

Model DC tranzystora GaN HEMT z uwzględnieniem parametrów fizycznych

Streszczenie. Powszechnie znane metody pomiaru ruchliwości i koncentracji nośników w 2-wymiarowym gazie elektronowym (2-DEG) struktur HEMT stosowane są do oceny poszczególnych etapów procesu technologicznego. Brak jest ilościowego odniesienia uzyskanych w ten sposób wartości tych parametrów wprost do charakterystyk elektrycznych tranzystora. Dlatego zaproponowano podejście zaciskowe, aby na podstawie zależności fizycznych i charakterystyk DC I-V tranzystora wyznaczyć ruchliwość i koncentrację nośników 2-DEG w kanale struktury GaN HEMT.

Abstract. Commonly known method for the measurement of electron mobility and concentration in the 2-dimensional electron gas (2-DEG) of HEMT heterostructures are used to evaluate the individual stages in the technological process. Currently, there is no quantitative reference of values obtained with the use of mentioned methods directly to the electrical characteristics of the transistor. This was the main reason to apply a terminal approach in order to determine a mobility and carrier concentration in 2-DEG of GaN HEMTs heterostructures based on physical relationships and I-V characteristics. (A DC Analytical Model of AlGaIn/GaN HEMT including physical parameters).

Słowa kluczowe: model, GaN HEMT, tranzystor, ruchliwość, koncentracja, 2-DEG, C-V.

Keywords: model, GaN, HEMT, transistor, modeling, electron mobility, concentration, 2DEG, C-V.

Wprowadzenie

Obecnie w Polsce, w kilku ośrodkach, trwają intensywne prace nad technologią tranzystorów GaN HEMT na zakres częstotliwości mikrofalowych. W ramach tych działań realizowany jest projekt PolHEMT, którego planowanym efektem jest demonstrator technologii GaN HEMT na monokrystalicznym podłożu GaN (Ammono) dla zastosowań w systemach radarowych. Parametry fizyczne takie jak ruchliwość μ_n i koncentracja n_s nośników 2-DEG tuż przy interfejsie AlGaIn/GaN należą do najważniejszych wielkości sprawdzających jakość procesu technologicznego na kolejnych jego etapach. Parametry te wyznacza się przy pomocy metody C-V oraz na podstawie zjawiska Halla [1, 2]. Jednak otrzymywane wartości ruchliwości μ_n i koncentracji n_s nie przekładają się ilościowo na natężenie prądu drenu w gotowych tranzystorach. Taka nieścisłość była główną inspiracją opracowania analitycznego modelu tranzystora dla obliczania ruchliwości μ_n i koncentracji n_s nośników w oparciu o przesłanki fizyczne i charakterystyki stałoprądowe DC I-V. Podstawą zaproponowanego modelu są równania wyprowadzone z definicji ruchliwości μ_n oraz koncentracji n_s nośników, w których występują tylko parametry fizyczne.

Model fizyczny tranzystora GaN HEMT

Modele koncentracji

Jednym z najważniejszych parametrów tranzystorów mocy HEMT jest wydajność prądowa, która jest funkcją koncentracji nośników n_s w 2-wymiarowym gazie elektronowym. Dlatego pojawia się pytanie o relację pomiędzy koncentracją n_s nośników mierzoną metodą np. C-V, a rzeczywistą gęstością prądu drenu w gotowym tranzystorze. W poszukiwaniach tego związku zdecydowano się na wyprowadzenie zależności koncentracji od poziomu Fermiego E_f i napięcia bramka - źródło U_{gs} na podstawie charakterystyk DC na zaciskach tranzystora. Równania charakterystyk DC muszą zatem zawierać nieuproszczoną, analityczną zależność $n_s(U_{gs})$, aby otrzymać w postaci jawnej równanie prądu drenu w funkcji napięcia U_{gs} przy możliwie dokładnym opisie zjawisk zachodzących w kanale tranzystora. Ponadto założono, że parametry równania charakterystyk DC będą tylko wielkościami fizycznymi.

