

HISTORIA TRANZYSTORA POLOWEGO, POCZĄTKI I GENEZA POWSTANIA

THE HISTORY OF FIELD EFFECT TRANSISTOR, BEGINNING AND ORIGINS

Justyna Czupryniak
Paulina Namirowska

Tadeusz Ossowski

Uniwersytet Gdański

Wydział Chemii

Pracownia Chemii Supramolekularnej

ul. Wita Stwosza 63,

80-308 Gdańsk

e-mail: justyna.czupryniak@ug.edu.pl

Abstract: Automation diagnostic methods and techniques of environmental monitoring combined with higher precision, sensitivity and selectivity of the currently available detection methods evokes a growing interest of medicine and medical diagnostics to produce the miniaturized diagnostic devices and technology which enable automation of medical procedures. Application of different sensors including chemical ones for detecting substance such as: peptides, proteins, ions, heavy metals in biological systems in which is low concentration of analyte is observed, forces us to use a miniaturized chemical nanosensors with high sensitivity and selectivity. This type of sensors are FET, ISFET and MOSFET. The nano-diagnostic devices with ability of molecular recognition that's today's world most important analytical challenge for designers and chemists in order to obtain rapid and cheap diagnostic methods. In this paper we present the principle of FET and the genesis of the measuring system.

Keywords: field effect transistor, FET, MOSFET, unipolar, N-type channel, P-type channel, gateway.

Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat zaobserwowano olbrzymi wzrost zapotrzebowania na pomiary i oznaczenia składników próbek analitycznych posiadających małą objętość. Miniaturyzacja stała się w dzisiejszych czasach wiodącą strategią rozwoju w wielu dziedzinach badań naukowych oraz technologicznych. Podstawowymi zaletami miniaturyzacji są: oszczędność czasu, kosztów i materiałów. Do takich miniaturywnych elementów możemy zaliczyć m.in. sensory chemiczne, czyli urządzenia analityczne, które dostarczają informacji o obecności określonych składników złożonej próbki [1]. Rozwiązania konstrukcyjne miniaturywnych sensorów wykorzystują nowoczesne technologie produkcji. Przykładem układu powstałego poprzez wykorzystanie tych technologii jest opracowanie miniaturywnego sensora półprzewodnikowego - jonoczułego tranzystora polowego ISFET.

Opis zagadnienia

Tranzystory polowe

Już od lat 30-tych XX wieku pracowano nad urządzeniem półprzewodnikowym wykorzystującym efekt polowy - czyli możliwość sterowania prądem wyjściowym za pomocą poprzecznego pola elektrycznego.

Tranzystory polowe możemy podzielić na kilka różnych typów. Są one często wykorzystywane przez badaczy ze względu na korzystne parametry metrologiczne oraz możliwość masowej i taniej produkcji przy zastosowaniu technologii krzemowych.

Powstanie tranzystorów polowych

Historia powstania tranzystorów polowych rozpoczyna się dokładnie w październiku 1925 roku, kiedy to J.E. Lilienfeld zgłosił w Kanadzie oraz w Stanach Zjednoczonych wniosek patentowy pt. "Metoda i urządzenie do sterowania prądów elektrycznych". Opisał w nim przyrząd półprzewodnikowy z elektrodą bramki, w którym zastrzeżono, że jest to: „Metoda sterowania przepływu prądu elektrycznego w przewodzącym prąd elektryczny ciele stałym o znikomej grubości, zawierającym w pobliżu tego przepływu prądu ustalone oddziaływania elektrostatyczne, jako dodatkowy potencjał istniejący w tym miejscu, oraz zmiany rzeczono-ego oddziaływania elektrostatycznego w celu odpowiedniej zmiany rzeczono-ego przepływu prądu” [3]. Kolejny patent ukazał się w 1935 roku. Jego twórca O. Heila, który nie znając prac Lilienfelda opisał także cienkowarstwowy przyrząd polowy z jedną lub dwiema bramkami sterującymi prąd. W zastrzeżeniu tego patentu stwierdza się: „Wzmocniacz elektryczny lub inny układ

sterowniczy albo przyrząd, w którym jedna lub więcej cienkich warstw półprzewodnika przewodzących prąd, zmienia rezystancję zgodnie ze sterującym napięciem działającym na jedną lub więcej elektrod sterujących, przyłożonych poprzez izolator ściśle do rzeczony warstwy lub warstw półprzewodnika, tak by oddziaływać z nim elektrostatycznie” [3].

