

Modelowanie wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego na charakterystyki wybranych elementów elektronicznych

Streszczenie. W pracy zaproponowano sposób modelowania właściwości elementów półprzewodnikowych przy uwzględnieniu wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Przedstawiono koncepcję modelowania rozważanych elementów za pomocą programu SPICE oraz pokazano postać hybrydowego modelu elementu półprzewodnikowego uwzględniającego oddziaływanie rozważanego pola na przebiegi napięcia i prądu elementu półprzewodnikowego. Rozważania szczegółowe przeprowadzono na przykładzie diody p-n. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki obliczeń charakterystyk statycznych i dynamicznych tej diody. Wskazano, przy jakich wartościach parametrów pola elektromagnetycznego widoczny jest jego wpływ na rozważane charakterystyki.

Abstract. This paper proposes the manner of the modelling properties of semiconductor devices with an influence of the external electromagnetic field taken into account. The idea of modelling considered devices by means of the SPICE software is presented and the form of the hybrid model of the semiconductor device taking into account the influence of considered field on courses of the voltage and the current of this device is shown. Detailed considerations were passed on the example of the p-n diode. Results of calculations of dc and dynamic characteristics of this diode are presented and discussed. It is shown, at which values of parameters characterising electromagnetic field its influence on considered characteristics is visible. (**Modelling an influence of an external electromagnetic field on characteristics of selected electronic components**).

Słowa kluczowe: modelowanie, elementy półprzewodnikowe, SPICE, zewnętrzne pole elektromagnetyczne, symulacje komputerowe.

Keywords: modelling, semiconductor devices, SPICE, external electromagnetic field, computer simulations.

Wprowadzenie

W otaczającym nas świecie wykorzystuje się coraz więcej urządzeń elektronicznych, które pracują przy coraz niższych wartościach napięcia zasilającego. W ślad za obniżaniem wartości tego napięcia maleje odporność układów elektronicznych na zakłócenia pochodzące od zewnętrznych pól elektromagnetycznych [1, 2]. Źródłem tych pól mogą być m.in. urządzenia łączności bezprzewodowej lub impulsowe układy zasilające, ale także wyładowania atmosferyczne lub oddziaływania wiatru słonecznego z atmosferą ziemską.

Do oceny wpływu zewnętrznych pól elektromagnetycznych na właściwości urządzeń elektronicznych niezbędne są modele elementów elektronicznych dedykowane do programów analizy układowej uwzględniające te zjawiska. Programem powszechnie stosowanym w analizie układów elektronicznych jest SPICE [3, 4]. Jednak wbudowane w tym programie modele elementów elektronicznych nie uwzględniają wpływu rozważanych pól elektromagnetycznych [5].

W literaturze, np. [6, 7, 8, 9] opisano koncepcję tworzenia tzw. modeli hybrydowych, które umożliwiają uwzględnienie dodatkowych, pomijanych w modelach wbudowanych w programie SPICE, zjawisk fizycznych, istotnych z punktu widzenia konkretnej aplikacji. Przykładowo, w pracach [6 - 11] pokazano sposób uwzględnienia wpływu zjawiska samonagrzewania na charakterystyki wybranych przyrządów półprzewodnikowych.

W niniejszej pracy zaproponowano sposób modelowania statycznych i dynamicznych charakterystyk elementów półprzewodnikowych przy uwzględnieniu wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Na przykładzie diody przedstawiono postać takiego modelu oraz zaprezentowano i skomentowano wyniki obliczeń wykonanych przy wybranych wartościach parametrów charakteryzujących zewnętrzne pole elektromagnetyczne.

