunek obu odległości pozostaje ten sam – obserwuje się zatem ogólne osłabienie efektu wzmocnienia sygnału elektrycznego, podczas gdy iloraz natężeń prądu mierzonych w obu kierunkach nie zmienia się. Oznacza to, że w przypadku ograniczenia punktów padania wiązki do osi X (punkt A na fig. 4b) wystarczy pomiar natężenia w jednym kierunku, gdy znana jest wartość prądu dla zmierzonego wcześniej jednego z charakterystycznych punktów na osi (równo w połowie lub maksymalnie blisko jednej z elektrod 4 lub 5) w ramach określania podstawowych charakterystyk układu fototranzystora. W przypadku oświetlenia punktu znajdującego się poza osią X (punkt B na fig. 4b), pełną informację o odległości punktu od elektrod 4 i 5 (w tym przypadku jako rzut odległości  $r_1$  i  $r_2$  na oś X) uzyskuje się poprzez pomiar prądu w obu kierunkach między elektrodami 4 i 5, gdzie iloraz między zmierzonymi natężeniami będzie proporcjonalny do ilorazu odległości punktu od odpowiednio elektrody 4 i 5, co pozwoli określić położenie punktu w osi. Tym sposobem możliwe jest także określenie położenia punktu leżącego na osi, w przypadku, gdy nie zmierzono wcześniej prądu w punktach charakterystycznych. Zmiana odległości wpływa na zmianę natężenia prądu mierzonego na obu elektrodach 4 i 5, co objawia się zmianą symetrii charakterystyki prądowo-napięciowej i zmianą stosunku między wartościami natężenia prądu zmierzonymi w obu kierunkach. W związku z tym, pomiar obu wartości pozwala na określenie położenia źródła światła 1 względem powierzchni fototranzystora (materiału optycznie aktywnego 3). Przykładowo, stwarza to możliwość zastosowania układu fototranzystora do obserwacji zmiany położenia obiektu, który znajduje się w mechanicznym kontakcie z źródłem światła 1 (oś ruchu I na fig. 4a) lub z hermetyczną obudową 7 (oś ruchu II na fig. 4a).

Równocześnie, możliwy jest proces odwrotny – kontrolowana zmiana położenia punktu padania wiązki światła pozwala na kontrolowaną zmianę parametrów działania układu fototranzystora. Przykładowo, skierowanie wiązki możliwie blisko elektrody 5 sprawia, że w kierunku 4–5 prąd ulegnie znacznemu wzmocnieniu, zaś w kierunku 5–4 będzie płynął prąd pomijalnie niski (bliski lub równy prądowi ciemnemu), co pozwala zastosować układ fototranzystora jako przełącznik sygnału. Skierowanie wiązki na punkt znajdujący się w równej odległości od obu elektrod 4 i 5 sprawi, że taka sama wartość prądu będzie zmierzona w obu kierunkach. Wnioski płynące z rozwiązania technicznego w tym przykładzie realizacji stosowalne są także do projektowania układu fototranzystora bez elementów ruchomych (przykłady 1 i 2), dla otrzymania urządzenia o pożądanym właściwościach.

#### Przykład 5

Kolejny przykład realizacji układu fototranzystora według niniejszego wynalazku został przedstawionych schematycznie na fig. 5. Konstrukcja układu fototranzystora z prezentowanego przykładu realizacji jest analogiczna do konstrukcji układu fototranzystora z pierwszego przykładu realizacji wynalazku, z tą różnicą, że zamiast jednego układu wzbudzenia (źródło fali elektromagnetycznej 1 i układ optyczny 2) zastosowano szereg źródeł wzbudzenia  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ , każdy obejmujący źródło fali elektromagnetycznej 1 i układ optyczny 2, przy czym każde źródło wzbudzenia  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  emituje wiązkę promieniowania elektromagnetycznego padającą na inny obszar powierzchni materiału optycznie aktywnego 3. Odnosząc się do przykładu 4, w opisywanym przykładzie realizacji układu fototranzystora zmiana położenia punktu padania wiązki na powierzchnię materiału optycznie aktywnego 3, zamiast poprzez ruch translacyjny układu wzbudzającego względem materiału optycznie aktywnego 3, osiągnięta jest poprzez zastosowanie więcej niż jednego źródła wzbudzenia. Korzystając z wniosków płynących z rozwiązania przedstawionego w przykładzie możliwe jest sterowanie sposobem działania fototranzystora w zależności od tego, które źródło wzbudzenia  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  zostanie włączone.