Zależności koncentracji powierzchniowej n_s w kanale tranzystora od poziomu Fermiego E_f wyraża się następująco [3]:

$$(1) \quad n_s = D k_B T \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_f - E_0}{k_B T} \right) \right] + D k_B T \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_f - E_1}{k_B T} \right) \right]$$

gdzie: D – funkcja gęstości stanów, k_B – stała Boltzmanna, T – temperatura, E_0 i E_1 – możliwe do obsadzenia poziomy energetyczne.

Równanie (1) pozwala na obliczenie koncentracji n_s , gdy znana jest wartość poziomu Fermiego, który jest funkcją napięcia U_{gs} . Wyrażenie (1) może służyć do weryfikacji dokładności innych modeli. Jednakże wadą korzystania z tego równania jest brak analitycznej postaci rozwiązania. Do analitycznego opisu charakterystyk I-V potrzebna jest jawna zależność koncentracji od napięcia U_{gs} , którą można określić w wyniku rozwiązania 1-wymiarowego równania Poissona. Stąd otrzymuje się następujące wyrażenie [3]:

$$(2) \quad n_s(m, x) = \frac{\varepsilon(m)}{q(d_d + d_i + \Delta d)} (U_{gs} - U_t - U_c(x))$$

gdzie: $\varepsilon(m)$ – przenikalność dielektryczna warstwy AlGaIn zależna od ułamka molowego m , U_t – napięcie progowe, q – ładunek elektronu, d – grubości warstwy AlGaIn wraz ze spacerem.

Równanie koncentracji (2) może być stosowane tylko w liniowym zakresie pracy tranzystora. W nieliniowym zakresie charakterystyk wyjściowych tranzystora koncentrację nośników w kanale otrzymuje się w rezultacie rozwiązania 2-wymiarowego równania Poissona. Modele opisane przez (1) i (2) posłużyły do wyprowadzenia równań charakterystyk wyjściowych tranzystora w zakresie liniowym.

Model ruchliwości i prędkości dryftu

Ruchliwość jest ważnym parametrem odpowiedzialnym za transport nośników w kanale tranzystora. W liniowym zakresie pracy w obecności słabego pola elektrycznego, prędkość nośników v_d wzrasta proporcjonalnie do natężenia pola $E(x)$ ze stałą proporcjonalności μ zwaną ruchliwością słabego pola (ang. *low-field mobility*). Dla dużych wartości pola zależność ta nie jest spełniona i nośniki osiągają stałą prędkość zwaną prędkością nasycenia v_{sat} . Ponieważ ruchliwość μ i koncentracja n_s zależą od natężenia pola E w kanale [4], dlatego prędkość dryftu nośników w kanale

tranzystora HEMT w zakresie liniowym można zapisać w następującej postaci:

$$(3) v_d(E) = \mu(E)E$$

W przypadku heterostruktur AlGaIn/GaN, prędkość v_d w funkcji natężenia pola E wykazuje maksimum dla pewnego pola E_T . Fakt ten potwierdził Udayan V. et al. przy pomocy symulacji Monte Carlo [5] oraz Oxley H. et al. na drodze pomiarowej [6]. Efekt ten uwzględnia model Schwierza, który wykorzystano w dalszych obliczeniach. Pomimo dużej zgodności z symulacjami, mankamentem modelu Schwierza jest semiempiryczny, nie będący wielkością fizyczną, parametr s modelujący podbicie prędkości dryftu nośników. Ponadto model ten zawiera składniki czwartego rzędu wprowadzone dla opisu ruchliwości w stanie nasycenia, co komplikuje obliczenia w trakcie wyznaczania charakterystyk I-V. W zakresie liniowej pracy tranzystora składowe czwartego rzędu w modelu Schwierza można pominąć i przyjąć wartość parametru s równą 1. Nie wpłynie to na wynik, ponieważ nieliniowa praca tranzystora w zaproponowanym modelu charakterystyk DC opisana jest 2-wymiarowym równaniem Poissona. Po uwzględnieniu zmodyfikowanego modelu Schwierza i skorzystaniu z zależności pomiędzy polem elektrycznym a potencjałem w kanale, ruchliwość w zależności od położenia w kanale opisano następującym wyrażeniem:

$$(4) \mu(x) = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 E_c - v_{sat}}{E_c v_{sat}} \frac{dU_c(x)}{dx}}$$

gdzie μ_0 jest ruchliwością niezależną od pola elektrycznego.