Porównując obydwie patenty nie ma wątpliwości, że te opisane przyrządy są tranzystorami polowymi podobnymi do znacznie później przedstawianych w literaturze. Jednak nie można było liczyć na ich szybkie zastosowanie w elektrotechnice. W owym okresie wiedza na temat zjawisk zachodzących w półprzewodnikach oraz niski poziom technologii wytwarzania półprzewodników były niewystarczające do rozpoczęcia produkcji tranzystorów polowych. Również ze względów technologicznych (głównie czystości materiałów) nie udało się takiego tranzystora stworzyć. Dopiero w latach 40-tych rozpoczęto systematyczne badania w Bell Telephone Laboratories nad tranzystorem polowym. Wyniki badań były zaskakujące. Odkryto, że ładunek, który był indukowany w półprzewodniku przez pole elektryczne, gromadził się w pułapkach przy powierzchni półprzewodnika. Z tego wynikało, że nie przyczyniał się on do zwiększenia prądu wyjściowego.

Aby to udowodnić rozpoczęto badania nad wyjaśnieniem zjawisk powierzchniowych w półprzewodnikach, które doprowadziły do odkrycia tranzystora bipolarnego w 1947 roku. Wywołało to duże zainteresowanie tym przyrządem, co spowodowało zmniejszenie zainteresowania badaniami nad tranzystorami polowymi.

W 1952 roku Shockley zaprezentował nowy model tranzystora polowego. Zaistniała wielka różnica między zasadą pracy tranzystora polowego unipolarnego, a tranzystorem bipolarnym. Funkcję materiału (dielektryka) rozdzielającego elektrodę od przewodzącego materiału półprzewodnikowego spełnia złącze p-n spolaryzowane zaporowo, a dokładniej warstwa zubożona złącza. Umożliwia to odsunięcie strefy przewodzącej w głąb półprzewodnika, eliminując problemy związane z efektami powierzchniowymi. Wykonanie takiego przyrządu w owym okresie było dość skomplikowane. Sytuacja taka panowała do czasu opanowania techniki maskowania, dyfuzji i epitaksji, przy wykorzystaniu krzemu, w takim stopniu, że powstawały tranzystory polowe z powtarzalnością charakterystyk oraz o parametrach, które przeważały nad tranzystorami bipolarnymi. W 1961 roku pojawia się tranzystor polowy tzw. alkatron [8]. W późniejszym okresie opracowano tranzystory, w których między elektrodą sterującą a półprzewodnikiem znajduje się warstwa izolatora na przykład tlenku, co jest wykorzystane w tranzystorach MOSFET.

Od tego czasu opisano wiele konstrukcji tranzystorów cienkowarstwowych, wytworzonych z odmiennych materiałów półprzewodnikowych o strukturze polikrystalicznej. Jednak trudności powiązane ze stabilnością i pułpkowaniem nośników ograniczają praktyczną użyteczność tych tranzystorów. Z tego względu

tranzystory MOSFET są częściej stosowane niż tranzystory cienkowarstwowe [3].

W ostatnich latach nastąpił przełom w wytwarzaniu i zastosowaniach tranzystorów polowych. Zajęły one ważne miejsce w technologii układów scalonych oraz układów z elementami indywidualnymi.

Posiadają one wiele cennych zalet m.in.:

- dużą rezystancję wejściową,
- małe szумы w porównaniu z tranzystorami bipolarnymi,
- możliwość autokompensacji temperaturowej,
- odporność na promieniowanie,
- małe wymiary które sprawiają, że są one coraz powszechniej wykorzystywane w układach analogowych i cyfrowych [6].