#### Przykład 6

Kolejny przykład realizacji układu fototranzystora według niniejszego wynalazku został przedstawionych schematycznie na fig. 6, która ilustruje w widoku z góry schemat układu fototranzystora z czterema elektrodami 4, 5, 13, 14 osadzonymi na powierzchni materiału optycznie aktywnego 3. Niniejszy

przykład realizacji jest analogiczny do przykładu 4 zobrazonego na fig. 4 a)–b), z tą różnicą, że oprócz jednej pary elektrod 4, 5 do powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 przyłączona jest dodatkowa para elektrod 13, 14, gdzie osie na których leżą dwie pary elektrod 4, 5, 13, 14 są względem siebie prostopadłe, a w takim układzie określone jest położenie punktu padania wiązki na materiał optycznie aktywny 3 w płaszczyźnie dwuwymiarowej. Poprzez dodanie kolejnej pary elektrod 13, 14 stwarza się możliwość wyznaczenia współrzędnych punktu padania wiązki w płaszczyźnie XY. Sposób wyznaczenia położenia punktu na osi x (między elektrodami 4 i 5) jest identyczny jak w przykładzie 4, analogicznie wyznacza się położenie punktu na osi y (między elektrodami 13 i 14). Korzystne pod względem dokładności pomiaru jest ograniczenie obszaru pomiaru (tym samym, kształtu materiału optycznie aktywnego 3) do kwadratu, w rogach którego znajdują się elektrody 4, 5, 13, 14 – pamiętając, że znaczne oddalenie się od wszystkich elektrod 4, 5, 13, 14 skutkuje zmniejszeniem odpowiedzi elektrycznej na wzbudzenie optyczne (jak zaznaczono w przykładzie 4). Możliwe jest jednak, kosztem dokładności pomiaru poza wspomnianym obszarem, zastosowanie próbki o innym kształcie. Możliwe jest także kolejne podwajanie liczby elektrod celem zwiększenia czułości pomiaru, jeżeli tylko uzyskany wzrost dokładności będzie uzasadniał zwiększenie kosztów wytwarzania.

#### Przykład 7

Następny przykład realizacji układu fototranzystora według niniejszego wynalazku został przedstawiony schematycznie na fig. 7 a)–b), która ilustruje schemat układu fototranzystora w widoku z góry a) i w powiększonym widoku przekrojowym b). W tym przykładzie realizacji ogólna budowa układu fototranzystora jest analogiczna do tej przedstawionej w pierwszym przykładzie realizacji. Różnicę stanowi struktura materiału optycznie aktywnego 3 i elektrod 4. W niniejszym przykładzie realizacji w materiale optycznie aktywnym 3 zastosowano macierzy elektrod 4 równo odległych od siebie w sieci kwadratowej. Na fig. 7b) widoczny jest przekrój poprzeczny fragmentu struktury pokazujący elektrody 4 przechodzące od oświetlanej powierzchni materiału optycznie aktywnego 3 na wylot, gdzie od spodu wyprowadzone są połączenia elektryczne. Niniejszy przykład realizacji stanowi rozwinięcie możliwości wynalazku analogicznie do przykładu 6, pozwalające na dokładny pomiar położenia punktu padania światła w obszarze znacznie większym, niż jest to możliwe w przypadku fototranzystora z użyciem jednej czy dwóch par elektrod. Wprowadzenie dużej liczby elektrod 4 wymagających wyprowadzenia licznych kontaktów od spodu układu fototranzystora zwiększa złożoność i koszt procesu produkcji, jednak stanowi rozwiązanie znacznie poszerzające możliwości zastosowania wynalazku.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Układ fototranzystora obejmujący warstwę materiału optycznie aktywnego (3) i co najmniej dwie elektrody (4, 5), od których odchodzą wyprowadzenia elektryczne, oraz układ wzbudzenia optycznego, zawierający źródło promieniowania elektromagnetycznego (1), emitujące wiązkę promieniowania elektromagnetycznego przechodzącą przez układ optyczny (2) i padającą na powierzchnię materiału optycznie aktywnego (3) w obszarze zasadniczo pomiędzy elektrodami (4, 5), przy czym co najmniej struktura materiału optycznie aktywnego (3) z elektrodami (4, 5) zamknięta jest w hermetycznej obudowie (7), **znamienny tym**, że materiał optycznie aktywny (3) stanowi materiał w postaci proszku, dla którego wymiar ziaren znajduje się w skali nanometrycznej lub mikrometrycznej lub też w postaci ceramiki uzyskanej w wyniku prasowania tego proszku, przy czym materiał optycznie aktywny (3) jest izolatorem elektrycznym lub półprzewodnikiem o dużej szerokości pasma wzbronionego, nie mniejszej niż 6 eV, takim jak krystaliczne matryce tlenkowe z grup: granaty  $A_3B_2(XO_4)_3$ , gdzie A oznacza Y, Gd, Lu, Mn, Ca, Mg, Fe, B oznacza Ga, Ge, Al, Sc, Cr, X oznacza Ga, Al, Ge, V, Fe, Si; spinele  $AB_2O_4$ , gdzie A i B oznaczają Mg, Zn, Fe, Mn, Al, Cr, Ti, Si, Sr; ceran strontu  $Sr_2CeO_4$ , przy czym źródło promieniowania elektromagnetycznego (1) emituje promieniowanie elektromagnetyczne w spektralnym zakresie od 300 nm do 2000 nm.
2. Układ fototranzystora według zastrz. 1, **znamienny tym**, że krystality w materiale optycznie aktywnym (3) domieszkowane są jonami pierwiastków ziem rzadkich z grupy obejmującej: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Y, Sc, Lu, La, Y lub materiał optycznie aktywny (3) zawiera w podstawowym składzie chemicznym pierwiastki ziem rzadkich z grupy obejmującej: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Y, Sc, Lu, La, Y.