Charakterystyki prądowo-napięciowe

Model charakterystyk wyjściowych tranzystora zawiera dwa równania prądu drenu $I_{dlin}(U_{ds})$ oraz $I_{dsat}(U_{dssat})$ odpowiednio w zakresie liniowym oraz nasycenia, gdzie U_{ds} oznacza zakres napięć w zakresie liniowym, a U_{dssat} w zakresie nasycenia. Charakterystyki I-V w zakresie liniowym są wyznaczane na podstawie modeli ruchliwości i koncentracji dla słabego pola elektrycznego. Do obliczeń w zakresie nasycenia, dla dużych wartości pola elektrycznego w kanale, użyto 2-wymiarowego równania Poissona. Dodatkowo uwzględniono dwa specyficzne stany: pierwszy stan, gdy tranzystor zaczyna się nasycać oraz drugi, gdy pojawia się duże pole elektryczne wzdłuż całego kanału. Gęstość prądu w kanale tranzystora HEMT stanowi sumę gęstości prądów dryftu oraz dyfuzji i wyraża się następująco [7]:

$$(5) J_{ds} = Wq\mu(x) \left(n_s(x) \frac{dU_c(x)}{dx} + \frac{k_B T}{q} \frac{dn_s(x)}{dx} \right)$$

Po uwzględnieniu zaproponowanego modelu ruchliwości (4) otrzymuje się zależność gęstości prądu drenu od stałej ruchliwości μ_0 w postaci:

$$(6) J_{ds} = \frac{Wq\mu_0 \left(n_s(x) \frac{dU_c(x)}{dx} + \frac{k_B T}{q} \frac{dn_s(x)}{dx} \right)}{\left(1 + \left(\frac{\mu_0 E_c - v_{sat}}{E_c v_{sat}} \right) \frac{dU_c(x)}{dx} \right)}$$

Prąd drenu I_d można obliczyć w wyniku całkowania równania (6) względem napięć $U_c(x)$ wzdłuż kanału, przy założeniu, że koncentracja nośników w kanale dana jest przez (2). Zależność (6) pozwala na obliczenie charakterystyk wyjściowych tranzystora AlGaIn/GaN HEMT w zakresie liniowym. Należy podkreślić, że w modelu wykorzystano tylko i wyłącznie parametry fizycznie. Zaletą

zaproponowanego modelu jest możliwość wyznaczenia ruchliwości μ_0 dla słabego pola, dla danych charakterystyk I-V tranzystora oraz przy założeniu, że spełniony jest następujący warunek wynikający z równania prądu drenu [8]:

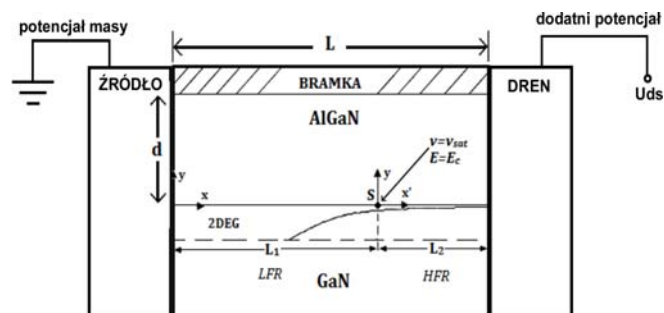
$$(7) \frac{\partial I_{dlin}}{\partial U_{ds}} > \frac{\partial I_{dsat}}{\partial U_{ds}} \quad \text{dla } U_{gs} > U_t.$$

Jeśli $U_{ds} = U_{dsat}$, prędkość nośników w kanale zbliża się do prędkości nasycenia v_{sat} . Stosując model koncentracji (2) oraz pomijając prąd dyfuzji, zależność prądu drenu w początkowym zakresie nasycenia I_{dsat0} można opisać następującą zależnością:

$$(8) I_{dsat0} = \frac{W\varepsilon(m)}{q(d_d + d_i + \Delta d)} (U_{gs} - U_t - (U_{dsat} - I_{dsat0} R_d)) v_{sat}$$

gdzie R_d jest rezystancją między drenem a źródłem.