Podział tranzystorów polowych

Tranzystory unipolarne, nazywane tranzystorami polowymi, tworzy kilku rodzajów elementów, których wspólną cechą jest niebezpośrednie oddziaływanie pola elektrycznego na rezystancję półprzewodnika lub na rezystancję cienkiej warstwy nieprzewodzącej. Kierowanie pracą tranzystora unipolarnego może odbywać się bez poboru mocy. W jego pracy bierze udział tylko jeden rodzaj nośników ładunku, stąd nazwa unipolarny [9]. Klasyfikację tranzystorów polowych możemy przedstawić według schematu przedstawionego na rys. 1.

Z podziału na rys. 1 wynika, iż wyróżniamy następujące rodzaje tranzystorów polowych:

- tranzystory polowe złączone określane, jako JFET lub prościej FET (ang. *Field-Effect Transistor*), ze złączem PN (PNFET) lub ze złączem metal – półprzewodnik MESFET (ang. *Metal-Semiconductor Field - Effect Transistor*),

- tranzystory polowe z izolowaną bramką IGFET (ang. *Insulated Gate Field-Effect Transistor*), z których najczęściej wykorzystuje się struktury metal – tlenek – półprzewodnik nazywane MOS (ang. *Metal-Oxide Semiconductor*), MOSFET (ang. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) lub MIS (ang. *Metal-Insulator-Semiconductor*),

- tranzystory polowe cienkowarstwowe TFT ang. (*Thin Film Transistor*) [2].

Jednak nie wszystkie rodzaje są wykorzystywane w praktyce. Najczęściej używa się tylko trzech:

- tranzystor złączone z kanałem n (JFET),
- tranzystory z izolowaną bramką tzw. wzbogacane, z kanałem n (MOSFET N),
- tranzystory z izolowaną bramką tzw. wzbogacane, z kanałem p (MOSFET P).

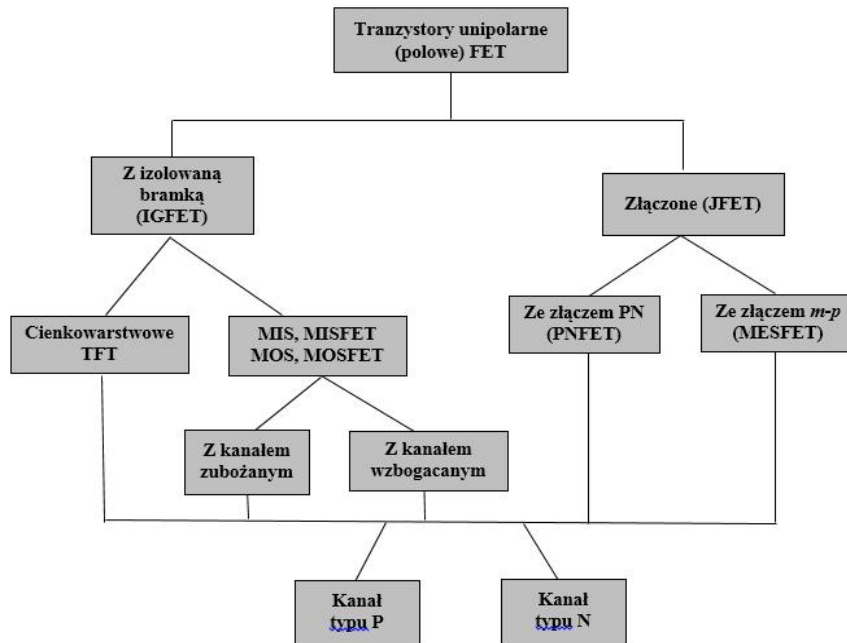
Natomiast MOSFETY zubożane nie są dostępne na rynku [4].

Zasada działania tranzystorów polowych

Zasada działania tej grupy tranzystorów znacząco różni się od tranzystorów bipolarnych. Przewodzenie prądu opiera się tylko na jednym rodzaju nośników większościowych, stąd nazwa *unipolarne*. Wspólną cechą

wszystkich tranzystorów unipolarnych jest oddziaływanie pola elektrycznego na rezystancję półprzewodnika, stąd nazwa *polowe*. Sterowanie w tranzystorach polowych odbywa się przez oddziaływanie pola elektrycz-

nego na ilość nośników większościowych w strefie półprzewodzącej zwanej *kanalem* – stąd bierze się nazwa *tranzystor kanałowy*.



Rys.1. Klasyfikacja tranzystorów polowych [2].

