

## Maciej KOKOT<sup>1</sup>, Tadeusz OSSOWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

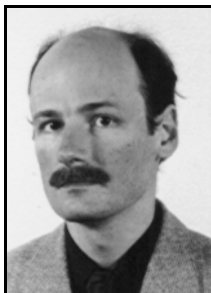
<sup>2</sup>UNIwersytet Gdański, Wydział Chemii

# Stałokonduktancyjny układ pracy dla czujników ISFET

Mgr inż. Maciej KOKOT

Wykładowca Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Ukończył wydział ETI w specjalności mikroelektronika. Główne obszary zainteresowań to: elektronika ciała stałego, układy analogowe, chemia analityczna i elektrochemia. Obecnie zajmuje się przetwornikami ISFET, zastosowaniami, modyfikacjami i układami ich pracy oraz właściwościami w roztworach wodnych o słabej przewodności i niewodnych.

e-mail: kokot@ue.eti.pg.gda.pl



Dr hab. inż. Tadeusz OSSOWSKI

Profesor na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego. Kierownik Zakładu Chemii Supramolekularnej. Specjalizuje się w chemii związków makrocyklicznych, peptydów i aminokwasów. Główny kierunek badań wyznacza poszukiwanie receptorów rozpoznawania molekularnego z wykorzystaniem technik elektrochemicznych i spektroskopowych. W swoich badaniach wykorzystuje techniki modyfikowania powierzchni ciał stałych w celu uzyskania specyficznych i selektywnych oddziaływań na granicy faz roztwór ciało stałe.

e-mail: tedos@chem.univ.gda.pl



### Streszczenie

Opracowano stałokonduktancyjny układ pracy dla czujników ISFET. Proponowany układ utrzymuje właściwy punkt pracy czujnika poprzez ustalenie konduktancji stałoprądowej dren źródło. Poprzez zastosowanie mostka rezystancyjnego oraz odjęcie połowy napięcia dren-źródło od napięcia bramka-źródło osiągnięto niewrażliwość układu na niestabilność źródeł prądowych czy napięciowych. Zbędne stało się stosowanie precyzyjnych źródeł prądowych czy wzmacniaczy operacyjnych wysokiej klasy. Punkt pracy przetwornika zależy jedynie od rezystorów mostka.

**Słowa kluczowe:** ISFET, stałokonduktancyjny układ pracy, samorównoważący mostek rezystancyjny, stabilność punktu pracy.

## Constant conductance driver for ISFET sensors

### Abstract

A constant conductance driver for ISFET sensors is presented. The proposed circuit maintains the sensor operating point at constant drain-source conductance by application of a simple, self-balancing resistance bridge and by subtracting half of the source-drain voltage from the gate-source voltage. Such solution assures the independence of output signal from current and voltage drivers instability. The use of precision current sources or high class operating amplifiers is no more required. The ISFET operating point depends only on bridge resistors.

**Keywords:** ISFET, constant conductance driver, self-balancing resistance bridge, operating point stability.

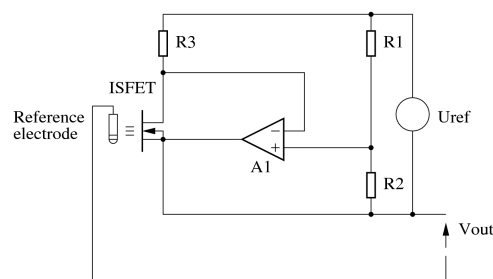
## 1. Wstęp

Tranzystory ISFET (ion sensitive FET) są czujnikami elektronicznymi, których sygnał wyjściowy jest zależny od stężenia jonów w roztworze, w którym są zanurzone. Wrażliwe są głównie na stężenie jonów wodorowych [1].