Koncepcja modelowania

Jak zaznaczono we Wprowadzeniu, do modelowania właściwości przyrządów półprzewodnikowych przy uwzględnieniu nowych, pomijanych dotychczas zjawisk

fizycznych można zastosować, znaną z literatury [9, 12, 13], koncepcję formułowania hybrydowych modeli elementów elektronicznych. Modele takie mają formę obwodu elektrycznego stanowiącego połączenie istniejącego modelu, w którym pominięto rozważane zjawiska, z dodatkowymi elementami. Te elementy, modelujące dodatkowe spadki napięcia spowodowane występowaniem nowych zjawisk, są włączane szeregowo z istniejącymi gałęziami modelu w postaci sterowanych źródeł napięciowych, a elementy modelujące dodatkowe składniki prądów reprezentowane są przez sterowane źródła prądowe włączone w nowe gałęzie między węzłami istniejącego modelu [9].

Rozważany w niniejszej pracy wpływ zewnętrznego pola elektromagnetycznego na charakterystyki elementów elektronicznych może przejawiać się dodatkowym spadkiem napięcia między każdą parą wyprowadzeń modelowanego elementu. Jak wiadomo z równań Maxwella, zmiennemu polu magnetycznemu zawsze towarzyszy zmienne pole elektryczne. W przypadku fali płaskiej występuje pole elektryczne o natężeniu E równym iloczynowi natężenia pola magnetycznego H oraz impedancji falowej Z_f ośrodka, w którym rozchodzi się fala elektromagnetyczna. Dla powietrza Z_f wynosi około 377 Ω . Korzystając z relacji między natężeniem pola magnetycznego H a indukcją pola magnetycznego B w próżni można zapisać następującą relację między natężeniem pola elektrycznego a indukcją pola magnetycznego

$$(1) \quad E = B \cdot \frac{Z_f}{\mu_0}$$

gdzie μ_0 oznacza przenikalność magnetyczną próżni.

A zatem, dla fali płaskiej o amplitudzie indukcji pola magnetycznego B_m występuje zmienne pole elektryczne o amplitudzie E_m równej iloczynowi B_m oraz liczby 3×10^8 m/s. Przykładowo, przy $B_m = 1 \mu\text{T}$, E_m wynosi około 300 V/m.

Pomimo tego, że pole elektryczne zawsze towarzyszy zmiennemu polu magnetycznemu, w celu poprawy przejrzystości dalszych rozważań osobno rozpatrywany jest wpływ pola elektrycznego i osobno wpływ pola magnetycznego na właściwości rozważanych elementów.

Wpływ pola elektrycznego można opisać za pomocą sterowanego źródła napięciowego włączonego szeregowo z każdym wyprowadzeniem tego przyrządu. Napięcie takiego źródła stanowi iloczyn natężenia zewnętrznego pola elektrycznego oraz odległości między końcówkami poszczególnych par wyprowadzeń.

Z kolei, zewnętrzne zmienne pole magnetyczne powoduje powstanie siły elektromotorycznej między poszczególnymi parami wyprowadzeń modelowanego przyrządu półprzewodnikowego. Dlatego szeregowo z każdym wyprowadzeniem należy włączyć sterowane źródło napięciowe, reprezentujące indukowaną siłę elektromotoryczną. Jak wiadomo z podstawowego kursu fizyki [14], zmienne pole magnetyczne o indukcji B powoduje zaindukowanie w obwodzie prostokątnym o wymiarach $a \times b$ siły elektromotorycznej U danej wzorem [14]

$$(2) \quad U = a \cdot b \cdot \frac{dB}{dt} \cdot \cos \alpha_x$$

gdzie α_x oznacza kąt między wektorem B a normalną do powierzchni obwodu. W klasycznym przypadku, gdy pole magnetyczne zmienia się sinusoidalnie z częstotliwością f , a amplituda jego indukcji wynosi B_m , to wartość indukowanej siły elektromotorycznej można opisać wzorem o postaci

$$(3) \quad U = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot f \cdot B_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos \alpha_x$$