W tranzystorach polowych między elektrodami płynie prąd nośników jednego rodzaju tzw. prąd nośników większościowych. Wartość prądu przepływającego przez tranzystor polowy zależy od wartości napięcia przyłożonego między źródłem, a drenem a także od wartości rezystancji kanału, która wyraża się wzorem [9]:

$$R = \frac{1}{q\mu N} \frac{l}{hw} \quad (1)$$

gdzie:

- μ , N – ruchliwość i koncentracja nośników w kanale,
- l , h , w – wymiary kanału.

Wszystkie tranzystory polowe są sterowane napięciowo, co oznacza, że w normalnych warunkach w obwodzie bramki nie płynie prąd. Tranzystor polowy jest otwierany i zamykany pod wpływem napięcia między bramką a źródłem. Jeśli w obwodzie bramki prąd nie płynie oznacza to, że rezystancja wejściowa tranzystorów polowych jest bardzo duża i o wiele większa niż tranzystorów bipolarnych [7].

Tranzystory złączone JFET (FET)

Tranzystor unipolarny złączowy składa się z warstwy półprzewodnika typu n (w tranzystorach z kanałem typu N) oraz półprzewodnika typu p (w tranzystorach z kanałem typu P). Do obu końców kanałów przyłączone są elektrody. W obszar kanału wprowadza się domieszki dające obszary przeciwnego typu niż kanał, a więc dla kanału typu N domieszki akceptorowe, dające obszary

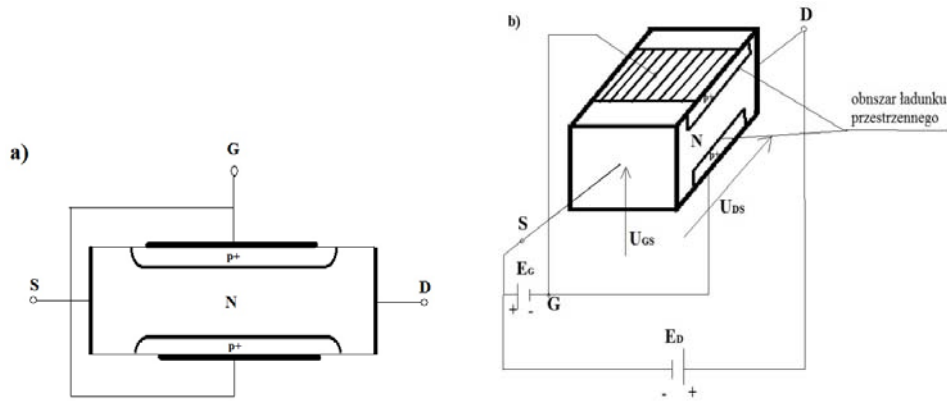
P+, natomiast dla kanału typu P domieszki donorowe, dające obszary N+. Wyprowadzenia znajdujące się na zewnątrz tych obszarów nazywa się bramką. Między kanałem i bramką tworzy się złącze PN.

Tranzystor unipolarny FET składa się z trzech elektrod, które mają swoją nazwę i określony symbol:

- źródło, oznaczone literą S (ang. *Source*), jest to elektroda, z której wpływają nośniki ładunku do wnętrza płytki. Umownie prąd źródła oznacza się jako I_s .
- dren, oznaczony literą D (ang. *Drain*), jest to elektroda, do której dochodzą nośniki ładunku. Prąd drenu oznacza się jako I_D , a napięcie dren — źródło jako U_{DS} .
- bramka, oznaczona literą G (ang. *Gate*), jest elektrodą sterującą przepływem ładunków. Prąd bramki oznacza się jako I_G , a napięcie bramka — źródło jako U_{GS} [2].

Zasada działania tranzystora unipolarnego FET (rys. 2) polega na modulowaniu (zmianie) prądu płynącego przez płytkę półprzewodnika typu N lub typu P za pomocą poprzecznego pola elektrycznego.