3. Układ fototranzystora według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że materiał optycznie aktywny (3) wytworzony jest przez sprasowanie w ciśnieniu z zakresu od 1 MPa do 10 GPa lub poprzez naniesienie na podłoże przewodzące metodą elektroforetycznego nanoszenia.
4. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 3, **znamienny tym**, że ciśnienie w hermetycznej obudowie (7) utrzymywane jest na poziomie poniżej  $10^{-3}$  hPa.
5. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 4, **znamienny tym**, że hermetyczna obudowa (7) wykonana jest z kwarcu, szkła kwarcowego, przezroczystego polimeru, szkła sodowego, szkła sodowo-potasowego lub szkła boro-krzemianowego.
6. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 4, **znamienny tym**, że hermetyczna obudowa (7) wykonana jest materiału nieprzezroczystego i zawiera transparentne okno wykonane z kwarcu, szkła kwarcowego, polimeru przezroczystego, szkła sodowego, szkła sodowo-potasowego lub szkła boro-krzemianowego dla wiązki promieniowania elektromagnetycznego emitowanego z źródła promieniowania elektromagnetycznego (1).
7. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 6, **znamienny tym**, że źródło promieniowania elektromagnetycznego (1) stanowi laser, diodę laserową, diodę elektroluminescencyjną i emituje promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie bliskiej podczerwieni.
8. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 7, **znamienny tym**, że układ optyczny (2) stanowi soczewkę skupiającą lub obiektyw.
9. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 8, **znamienny tym**, że średnica plamki padającej wiązki elektromagnetycznej na powierzchni materiału optycznie aktywnego (3) jest mniejsza niż  $300 \mu\text{m}$ .
10. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 9, **znamienny tym**, że do elektrod (4, 5) przyłożone jest napięcie z zakresu od -500 V do 500 V.
11. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 10, **znamienny tym**, że zawiera więcej niż jeden układ wzbudzenia optycznego, każdy zawierający źródło promieniowania elektromagnetycznego (1) i układ optyczny (2), rozmieszczone w taki sposób, że wiązka promieniowania elektromagnetycznego z każdego układu wzbudzenia optycznego oświetla inny obszar powierzchni materiału optycznie aktywnego (3) pomiędzy elektrodami (4, 5).
12. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 11, **znamienny tym**, że struktura warstwy materiału optycznie aktywnego (3) z elektrodami (4, 5) i/lub układ wzbudzenia optycznego umieszczony jest na układzie ruchomym, zapewniającym ruch w co najmniej jednym kierunku horyzontalnym, przy czym korzystnie układ ruchomy stanowi stolik mikrometryczny.
13. Układ fototranzystora według któregośkolwiek z zastrz. 1 do 12, **znamienny tym**, że warstwa materiału optycznie aktywnego (3) ma grubość w zakresie od 30 nm do  $500 \mu\text{m}$ .