Ze względu na małą koncentrację nośników w silnym polu elektrycznym, we wzorze (8) pominięto składnik opisujący zjawisko dyfuzji, ponieważ prądy powodowane przez nierównomierny rozkład nośników są pomijalnie małe. W celu weryfikacji otrzymanej wartości ruchliwości parametr μ_0 obliczono ponownie wykorzystując model charakterystyk I-V w warunkach nasycenia ($U_{ds} > U_{dsat}$). Gdy $U_{ds} > U_{dsat}$ kanał tranzystora HEMT podzielony jest na dwa obszary: LFR (ang. *Low-Field Region*) o długości L_1 oraz HFR (ang. *High-Field Region*) o długości L_2 , jak pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Przekrój przez strukturę podbramkową tranzystora AlGaIn/GaN HEMT

Obszar silnego pola (HFR) pojawia się w pobliżu drenu, gdzie kanał jest prawie przerwany (rys. 1). Wraz z oddalaniem się od drenu w kierunku źródła kanał staje się coraz bardziej otwarty. Od strony źródła występuje obszar słabego pola elektrycznego (LFR), w którym znajdują się prawie wszystkie nośniki (kanał jest otwarty). W obszarze LFR ($0 \leq x \leq L_1$) pole elektryczne $E(x)$ jest niewielkie osiągając zerową wartość przy źródle. W funkcji odległości x od źródła, z powodu zmniejszania się ujemnej polaryzacji bramki względem potencjału rozciągającego się wzdłuż kanału, koncentracja nośników maleje, a pole $E(x)$ wzrasta osiągając w punkcie granicznym S dla $x = L_1$ wartość E_c zwaną polem krytycznym. Przyjmuje się, że punkt S , zaznaczony na rysunku 1, jest punktem rozgraniczającym dwa obszary, w którym nośniki osiągają prędkość nasycenia v_{sat} . W całym obszarze HFR koncentracja nośników poruszających się z prędkością v_{sat} jest niska i prawie stała. Dlatego też w obszarze silnego pola prąd dyfuzji można zaniedbać. Fakt ten uwzględniono w modelu dla obszaru HFR. W obszarze słabego pola w modelu uwzględniono zarówno prąd dryftu, jak i dyfuzji. Model charakterystyk I-V w zakresie nasycenia opisują wprowadzone zależności analityczne napięcia $U_c(x)$ dla każdego obszaru z osobna, tj. $U_{cLFR}(x)$ i $U_{cHFR}(x)$

odpowiednio dla obszaru LFR oraz HFR. Napięcie $U_{cLFR}(x)$ wyznaczono całkując równanie (7) wzdłuż kanału w granicach $(0, x)$. Natomiast rozkład napięcia $U_{cHFR}(x)$ otrzymano rozwiązując 2-wymiarowe równania Poisson'a.

W ostatnim etapie modelowania dla zakresu nasycenia skorzystano z warunku ciągłości potencjału na styku obszarów LFR i HFR. W rezultacie prąd drenu jest funkcją napięcia i wyraża się następującą zależnością:

$$(9) \quad 0 = I_{d\text{ sat}}^2 \left(1 - a^2 E_c^2 - 2abE_c^2 R_s - b^2 E_c^2 R_s \right) + I_{d\text{ sat}} \left(2bE_c^2 L + 2abU_{g2}E_c^2 + 2U_{g2}R_sE_c^2 \right) - \left(bU_{g2}E_c \right)^2 - \frac{4bd'I_{d\text{ sat}}E_c^2}{\pi} \sinh^{-1} \left(\frac{\pi}{2d'E_c} \left(U_{ds} - U_{g2} - I_{d\text{ sat}}R_d + \frac{I_{d\text{ sat}}}{b} \left(a + \frac{1}{E_c} \right) \right) \right)$$