Źródło oraz dren przedstawione tranzystora są spolaryzowane, aby umożliwić przepływ nośników większościowych przez kanał od źródła do drenu (w tranzystorze z kanałem typu N przepływają elektrony natomiast w tranzystorze z kanałem typu P przepływają dziury). Złącze bramka – kanał w obu typach tranzystorów powinno być spolaryzowane w kierunku wstecznym. W pobliżu złącza PN powstaje warstwa zaporowa, nazywana obszarem ładunku przestrzennego. Jest ona pozbawiona nośników ruchomych.



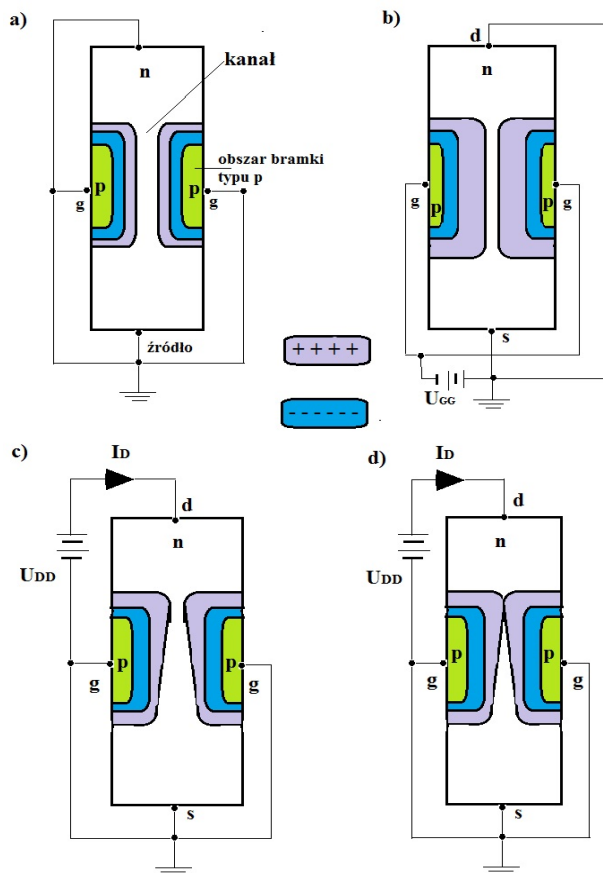
Rys. 2. Tranzystor unipolarny złączowy FET; a) uproszczona budowa; b) profil ładunku przestrzennego [2].

Ze względu na niejednakowe domieszkowanie warstwa ta wnika głębiej w obszar kanału niż w obszar bramki. Warstwa zaporowa ma dużą rezystancję, powoduje, więc zmniejszenie czynnego przekroju kanału, przez który przepływa prąd. Wraz ze wzrostem polaryzacji złącza PN w kierunku wstecznym (zwiększaniem napięcia U_{GS}) rozszerza się warstwa zaporowa, czyli zwiększa głębokość jej wnikania w kanał. Zatem dla ustalonego napięcia dren – źródło, rezystancja kanału, a więc i prąd drenu, będzie funkcją napięcia bramka – źródło. Sterowanie

przepływem prądu w tranzystorze unipolarnym zachodzi na skutek zmian pola elektrycznego, co jest nazywane efektem polowym [2].

Wpływ wartości napięcia polaryzacji na pracę tranzystora polowego

Schemat struktury i działanie tranzystora polowego złączowego FET przedstawiono na rys. 3. Oczywiście jest to duże uproszczenie, ale pomoże w zrozumieniu mechanizmów, jakie zachodzą w tranzystorze FET.



Rys. 3. Schematyczny przekrój tranzystora polowego złączowego o kanale typ n przy różnych napięciach polaryzacji [3]: a) napięcie polaryzacji wszystkich elektrod jest równe zero; b) napięcie polaryzacji bramka-źródło jest ujemne a dren-źródło jest równe zero; c) napięcie polaryzacji dren-źródło jest dodatnie, natomiast bramka-źródło jest równe zero; d) stan nasycenia dla wartości zerowej napięcia bramka-źródło.