Czujniki te, obecnie stosowane coraz częściej do pomiaru pH, zastępują tradycyjnie używane elektrody szklane. Przyczyną są istotne zalety ISFETów w porównaniu z elektrodą szklaną, w szczególności: niewielki rozmiar, większa szybkość odpowiedzi, zwartość budowy, trwałość (elektroda szklana jest bardzo kruchą i cienkościenną bańką o średnicy około 1 cm) [2].

Elektroda szklana charakteryzuje się także bardzo dużą rezystancją wewnętrzną (wynikającą z cienkiej warstwy szkła jonoczułego oddzielającego wyprowadzenie elektryczne od mierzonego roztworu), co powoduje konieczność stosowania wzmacniaczy pomiarowych o bardzo dużej rezystancji wyjściowej. Czujnik ISFET nie stwarza takich wymagań – jego rezystancja wyjściowa jest mała [3].

Układy polaryzujące czujniki ISFET, stosowane do chwili obecnej, są proste. W większości przypadków są to układy utrzymujące stałe napięcie dren-źródło oraz stały prąd drenu poprzez zmianę polaryzacji źródła [1, 4, 5, 6, 7]. Zmiana napięcia bramka-źródło jest tu sygnałem wyjściowym.



Rys. 1. Podstawowy układ pracy czujnika ISFET [1]  
Fig. 1. The basic circuit diagram of a source and drain follower [1]

Układy te cechuje stały punkt pracy przetwornika, co ma na celu wyeliminowanie wpływu zależności prądowo napięciowych tranzystora MOS, a uzależnienie sygnału wyjściowego jedynie od zjawisk elektrochemicznych na powierzchni dielektryka

Istotną niedogodnością tradycyjnych układów jest konieczność dokładnej kontroli prądu drenu i niezależnej kontroli napięcia dren-źródło. Niestabilność źródeł napięciowych lub prądowych jest przyczyną dużych, niepożądanych zmian sygnału wyjściowego przetwornika.

Głównym celem niniejszej pracy było stworzenie niewielkiego i prostego układu pomiarowego dla czujników ISFET oraz, co najważniejsze, niewymagającego stabilnych i dokładnych źródeł napięcia lub prądu.

## 2. Teoria

Czujnik ISFET jest zwykłym tranzystorem MOS lecz bez metalizacji bramki. Dielektryk bramki pozostaje w kontakcie z badanym roztworem, a rolę bramki odgrywa elektroda odniesienia również zanurzona w roztworze. Na powierzchni dielektryka bramkowego formuje się ładunek elektryczny zależny od stężenia jonów wodorowych. Ładunek ten zmienia wartość napięcia progowego tranzystora [1, 2].

Wartość prądu drenu czujnika ISFET w zakresie nienasycenia określona jest identycznym wyrażeniem jak dla tranzystora MOS:

$$I_d = \beta \left( (V_{gs} - V_T) V_{ds} - \frac{1}{2} V_{ds}^2 \right), \quad (1)$$

gdzie:

$$\beta = C_{ox} \mu \frac{W}{L} \quad (2)$$

jest stałe dla danego tranzystora.  $W$  i  $L$  są rozmiarami kanału,  $C_{ox}$  to pojemność dielektryka na jednostkę powierzchni a  $\mu$  ruchliwość

ścią elektronów w kanale.  $V_t$  jest napięciem progowym zależnym od koncentracji jonów.

Utrzymując stałą wartość  $V_{gs} - V_t$  otrzymuje się stałą wartość prądu drenu, jeśli  $V_{ds}$  również będzie ustalone. Sygnałem wyjściowym jest napięcie bramka-źródło, lecz zależy on nie tylko od napięcia progowego  $V_t$ , ale również od stałości prądu drenu i napięcia dren-źródło utrzymywanych poprzez zewnętrzny układ polaryzacji czujnika.