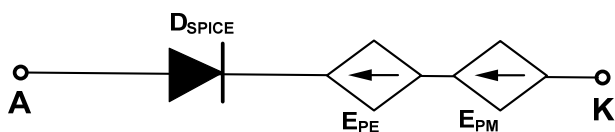
A zatem amplituda siły elektromotorycznej dla obwodu ustawionego prostopadle do linii sił pola magnetycznego wynosi

$$(4) \quad U_m = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot f \cdot B_m$$

Z postaci wzoru (4) wynika, że największe wartości siły elektromotorycznej będą powstawały w obwodach o dużych rozmiarach, przy dużej amplitudzie indukcji pola magnetycznego i wysokiej częstotliwości jego zmian. Przykładowo, dla $B_m = 1$ mT, $a = b = 1$ cm, $f = 1$ GHz wartość amplitudy siły elektromotorycznej wynosi aż 628 V.

Postać modelu diody

Zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdziale 2, sformułowano hybrydowy model diody p-n uwzględniający wpływ zewnętrznych pól elektrycznego oraz magnetycznego. Opracowany model jest dedykowany dla programu SPICE i ma formę podukładu. Reprezentację obwodową tego modelu pokazano na rys.1.



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa hybrydowego modelu diody p-n uwzględniającego wpływ zewnętrznych pól elektrycznego i magnetycznego

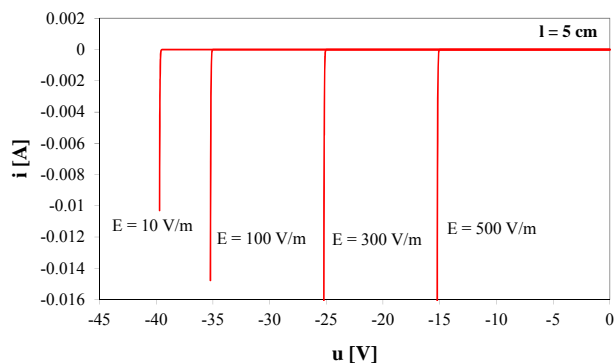
W przedstawionym modelu, dioda D_{SPICE} reprezentuje wbudowany w programie SPICE model diody p-n, opisany m. in. w pracy [5]. Sterowane źródło prądowe E_{PE} modeluje dodatkowy spadek napięcia związany z zewnętrznym polem elektrycznym. Napięcie wyjściowe tego źródła stanowi iloczyn natężenia tego pola przez długość wyprowadzeń diody. Z kolei, sterowane źródło napięciowe E_{PM} modeluje dodatkowy spadek napięcia na diodzie wynikający ze zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Napięcie na tym źródle dane jest wzorem (3).

Wyniki obliczeń

W celu wykazania praktycznej użyteczności modelu opisanego w rozdziale 3, zaimplementowano ten model w programie SPICE w postaci podukładu i dla arbitralnie wybranego zestawu wartości parametrów tego modelu wyznaczono charakterystyki badanej krzemowej diody p-n przy różnych wartościach parametrów charakteryzujących narażenia zewnętrzne. We wbudowanym w programie SPICE modelu diody przyjęto następujące wartości parametrów: $I_S = 18,18$ fA, $N = 1,162$, $R_S = 0,7323$ Ω , $I_{KF} = 0$, $X_{TI} = 3$, $E_G = 1,11$ eV, $C_{JO} = 3$ pF, $M = 0,3333$, $V_J = 0,5$ V, $FC = 0,5$, $I_{SR} = 159,2$ pA, $NR = 2$, $BV = 40$ V, $I_{BV} = 5$ μ A. Wartości te odpowiadają modelowi diody małej mocy BAS33 i zostały zaczerpnięte z biblioteki EDIODE.LIB programu PSPICE. Znaczenie wymienionych powyżej parametrów modelu oraz równania modelu zawarto m.in. w pracy [5].