Kiedy potencjały wszystkich elektrod równają się zero to mamy do czynienia z sytuacją przedstawioną na rys. 3a. Małe, różne od zera napięcia dyfuzyjne złącz powodują, że grubość kanału jest mniejsza niż odstęp między złączami metalurgicznymi. Przy napięciu bramka – źródło U_{GS} , polaryzującym złącze bramka – kanał w kierunku zaporowym, szerokość powierzchni ładunku przestrzennego wzrasta, więc maleje konduktancja kanału rys. 3b. Rys. 3c ukazuje oddziaływanie wzrastającego napięcia dren – źródło U_{DS} . Gdy następuje wzrost potencjału drenu zwiększa się wartość prądu, w wyniku, czego obszary kanału będące bliżej drenu posiadają większy potencjał dodatni w porównaniu z obszarami położonymi w pobliżu źródła. Dlatego grubość obszaru ładunku przestrzennego jest większa w pobliżu drenu.

W rezultacie przepływ prądu jest ograniczony do wąskiego obszaru typu n, w którym natężenie pola jest największe w pobliżu drenu. Dalszy wzrost napięcia drenu powoduje zwiększenie rezystancji kanału i odpowiednio słabszy wzrost prądu w kanale. Obydwa obszary ładunku przestrzennego zbliżają się do siebie tak, że dalszy wzrost napięcia drenu nie powoduje wzrostu prądu drenu. Przypadek ten określony jest, jako *stan nasycenia*, zilustrowany na rys. 3d.

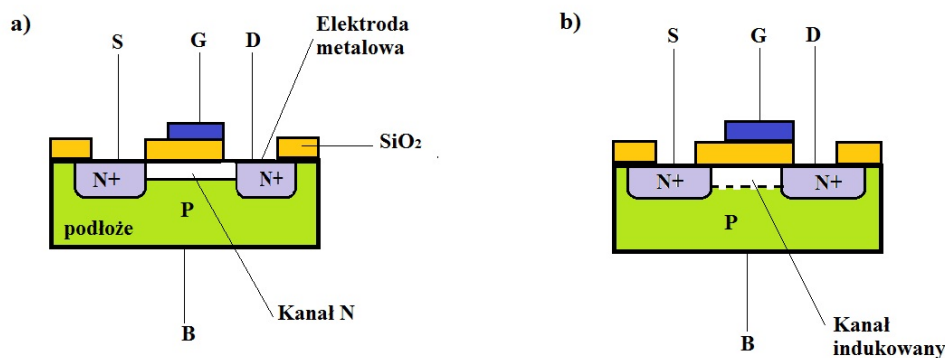
Tranzystory polowe MOSFET

Obecnie coraz częściej stosuje się tranzystory unipolarne, w których bramka jest oddzielona od płytki półprzewodnika zwanej podłożem, cienką warstwą

izolacyjną, najczęściej utworzoną z dwutlenku krzemu SiO_2 . Nazywane są one tranzystorami MOS lub MOSFET (rys. 4). Dzięki odizolowaniu bramki, teoretycznie nie płynie przez nie prąd. Praktycznie w tranzystorach JFET prądy bramki są rzędu 1 pA-10 nA, a w tranzystorach MOSFET prądy są ok. 10^3 razy mniejsze. Dlatego w przypadku tych pierwszych można otrzymać rezystancją wejściową układu o wartości 10^9 - $10^{12} \Omega$, natomiast w przypadku drugich 10^{12} - $10^{16} \Omega$.

Rozróżniamy dwa rodzaje tranzystorów MOSFET:

- tranzystory z kanałem wbudowanym. Tranzystory MOSFET mogą mieć w dyfundowany lub nałożony epitaksjalnie kanał między źródłem a drenem. W tych tranzystorach przy napięciu $U_{GS}=0$ płynie pewien prąd, podobnie jak w tranzystorach JFET, zmniejszający się przy zwiększaniu napięcia sterującego bramki. Dlatego nazywa się je tranzystorami normalnie złączonymi lub pracującymi na zasadzie zmniejszania ruchomych nośników w kanale (tranzystory z kanałem zubożanym).
- tranzystory z kanałem indukowanym. Tranzystory mogą być również wykonywane bez przewodzącego kanału. W tranzystorach z kanałem indukowanym, gdy do bramki doprowadzi się napięcie ujemne w stosunku do podłoża, wówczas źródło zostaje oddzielone od drenu dwoma przeciwnie spolaryzowanymi złączami PN. Jest to tzw. stan akumulacji. Prąd źródło – dren stanowi w takim przypadku prąd wsteczny jednego ze złączy. Ma on znikomo małą wartość. Mały prąd płynie także przy $U_{GS}=0$. Dlatego tranzystory te są nazywane tranzystorami normalnie wyłączonymi [2].