Rysunki

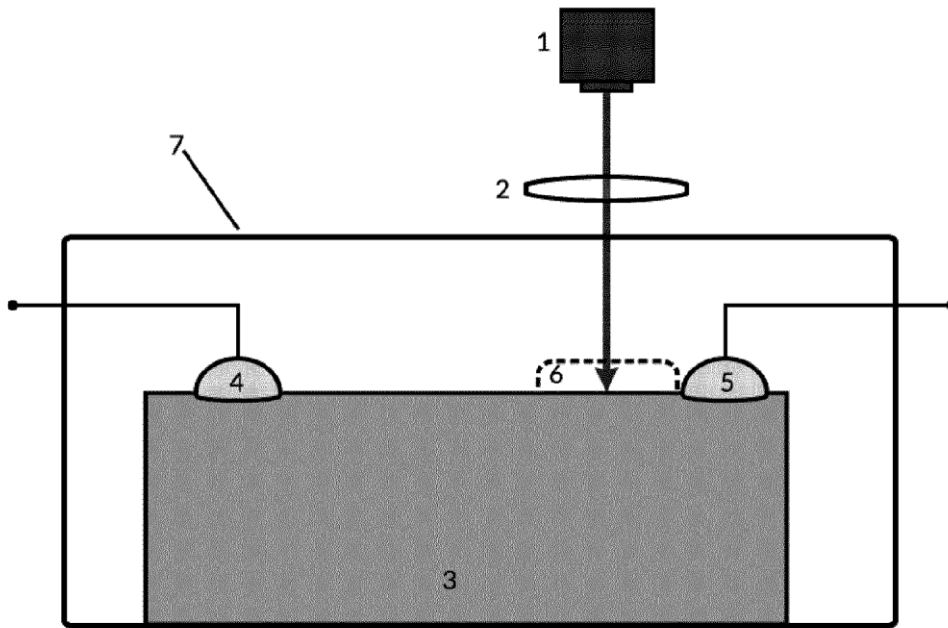


Fig. 1

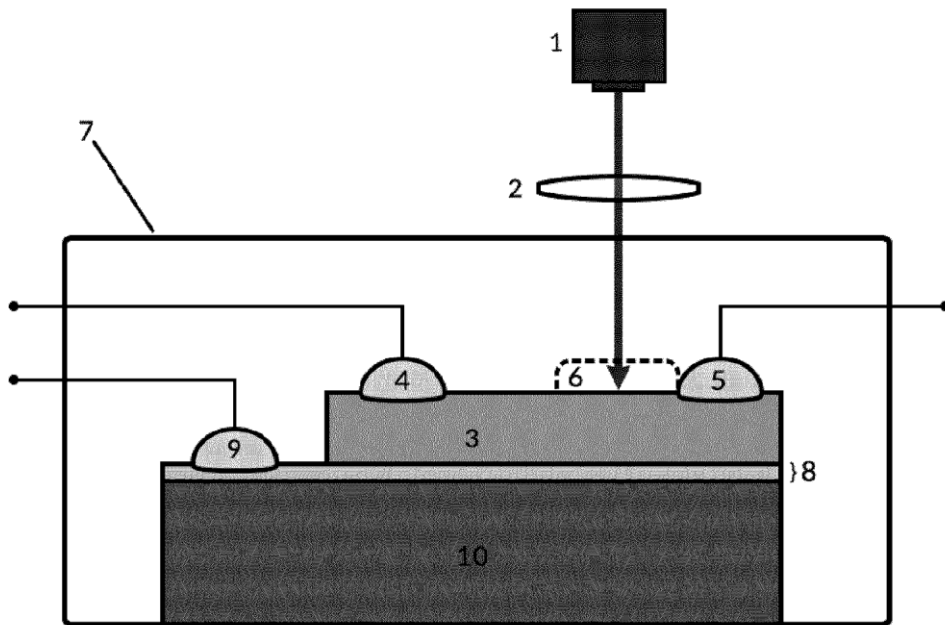


Fig. 2

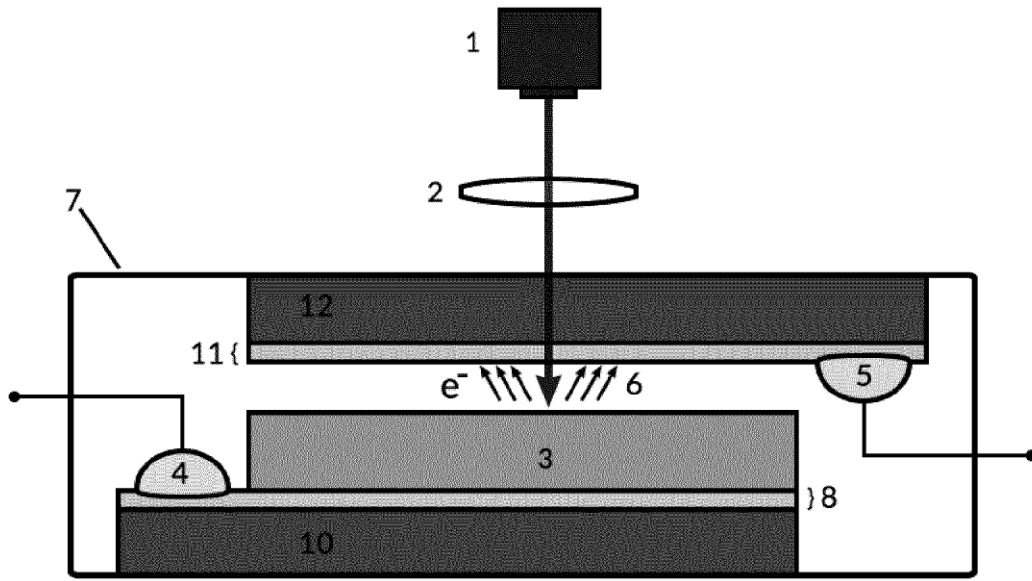