Na kolejnych rysunkach zilustrowano wpływ wybranych parametrów charakteryzujących zewnętrzne narażenia na charakterystyki statyczne badanej diody. Dla lepszego zilustrowania wpływu poszczególnych czynników na charakterystyki tej diody, w poszczególnych obliczeniach tak dobrano wartości parametrów opisujących sterowane źródła E_{PE} oraz E_{PM} , aby wartość wielkości wyjściowej tylko jednego z tych źródeł była różna od zera. Na rys. 2-4 uwzględniono fakt, że prąd wsteczny diody jest ujemny.

Na rys. 2 przedstawiono charakterystyki wsteczne badanej diody uzyskane przy różnych wartościach narażenia zewnętrznego pola elektrycznego. W obliczeniach przyjęto, że odległość między końcówkami wyprowadzeń diody wynosi $l = 5$ cm.

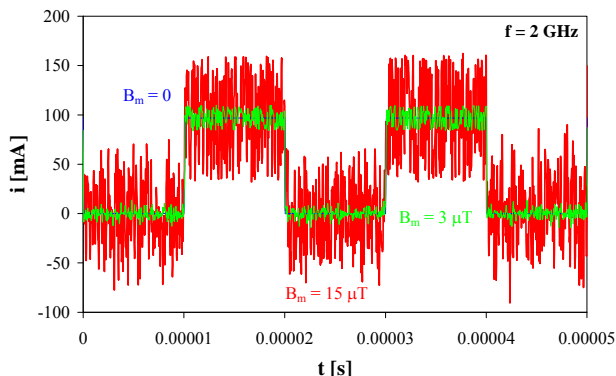


Rys. 2. Obliczone charakterystyki wsteczne diody p-n wyznaczone przy różnych wartościach natężenia zewnętrznego pola elektrycznego

Jak widać, na skutek działania zewnętrznego pola elektrycznego może nastąpić zmniejszenie napięcia przebicia diody (wynoszącego nominalnie 40 V), tzn. przy mniejszej wartości napięcia wstecznego na diodzie wystąpi zjawisko jej przebicia. Przesunięcie charakterystyki wstecznej rozważanej diody jest proporcjonalne do wartości natężenia pola elektrycznego. Prezentowane charakterystyki dotyczą skrajnie niekorzystnej sytuacji, gdy do napięcia zasilającego obwód polaryzujący diodę dodane jest napięcie wynikające z istnienia zewnętrznego pola elektrycznego, którego kierunek jest równoległy do osi badanej diody.

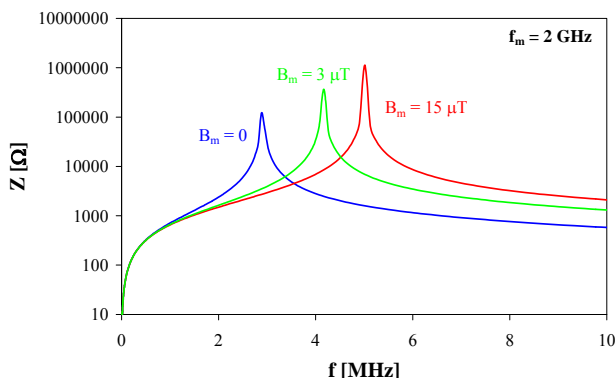
Oprócz omówionych charakterystyk statycznych istotne dla użytkownika są właściwości impulsowe rozważanych diod. Właściwości te zbadano symulacyjnie zasilając badaną diodę ze źródła sygnału prostokątnego o poziomach równych -30 V oraz 30 V, współczynnika wypełnienia 0,5 oraz częstotliwości 100 kHz przez rezystor o rezystancji równej 300 Ω . Uzyskane wyniki analiz stanów przejściowych rozważanego układu przy różnych amplitudach indukcji pola magnetycznego pokazano na

rys. 3. Na rysunku tym krzywe w kolorze niebieskim wyznaczono przy zerowej wartości B_m , krzywe zielone – przy $B_m = 3 \mu\text{T}$, a krzywe czerwone – przy $B_m = 15 \mu\text{T}$. Jak można zauważyć, przy zmianach amplitudy pola magnetycznego wzrasta amplituda zakłócających przebiegów napięcia. Przykładowo, przy amplitudzie $B_m = 15 \mu\text{T}$ wartość międzyszczytowa zakłóceń prądu diody wynosi aż 60 mA.