Rys.4. Budowa tranzystora MOSFET z kanałem typu N [2]: a) wbudowanym; b) indukowanym.

Natomiast, gdy do bramki doprowadzi się napięcie dodatnie w stosunku do podłoża, wówczas po przekroczeniu pewnej jego wartości, tzw. napięcia progowego U_T , przy powierzchni półprzewodnika powstaje warstwa przeciwnego typu niż półprzewodnik stanowiący podłoże. Nazywana jest warstwą inwersyjną. Warstwa ta stanowi zaindukowany kanał, który po doprowadzeniu napięcia polaryzującego źródło – dren umożliwi przepływ prądu od źródła do drenu. Ze wzrostem napięcia U_{GS} prąd drenu rośnie, dlatego tranzystory te są nazywane również tranzystorami z kanałem wzbogacającym.

Tranzystory MOSFET posiadają czwartą elektrodę, nazywaną podłożem i oznaczona symbolem B. Spełnia ona rolę zbliżoną do bramki. Jest jednak oddzielona od kanału tylko złączem PN.

Podczas gdy nie korzysta się z funkcji sterującej podłoża, wtedy łączy się je ze źródłem. Kiedy to połączenie jest wykonane wewnątrz obudowy to podłoże nie ma wyprowadzenia na zewnątrz. W pewnym uproszczeniu mechanizm fizyczny działania tych tranzystorów podobny jest do tranzystorów FET, gdyż napięciem bramki steruje szerokość przewodzącego kanału. Zarówno tranzystory z kanałem zubożanym, jak i z kanałem wzbogacającym mogą mieć kanały typu N lub

kanały typu P. Istnieją, zatem cztery podstawowe rodzaje tranzystorów z izolowaną bramką. Między tranzystorami z kanałem zubożanym i z kanałem wzbogacającym istnieje jeszcze wiele typów pośrednich.

Podsumowanie

Tranzystory FET i tranzystory MOSFET są bardzo podobne pod względem własności elektrycznych jak i zasady działania. Występują jednak między nimi dwie ważne różnice, o których warto pamiętać. Po pierwsze,

tranzystor złączowy FET pracuje tylko w warunkach zubożenia.

Gdy złącza bramki są spolaryzowane przepustowo, to zachodzi wstrzykiwanie nośników nadmiarowych i występuje znaczny prąd bramki. Po drugie, gdy tranzystor złączowy pracuje z zaporowo spolaryzowanymi złączami to i tak prąd bramki jest większy niż w tranzystorze polowym MOSFET. Stąd przyrządy z izolowaną bramką są częściej używane od złączowych tranzystorów polowych [5].

Literatura

1. Brzózka, Z., (red), Miniaturyzacja w analityce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
2. Chwaleba, A., Moeschke, B., Płoszajski, G., Elektronika, WSiP, Warszawa, 1999.
3. Cobbold, Richard, S.C., Teoria i zastosowanie tranzystorów polowych, WNT, Warszawa, 1975.
4. Górecki, P., Elektronika dla Wszystkich, AVT-Korporacja, 2000.
5. Gray, Paul E., Searle, Campbell L., Podstawy Elektroniki, PWN, Warszawa, 1976.
6. <http://www.automatyka.ndl.pl/elektronika/unipolarne/unipolar.html> (dostęp 5.06.2016).
7. Janata, J., Principles of Chemical Sensors, Plenum Press, Inc., New York, 1989.
8. Rosiński, W., Zasady działania tranzystorów, WNT, Warszawa, 1997.
9. Wróbel, Z., Elektronika Analogowa, Uniwersytet Śląski w Katowicach, Sosnowiec, 1999.

Praca naukowa finansowana z funduszy DS nr 530-8215-D490-16 Katedry Chemii Analitycznej Uniwersytetu Gdańskiego oraz grantu Narodowego Centrum Nauki nr 2012/05/N/ST4/00167.