Dzieląc obie strony równania 1 przez  $V_{ds}$  otrzymuje się konduktancję dren-źródło:

$$G_{ds} = \frac{I_d}{V_{ds}} = \beta \left( V_{gs} - V_t - \frac{1}{2} V_d \right). \quad (3)$$

Biorąc, jako sygnał wyjściowy, napięcie pomiędzy bramką a środkiem kanału, otrzymuje się prostsze równanie:

$$G_{ds} = \beta (V_{gc} - V_t), \quad (4)$$

gdzie:

$$V_{gc} = V_{gs} - \frac{1}{2} V_{ds}. \quad (5)$$

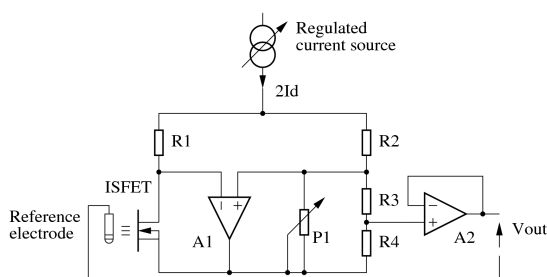
Z równania 4 wynika, iż jeżeli konduktancja  $G_{ds}$  będzie utrzymywana stała, to sygnał wyjściowy  $V_{gc}$  zależy jedynie od napięcia  $V_t$  (które zależy od koncentracji jonów), a nie zależy od prądu drenu, ani napięcia dren-źródło.

Dotychczasowe układy pracy czujników ISFET pracują poprawnie również w zakresie nasycenia tranzystora, lecz kosztem konieczności zapewnienia dokładnego i niezmiennego prądu drenu i napięcia dren-źródło. Układ przedstawiony w pracy, wymaga jednak zapewnienia pracy tranzystora ISFET w zakresie nienasycenia.

### 3. Opis układu

Układ wykonano w postaci samorównoważającego się mostka rezystancyjnego. Rezystory R1 i R2 stanowią górne gałęzi mostka, w dolnej gałęzi umieszczony jest tranzystor ISFET, a w przeciwległej identyczne rezystory R3 i R4 oraz, równolegle potencjometr P1. W przekątnej mostka włączono wejścia wzmacniacza operacyjnego A1, który poprzez zmianę napięcia źródła ISFETA utrzymuje jego stałą konduktancję dren-źródło i mostek w równowadze. Precyzyjny potencjometr P1 jest używany tu do zmiany żądanej konduktancji czujnika ISFET. Identyczne rezystory R3 i R4 dzielą napięcie  $V_{ds}$  na pół, więc napięcie wyjściowe  $V_{out} = -V_{gc}$ . Napięcie  $V_{out}$  jest buforowane przez wtórnik napięciowy A2.

Regulowane źródło prądowe  $2I_d$  zasila mostek. Zostało ono zastosowane tu jedynie dla wygody przeprowadzenia pomiarów właściwości układu, podobnie jak potencjometr P1. W finalnym układzie oba te elementy są zbędne.

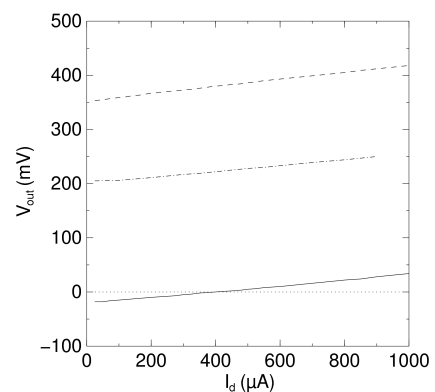


Rys. 2. Układ polaryzacji czujnika ISFET  
Fig. 2. Driver circuit

W przedstawionym układzie użyto powszechnie dostępne elementy elektroniczne zwykłej klasy. Wzmacniacze operacyjne to OP07C charakteryzujące się wejściowym napięciem niezrównoważenia rzędu  $60\mu\text{V}$  oraz prądem polaryzacji wejść  $2\text{nA}$  [8]. Rezystory metalizowane o tolerancji 1% mają wartość  $2,49\text{k}\Omega$ .