Rys. 3. Obliczone czasowe przebiegi prądu diody p-n podczas jej kluczenia wyznaczone przy polu magnetycznym o częstotliwości $f = 2 \text{ GHz}$

Diody p-n mogą być stosowane także w przestrajanych obwodach wejściowych odbiorników radiokomunikacyjnych, które mogą być przestrajane napięciem polaryzującym diodę. Z punktu widzenia poprawnej pracy takiego układu istotna jest selektywność i właściwe dostrojenie takiego obwodu wejściowego. Na rys. 4 Przedstawiono obliczone charakterystyki częstotliwościowe dwójnika stanowiącego równoległe połączenie badanej diody i cewki o indukcyjności równej $100 \mu\text{H}$.



Rys. 4. Obliczone charakterystyki częstotliwościowe obwodu złożonego z równoległe połączonej krzemowej diody p-n i cewki o indukcyjności $100 \mu\text{H}$ wyznaczone przy polu magnetycznym o częstotliwości $f = 2 \text{ GHz}$

Jak można zauważyć, na skutek oddziaływania zewnętrznego zmiennego pola magnetycznego następuje zmiana częstotliwości rezonansowej rozważanego obwodu pod wpływem zmiany amplitudy tego pola. Łatwo można zaobserwować, że przy zmianie wartości B_m w zakresie od 0 do $15 \mu\text{T}$ częstotliwość rezonansowa rozważanego obwodu prawie się podwaja. Oznacza to, że zewnętrzne zmienne pole magnetyczne może zakłócać pracę obwodów wejściowych odbiorników radiokomunikacyjnych zawierających diody pojemnościowe.

Podsumowanie

W niniejszej pracy przeanalizowano wybrane czynniki zewnętrzne wpływające na właściwości elementów półprzewodnikowych. Skupiono się na opracowaniu metody formułowania modeli tych przyrządów uwzględniających

wpływ tych czynników na charakterystyki statyczne tych przyrządów. Opracowaną metodę zastosowano do sformułowania autorskiego hybrydowego modelu diody p-n dla programu SPICE. Model ten wykorzystano do wyznaczenia charakterystyk diody małej mocy przy różnych wartościach parametrów charakteryzujących narażenia zewnętrzne.

Model ten wykorzystano do wyznaczenia charakterystyk statycznych oraz dynamicznych wybranej diody małej mocy przy różnych wartościach parametrów charakteryzujących zewnętrzne pole elektromagnetyczne. Stwierdzono, że pole to może powodować wzrost wartości prądu wstecznego diody lub spadek wartości napięcia wstecznego, przy którym występuje zjawisko przebicia złącza.

Z przeprowadzonych symulacji komputerowych wynika także, że zewnętrzne pole elektryczne o odpowiednio dużym natężeniu (jednak znacznie mniejszym od krytycznego natężenia pola elektrycznego w materiale półprzewodnikowym) może powodować przebicie złącza p-n. Także zjawisko indukcji elektromagnetycznej może powodować generowanie impulsów napięcia, które mogą istotnie obniżyć odporność diod p-n na napięcie wsteczne. Nawet przy bardzo małych wartościach amplitudy indukcji pola magnetycznego i wysokiej częstotliwości zmian pola magnetycznego obniżenie dopuszczalnej wartości napięcia wstecznego diod p-n może być znaczne. Podobne wnioski można przedstawić również dla złączy m-s oraz dla struktury MOS.