Fig. 3

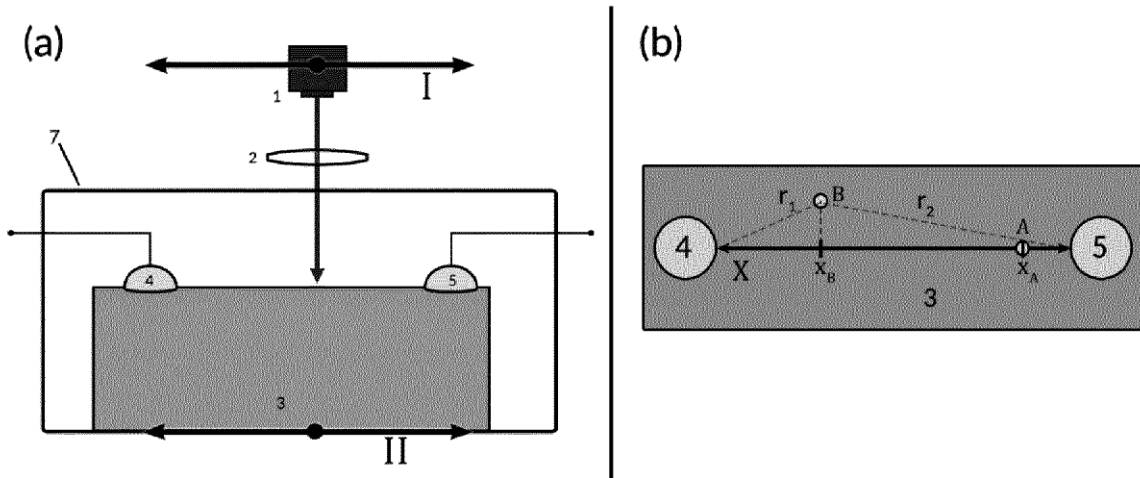


Fig. 4

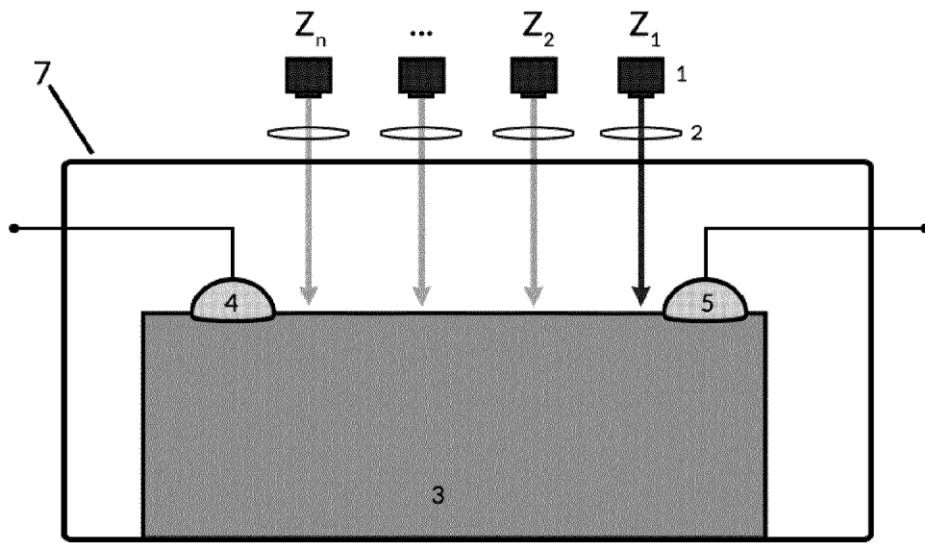


Fig. 5