### 4. Wyniki pomiarów

W celu zweryfikowania układu, użyto czujnik ISFET (wyprodukowany przez Instytut Technologii Elektronowej w Warszawie) z dielektrykiem z azotku krzemu, z kanałem typu n, normalnie włączony. Podłoże fabrycznie zwarte jest ze źródłem. Punkt pracy czujnika został ustalony dla rezystancji dren-źródło  $370\Omega$ . W tabeli 1, oraz na rysunku 3, przedstawiono wyniki pomiarów napięcia wyjściowego układu –  $V_{out}$  dla różnych prądów drenu, w roztworach buforowych o różnym pH.



Rys. 3. Eksperymentalne wyniki wpływu prądu drenu na napięcie wyjściowe w trybie pracy stałokonduktancyjnej w roztworze o pH 3,72 (linia przerywana), 6,98 (kropka – kreska) i 11,04 (linia ciągła)  
Fig. 3. Experimental results of drain current influence on output voltage in constant conductance mode in solutions of pH 3.72 (dashed line), 6.98 (dash-dot) and 11.04 (solid line)

Tab. 1. Eksperymentalne wyniki wpływu prądu drenu na napięcie wyjściowe w trybie pracy stałokonduktancyjnej  
Tab. 1. Experimental results of drain current influence on output voltage in constant conductance mode

	pH=11,0	pH=6,98	pH=3,72	pH=11,0	pH=6,98	pH=3,72
$I_d$ ( $\mu\text{A}$ )	$V_{out}$ (mV)			$V_s$ (mV)		
25	-18	205	353	-23	200	348
100	-15	206	359	-33	187	340
200	-10	211	367	-47	174	330
300	-5	217	373	-60	161	318
400	0	222	380	-74	148	306
500	5	228	386	-87	135	293
600	10	233	393	-101	122	282
700	16	239	399	-113	109	270
800	22	244	405	-126	96	257
900	28	250	412	-139	84	245
1000	34		418	-151		233

Dla porównania układów w tabeli 1 zamieszczono także wartości napięcia między źródłem tranzystora a masą –  $V_s$ , odpowiadające działaniu dotychczasowych układów pracy ISFETów, co pokazuje, że zaproponowane rozwiązanie pokazane na rys. 2

zdecydowanie polepsza działanie układu polaryzacji czujnika ISFET.

Przedstawione wyniki pomiarowe pokazują, iż zaproponowany stałokonduktancyjny układ sterujący zapewnia dość dużą niezależność napięcia wyjściowego od prądu drenu w przeciwieństwie do układów klasycznych. Jednakże linie napięcia wyjściowego nie są całkowicie płaskie, jak można by oczekiwać na podstawie równania 4.

Przedstawione dla porównania wartości napięcia źródła (odpowiadające sygnałowi wyjściowemu klasycznych układów, analogicznych do ukazanego na rys. 1) wykazują znacznie większą wrażliwość na zmiany prądu drenu.

## 5. Dyskusja wyników

Wyniki pomiarowe nie są w pełni zgodne z teorią przedstawioną wcześniej. Prawdopodobnie główną przyczyną jest uproszczenie równania 1. Dokładniejsza zależność prądu drenu jest przedstawiona poniżej [9]:

$$I_d = \beta \left( (V_{gs} - V_t) V_{ds} - \frac{1}{2} V_{ds}^2 - \frac{4}{3} \phi^{1/2} V_{ds}^{3/2} \right), \quad (6)$$

gdzie  $\phi$  jest niezerowym potencjałem odzwierciedlającym wpływ domieszkowania podłoża z napięciem dren-źródło w potęgze 3/2.

$$\phi = \frac{1}{4} \frac{2e\epsilon\epsilon_0 N_a}{C_{ox}}, \quad (7)$$

gdzie najważniejszy czynnik to  $N_a$  – koncentracja akceptorów w domieszkowanym podłożu tranzystora.