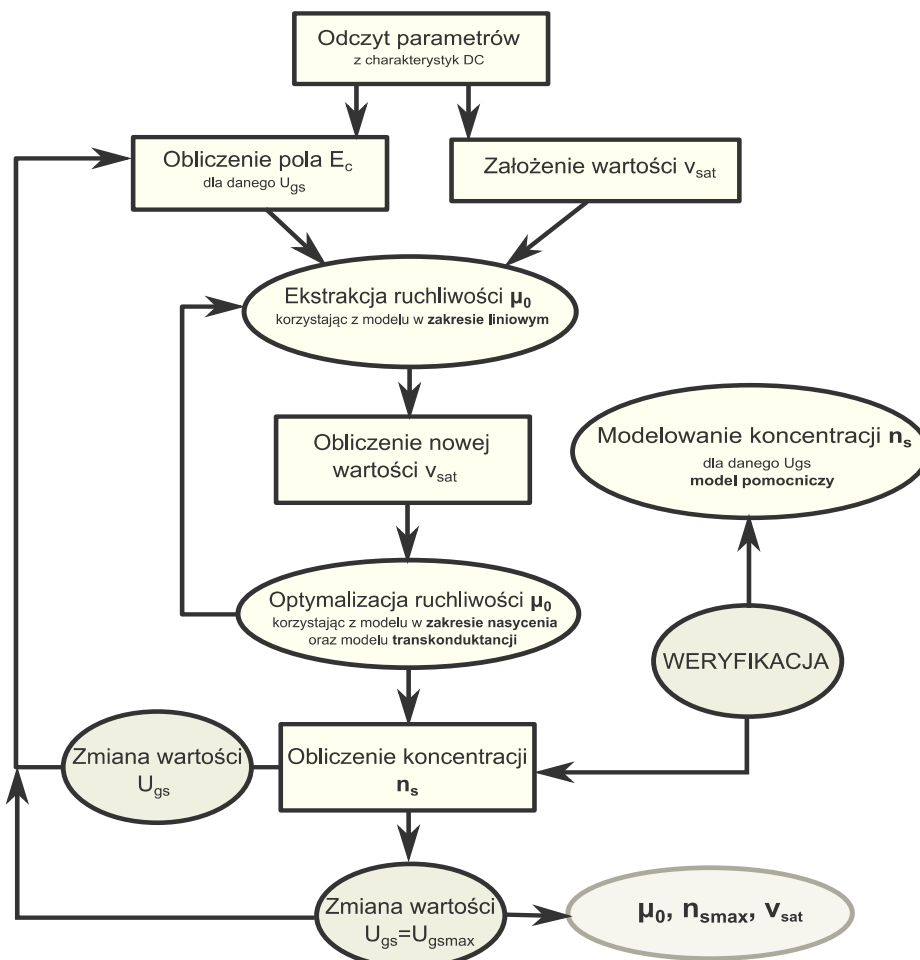
gdzie: L – długość bramki tranzystora, d' – grubość warstwy AlGaIn, natomiast parametry a oraz b opisane są następującymi zależnościami:

$$(10) \quad a = \frac{\mu_0 E_c - v_{\text{sat}}}{E_c v_{\text{sat}}}, \quad b = \frac{W \mu_0 \varepsilon(m)}{d}$$

Wyprowadzone wyrażenie (9) wymaga obliczeń numerycznych dla szybkiego wyznaczenia charakterystyk I-V w zakresie nasycenia. W przypadku obliczania ruchliwości przy danych wartościach napięcia i prądu, zmienną w równaniu (9) jest tylko ruchliwość μ_0 , co znacznie upraszcza rozwiązanie.

Określanie ruchliwości i koncentracji nośników

Ze względu na fakt, że koncentracja silnie zależy do napięcia bramka - źródła zdecydowano się podawać największą możliwą do uzyskania koncentrację nośników $n_{s\text{max}}$ w kanale tranzystora. Niewielki wpływ rezystancji drenu i źródła na wynik obliczeń koncentracji $n_{s\text{max}}$ oraz ruchliwości μ_0 spowodował, że wartości te szacowano na podstawie rezystancji włączenia tranzystora R_{on} , którą wyznaczano z nachylenia charakterystyki wyjściowej tranzystora. W celu weryfikacji zaproponowanego modelu oraz procedury określania ruchliwości i koncentracji nośników w kanale tranzystorów HEMT przeprowadzono obliczenia dla tranzystorów wytworzonych w ramach projektu PoHEMT na podłożach: monokrystalicznym GaN (Amonno) i SiC z heterostrukturą AlGaIn/GaN. Etapy ekstrakcji parametrów fizycznych tranzystora przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Etapy ekstrakcji parametrów fizycznych tranzystorów GaN HEMT