Ciekawym spostrzeżeniem jest zmiana wartości częstotliwości rezonansowej obwodu LC, w którym wykorzystywana jest pojemność diody przestrajanej napięciem, pod wpływem zewnętrznego zmiennego pola magnetycznego. Diody takie są często stosowane w obwodach wejściowych odbiorników radiokomunikacyjnych, a zaobserwowane zjawisko może powodować zakłócenia w pracy takich urządzeń.

Przedstawiony sposób formułowania hybrydowego modelu diody p-n uwzględniającego wpływ zewnętrznego pola elektromagnetycznego może być zastosowany do formułowania takich modeli również dla innych przyrządów półprzewodnikowych.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, dr hab. inż. Witold J. Stepowicz, prof. UMG, dr inż. Paweł Górecki, dr inż. Damian Bisewski, dr inż. Kalina Detka, dr inż. Przemysław Ptak, dr inż. Jacek Dąbrowski, dr inż. Małgorzata Godlewska, mgr inż. Kamil Bargiel, mgr inż. Joanna Szelągowska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl; j.zarebski@we.umg.edu.pl; wjs@am.gdynia.pl; p.gorecki@we.umg.edu.pl; d.bisewski@we.umg.edu.pl; k.detka@we.umg.edu.pl; p.ptak@we.umg.edu.pl; j.dabrowski@we.umg.edu.pl; m.godlewska@we.umg.edu.pl; k.bargiel@we.umg.edu.pl; j.szelagowska@we.umg.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Hasse L., Karkowski Z., Spiralski L., Kołodziejki J., Konczakowska A.: Zakłócenia w aparaturze elektronicznej. Radioelektronik Sp. z o.o., Warszawa, 1995.
- [2] Gajewski P., Turczyński J.: Cyfrowe układy scalone CMOS. WKŁ, Warszawa, 1990.
- [3] Rashid M.H., Rashid H.M.: Spice for Power Electronics and Electric Power, 2006, CRC press.
- [4] Maksimovic D., Stankovic A.M., Thottuvelil V.J., Verghese G.C.: Modeling and simulation of power electronic converters, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 6, 2001, s. 898-912.
- [5] Wilamowski B., Jager R.C.: Computerized circuit Analysis Using SPICE Programs, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [6] Górecki P., Górecki K., Zarębski J.: Modelling the temperature influence on dc characteristics of the IGBT, Microelectronics Reliability, Vol. 79, 2017, pp. 96-103.

- [7] Zarębski J., Górecki K.: SPICE-aided modelling of dc characteristics of power bipolar transistors with selfheating taken into account, *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 22, No. 6, 2009, pp. 422-433.
- [8] Zarębski J., Górecki K.: The electrothermal large-signal model of power MOS transistors for SPICE. *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 25, No. 5-6, 2010, pp. 1265 – 1274.
- [9] Górecki K., Zarębski J.: Modeling Nonisothermal Characteristics of Switch-Mode Voltage Regulators, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 1848–1858.
- [10] Zarębski J., Dąbrowski J.: Investigations of SiC merged pin Schottky diodes under isothermal and non-isothermal conditions, *International Journal of Numerical Modelling – Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 207–217.
- [11] Starzak Ł., Zubert M., Janicki M., Torzewicz T., Napieralska M., Jabłoński G., Napieralski A.: Behavioral approach to SiC MPS diode electrothermal model generation, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 60, No. 2, 2013, pp. 630-638.
- [12] Górecki K.: A new electrothermal average model of the diode-transistor switch. *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, No. 1, 2008, pp. 51-58.
- [13] Schurack E., Rupp W., Latzel T., Gottwald A., Analysis and Measurement of Nonlinear Effects in Power Amplifiers Caused by Thermal Power Feedback, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems – ISCAS'92*, Vol. 2, San Diego 1992, pp. 758-761.
- [14] Herman A., Kalestyński A., Widomski L.: *Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie*. PWN, Warszawa, 1984.