Równanie 3 przyjmuje teraz dokładniejszą postać:

$$G_{ds} = \beta \left( V_{gc} - V_t - \frac{4}{3} \phi^{1/2} V_{ds}^{1/2} \right). \quad (8)$$

Jak można zauważyć, sygnał wyjściowy  $V_{gc}$  nie jest całkowicie niezależny od  $V_{ds}$  (więc także od  $I_d$ ), lecz zależność ta jest słaba, szczególnie gdy poziom domieszkowania podłoża –  $N_a$  jest niski (patrz równanie 7).

W przedstawionym układzie, tą niewielką zależność można łatwo skompensować. Poprzez niewielką zmianę współczynnika podziału 1:1 rezystorów R3 i R4 osiągnie się znacznie lepszą niezależność sygnału wyjściowego od prądu drenu. Nachylenie charakterystyki wynosi tu około 55Ω i jest to wartość zmiany

symetrii rezystorów R3 i R4 dla zastosowanego w pomiarach czujnika.

## 6. Wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono układ pracy czujników ISFET. Ważną zaletą proponowanego rozwiązania jest to, iż dokładność i stabilność pomiarów zależy jedynie od rezystorów mostka. Zbędne są dokładne źródła napięciowe lub prądowe.

Opracowany przez autorów układ jest prawie niewrażliwy na zmianę zasilania mostka (pomimo, iż skutkuje ona zmianą punktu pracy tranzystora ISFET).

Dodatkowo, w przedstawionym rozwiązaniu istnieje możliwość kompensacji nieidealności tranzystora ISFET poprzez zmianę współczynnika podziału rezystorów prawej gałęzi mostka

Dla przykładu, niestosując dodatkowej kompensacji i zasilając mostek prądem 400μA ( $I_d = 200 \mu A$ ) spadek prądu nawet o 50% powoduje zmianę napięcia wyjściowego układu jedynie o ok. 6mV, co odpowiada błędowi pomiaru rzędu 0,1pH. Przy mniejszych prądach mostka, wrażliwość układu jest jeszcze mniejsza.

## 7. Literatura

- [1] P. Bergveld: Thirty years of ISFETOLOGY. Sens. Actuators, B, Chem. 88 (2003) 1-20
- [2] P. Bergveld: ISFET, Theory and Practice. IEEE Sensor Conference, Toronto 2003
- [3] Miao Yuqing, Chen Jinrong, Fang Keming: New technology for the detection of pH. J. Biochem. Biophys. Methods 63 (2005) 1-9
- [4] S. Casans, A.E. Navarro, D. Ramirez et al.: Novel constant current driver for ISFET/MEMFETs characterization. Sens. Actuators, B, Chem. 76 (2001) 629-633
- [5] S. Casans, A.E. Navarro, D. Ramirez et al.: Novel voltage-controlled conditioning circuit applied to the ISFETs temporary drift and thermal dependency. Sens. Actuators, B, Chem. 91 (2003) 11-16
- [6] B. Palan et al.: New ISFET sensor interface circuit for biomedical applications. Sens. Actuators, B, Chem. 57 (1999) 63-68
- [7] W. Chung, C. Yang, D. Pijanowska, A. Krzyskow, W. Torbic: ISFET interface circuit embedded with noise rejection capability. ELECTRONICS LETTERS, 40 (18) (2004) 1115-1116
- [8] Analog Devices Data Sheet: Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier OP07
- [9] A. van der Ziel: Podstawy fizyczne elektroniki ciała stałego. WNT, Warszawa 1980

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Zapraszamy do prenumeraty czasopisma PAK w 2008 roku

Cena prenumeraty rocznej: 192,00 zł netto/1 egz.

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

**WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**

ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa, tel./fax: 022 827 25 40

**Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**

44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b, tel./fax: 032 237 19 45,

e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl, www.pak.info.pl