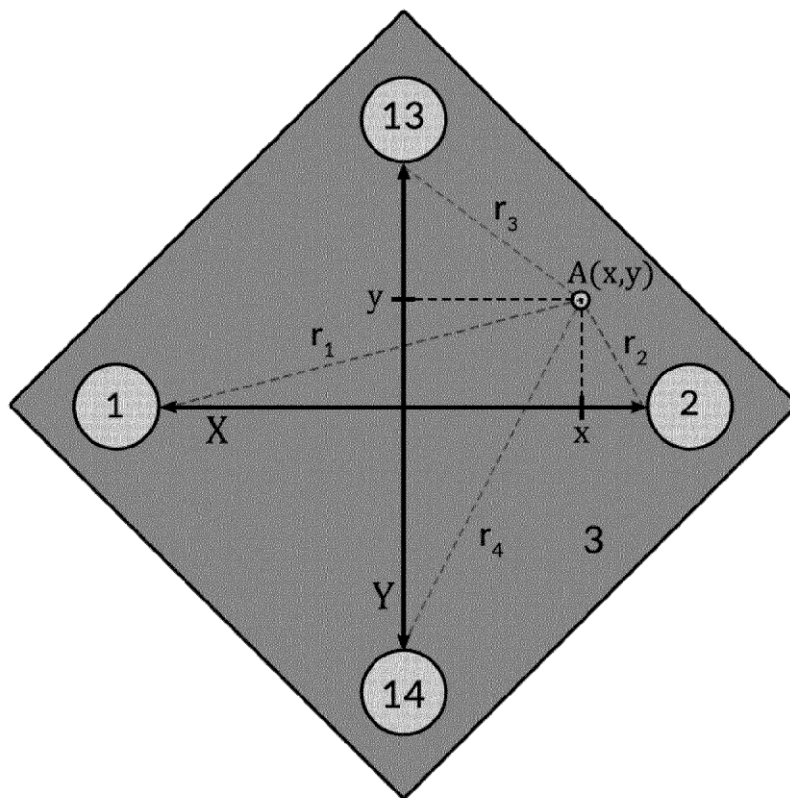


Fig. 6

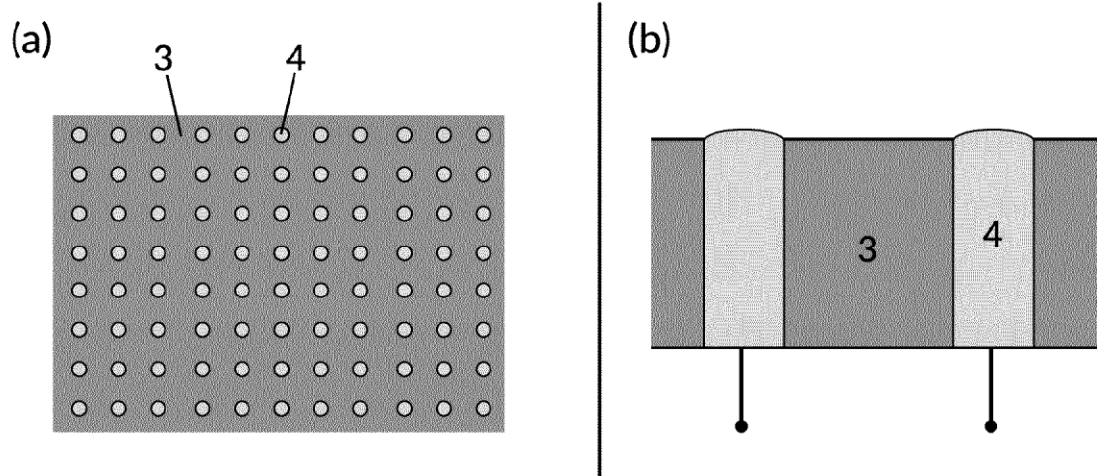


Fig. 7

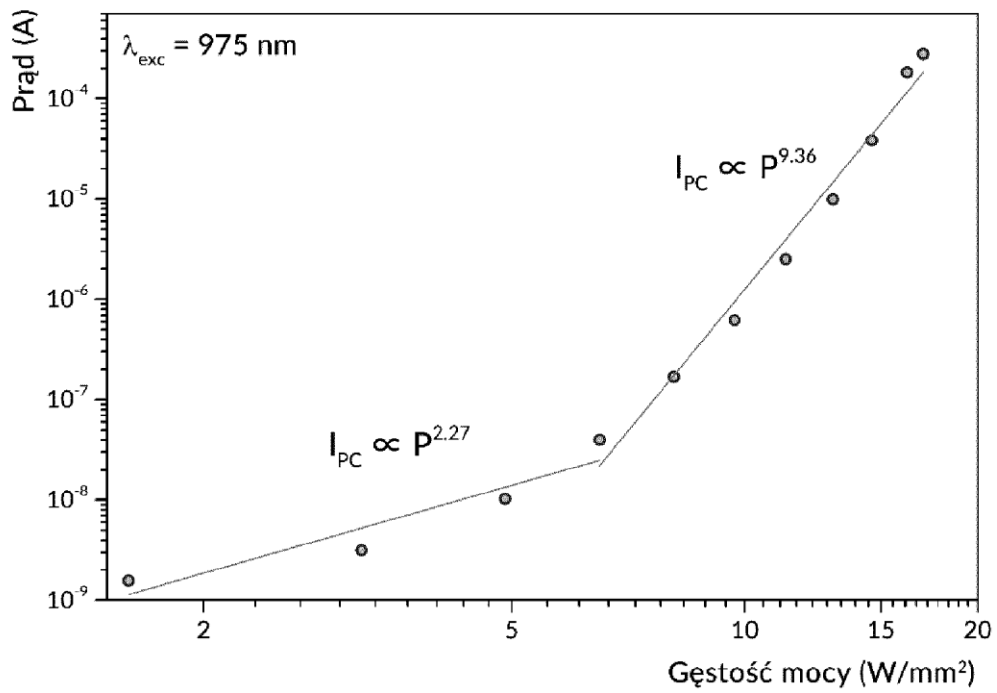