Ostateczne wartości parametrów fizycznych badanych tranzystorów uzyskane przy pomocy zaproponowanego modelu zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Uzyskane wartości parametrów fizycznych badanych tranzystorów

Tranzystor	μ_0 [cm ² /V·s]	n_{smax} [cm ⁻²]	v_{sat} [cm/s]	n_{CV} [cm ⁻²]	μ_H [cm ² /V·s]
GaN/GaN_A3	925	$1,73 \cdot 10^{12}$	$2,04 \cdot 10^7$	6.8- $8.4 \cdot 10^{12}$	2000
GaN/GaN_C3	1010	$2,20 \cdot 10^{12}$	$2,21 \cdot 10^7$		
GaN/SiC_A4	1100	$1,62 \cdot 10^{12}$	$1,67 \cdot 10^7$		
GaN/SiC_E2	1110	$1,65 \cdot 10^{12}$	$1,77 \cdot 10^7$		

Wartości koncentracji n_{smax} oraz ruchliwości μ_0 dla czterech charakteryzowanych tranzystorów są mniejsze od wartości uzyskiwanych z pomiarów metodą C-V oraz w przypadku ruchliwości z efektu Halla. Koncentracja n_H otrzymana z pomiarów metodą C-V dla tych tranzystorów zawiera się w przedziale $6,8 \div 8,4 \cdot 10^{12}$ cm⁻². Natomiast ruchliwość Halla μ_H , którą traktowano jako efektywną ruchliwość nośników w kanale tranzystora, wynosi około 2000 cm²/Vs. Wartości parametrów obliczone przy pomocy zaproponowanego modelu różnią się od danych uzyskanych metodą C-V i z efektu Halla, ale są spójne z wynikami pomiarów.

Podsumowanie

Opracowany model ruchliwości i koncentracji nośników w kanale GaN HEMT może być przydatnym narzędziem do charakteryzacji gotowych struktur i analizy rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymanymi standardowymi metodami, a rzeczywistymi zaciskowymi parametrami tranzystora. Należy podkreślić fakt wykorzystania w modelu tylko i wyłącznie wielkości fizycznych. Ponadto zaproponowano oryginalną procedurę ekstrakcji parametrów modelu, która może być łatwo zaimplementowana w oprogramowaniu

pomiarowym charakterystyk I-V tranzystora w celu natychmiastowego wyznaczenia ruchliwości i koncentracji nośników w trakcie pomiarów elektrycznych struktur GaN HEMT.

LITERATURA

- [1] Brzozowski A., Pomiar warstw epitaksjalnych metodą C-V przy użyciu sondy rtęciowej, *Materiały Elektroniczne* nr 4(44), WEMA, 1984
- [2] Jung W., Zastosowanie złącza metal-półprzewodnik do określania parametrów fizycznych struktur półprzewodnikowych, ITE, Warszawa 2011
- [3] Sze S.M., Ng K.K., *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Edition, Wiley-IEEE, Press, 2006
- [4] Katz O., Horn A., Bahir G., Electron mobility in an AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas I-Carrier concentration dependent mobility, *Electron Devices, IEEE Trans. on*, vol.50, no.10, 2002-2008, 2003
- [5] Bhapkarand U.V., Shur M., Monte Carlo calculation of velocity-field characteristics of wurtzite GaN, *Journal of Applied Physics*, vol. 82, no.4, 1649, Aug 1997
- [6] Oxley C.H., Uren M.J., Measurements of unity gain cutoff frequency and saturation velocity of a GaN HEMT transistor, *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol.52, no.2, 165,169, Feb. 2005
- [7] Gangwani P., Pandey S., Haldar S., A compact C-V model for 120nm AlGaIn/GaN HEMT with modified field dependent mobility for high frequency applications, *Microelectronics Journal*, vol. 38, Issues 8-9, 848-854, 2007
- [8] Kuchta D., Model DC tranzystora GaN HEMT z uwzględnieniem parametrów fizycznych, praca magisterska, IRE PW

Autorzy: dr inż. Wojciech Wojtasiak, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: wwojtas@ire.pw.edu.pl; mgr inż. Dawid Kuchta, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: kuchtadavid@op.pl