Fig. 8

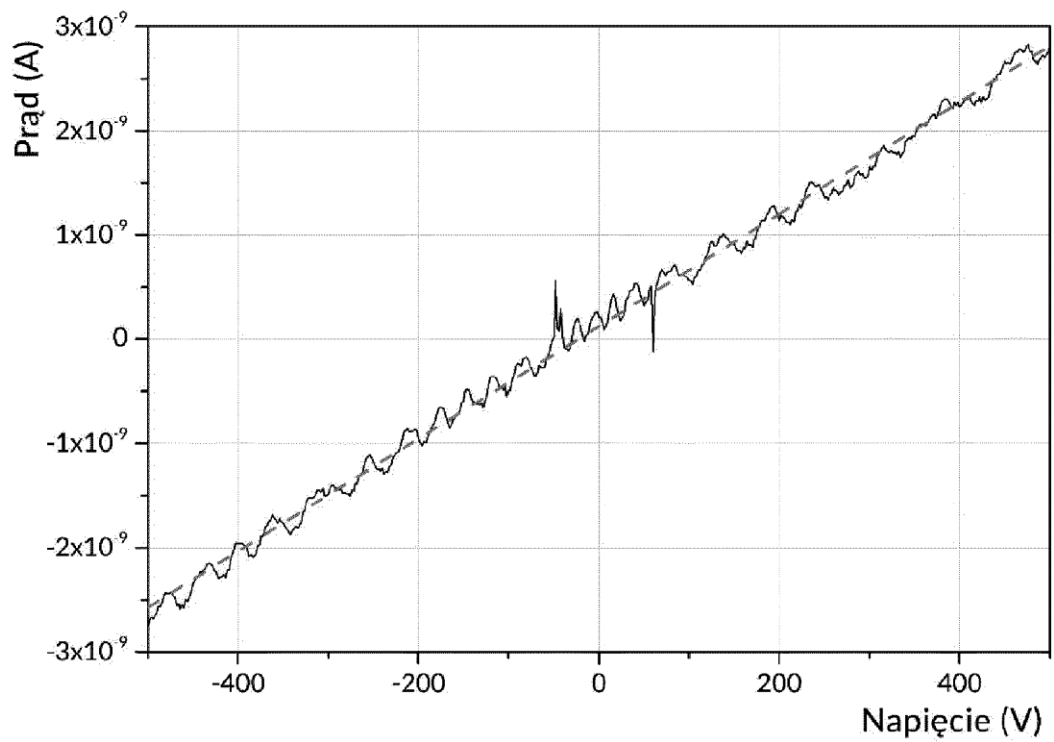


Fig. 9

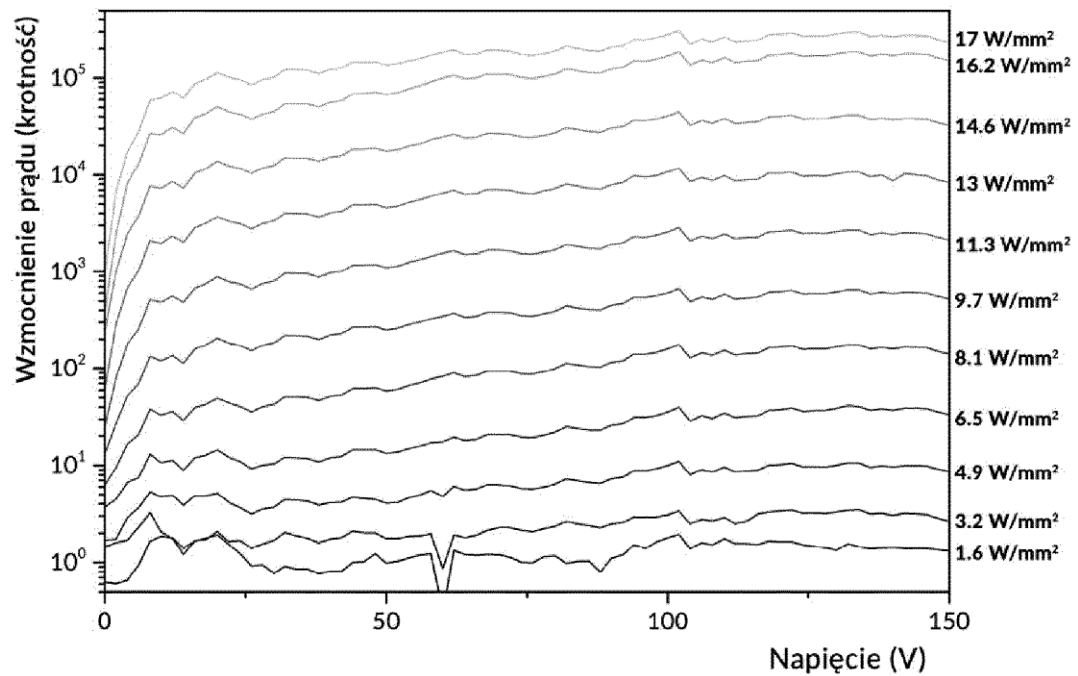


Fig. 10

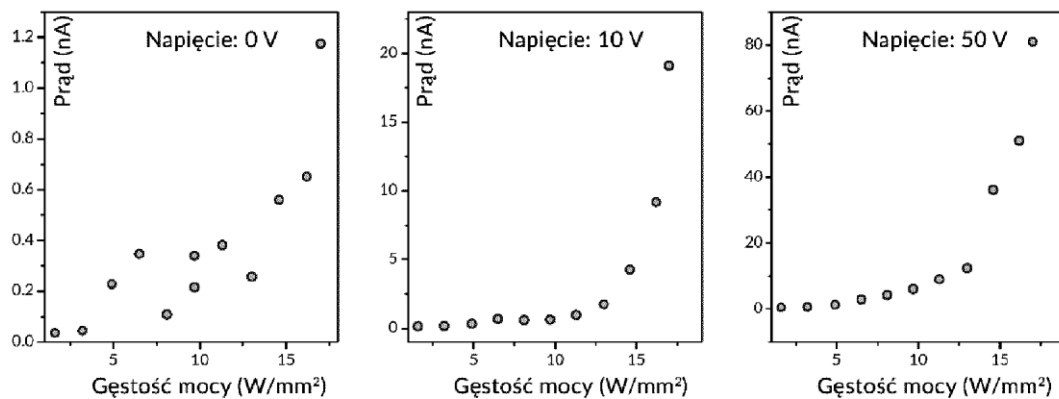


Fig. 11

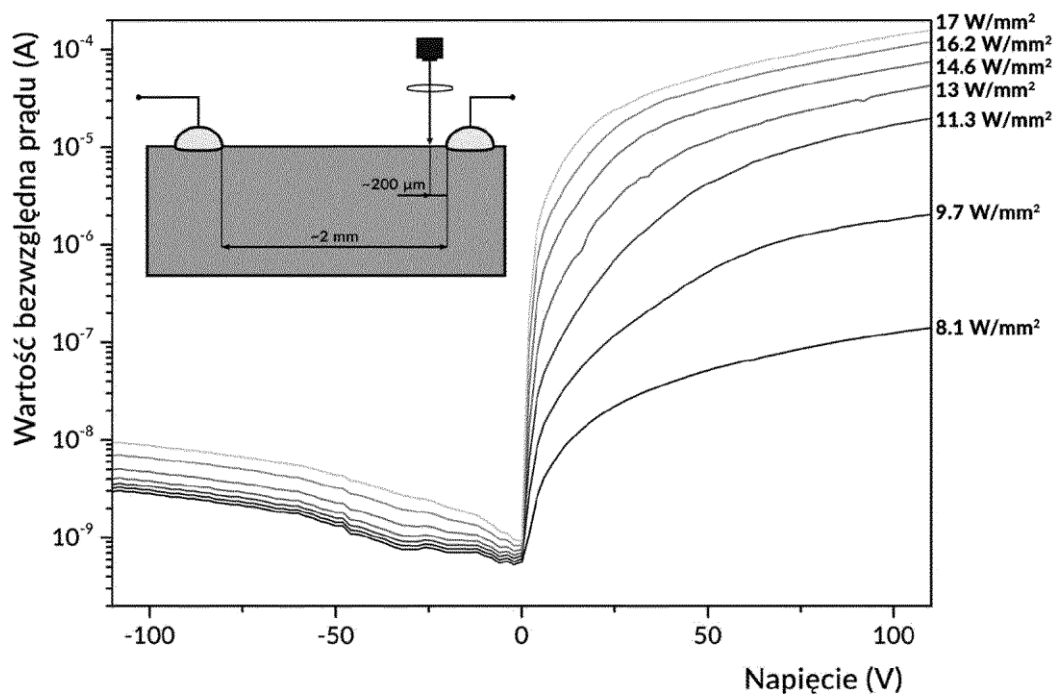


Fig. 12

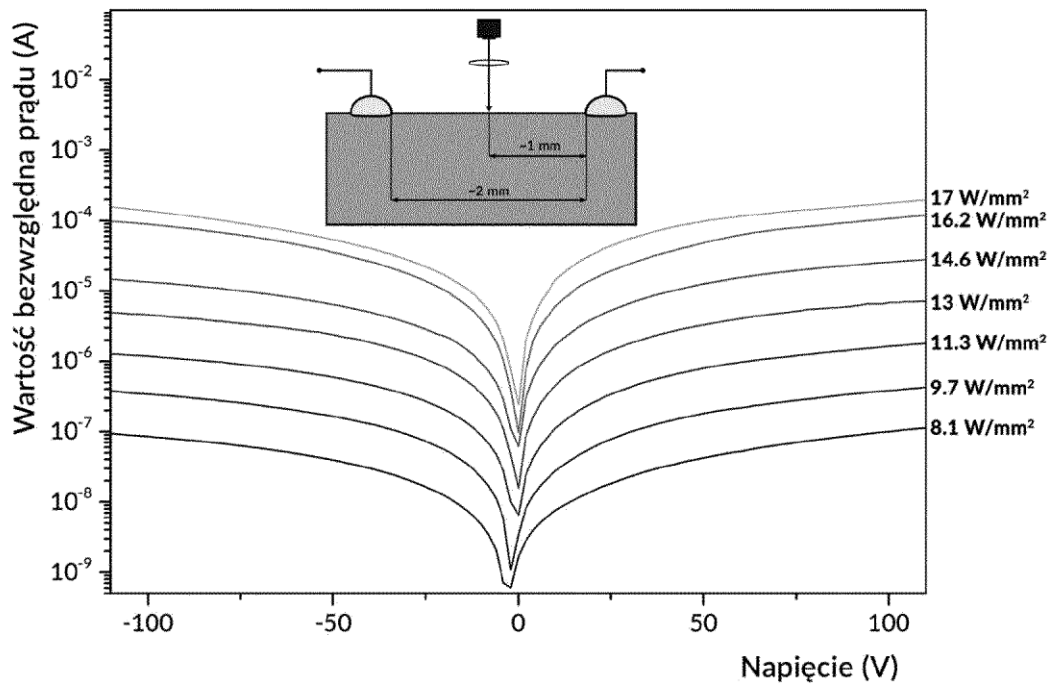


Fig. 13