

Technologia wytwarzania sub-mikrometrowych diod tunelowych typu MIM

Streszczenie. Rozwój układów scalonych wymaga od współczesnej mikroelektroniki opracowania, wytwarzania oraz weryfikacji przyrządów półprzewodnikowych o coraz lepszych parametrach. Rozwój można podzielić na wiele współczesnych trendów takich jak: (i) zwiększenie częstotliwości pracy, (ii) miniaturyzacja, (iii) obniżenie zużycia energii oraz (iv) redukcja ceny. Dla każdego z prezentowanych trendów mikroelektronika wykonała bezprecedensowy postęp, dzięki któremu możliwe było osiągnięcie poziomu rozwoju charakterystycznego dla aktualnego stanu Przemysłu 4.0. Wraz z pojawieniem się nowych urządzeń dla Internetu Rzeczy (IoT) czy komunikacji terahercowej (THz), pracujących na bardzo wysokich częstotliwościach, powstała naturalna potrzeba konstrukcji (i)tanich, (ii)kompatybilnych z masową produkcją oraz (iii) w pełni zintegrowanych urządzeń na ultra-wysokie częstotliwości. W tym kontekście diody MIM (ang. Metal-Insulator-Metal) budzą coraz większe zainteresowanie. W pracy zaprezentowano poszczególne etapy wytwarzania struktur MIM na potrzeby diod tunelowych. Proces jest w pełni kompatybilny z technologią CMOS i składa się z wielu procesów m.in: wytwarzania warstw dielektrycznych, osadzania warstw metalicznych, odwzorowania kształtów, trawienia warstw oraz proces typu lift-off. Otrzymane struktury MIM zostały scharakteryzowane elektrycznie.

Abstract. Development of integrated circuits put modern microelectronics in position of constantly providing devices with better performances. This development is manifested by multiple indicators and trends including: (i) operational frequency, (ii) miniaturization, (iii) minimization of losses, (iv) falling price, etc. In each of the aforementioned trends the microelectronics marked unprecedented progress, making the 3rd and 4th industrial revolution possible. With emerging new markets e.g. Internet of Things (IoT) or Terahertz communication (THz), both operating at very high frequencies, enormous need of (i) cheap; (ii) industrially compatible; (iii) operating at high frequencies and (iii) fully integrated devices appeared. In this context MIM (Metal Insulator Metal) diodes are gaining more and more interest. In this work we demonstrate the fabrication process flow of MIM structure acting as tunneling diodes. Presented fabrication technology is fully CMOS-compatible and consists sequence of processes including: dielectric layer deposition, metal layer sputtering, electron beam lithography, etching and metal lift-off. Subsequently after fabrication the MIM diodes were electrically characterized. (**Technology of sub-micrometer MIM tunnel diodes**)

Słowa kluczowe: metal-dielektryk-metal, trawienie warstw metalicznych, elektronolitografia

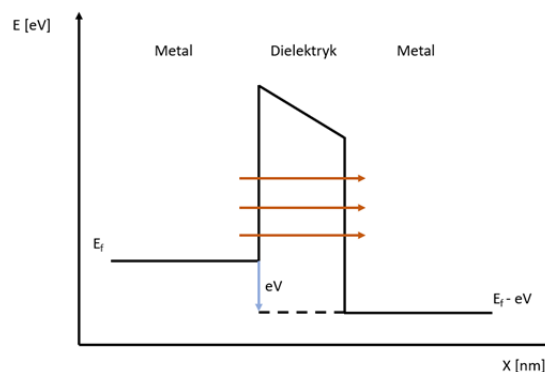
Keywords: metal-insulator-metal, metallic layers etching, electron beam lithography

Wstęp

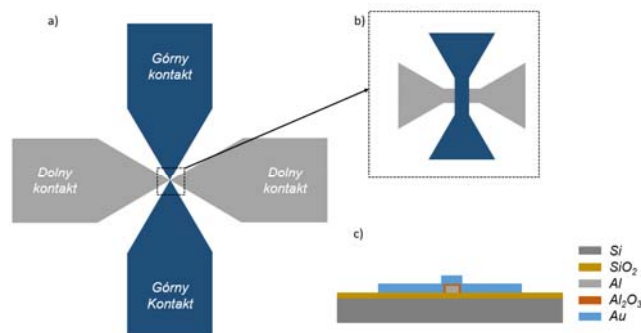
Diody tunelowe typu Metal-Dielektryk-Metal (ang. *Metal-Insulator-Metal* - MIM) ze względu na szybkość działania [1] są interesujące z punktu widzenia: (i) detekcji sygnałów wielkiej częstotliwości (*promieniowanie terahercowe (THz)*) [2][3][4], (ii) konstrukcji anten prostujących (ang. *rectenna*) [5][6], (iii) komunikacji bezprzewodowej. Transport nośników w strukturze MIM następuje w wyniku tunelowania elektronów z obszaru metalowej elektrody przez cienki dielektryk do drugiej elektrody pod wpływem przyłożonego napięcia V . Proces tunelowania jest z natury zjawiskiem bardzo szybkim. Na Rys. 1 przedstawiono schematycznie diagram pasmowy struktury MIM. Przykładając napięcie V zmieniamy kształt bariery potencjału w obszarze dielektryka, co wpływa na prąd płynący przez strukturę. Stała czasowa RC takiego przyrządu jest zdeterminowana przez rezystancję złącza R (oraz ew. anteny, która jest podłączona do przyrządu) oraz jego pojemność C . Z tego względu do kluczowych parametrów konstrukcyjnych takiego przyrządu należy zaliczyć grubość dielektryka oraz powierzchnię złącza, które bezpośrednio wpływają na wartość parametrów R i C . Ważny jest również wybór materiałów elektro metalowych oraz dielektryka znajdującego się pomiędzy nimi. Odpowiedni dobór materiałów pozwala kształtować charakterystyki I-V przyrządu [1]. Rezystancja przyrządu R jest również ważna z punktu widzenia dopasowania impedancji do anteny. Natomiast parametr $R_p = 1/2(I''/I')$ (ang. *responsivity*) określa zdolność prostujące przyrządu dla danego punktu pracy.

W niniejszej pracy przedstawiono technologię wytwarzania struktur MIM o rozmiarach sub-mikrometrowych na potrzeby konstrukcji diod tunelowych. Rys. 2 przedstawia schemat wykonanej struktury MIM. W

dalszej części pracy omówiono technologię oraz przedstawiono przykładowe charakterystyki I-V wytworzonej diody.



Rys. 1. Schematyczny rysunek diagramu pasmowego diody MIM.

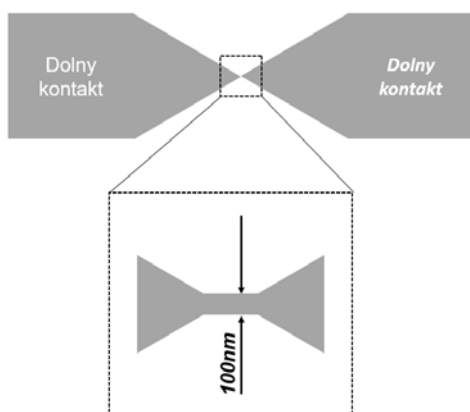


Rys. 2 Schemat struktur MIM a) projekt struktury, b) kształt elektrod struktur MIM, c) przekrój poprzeczny struktury.

Opis eksperymentu

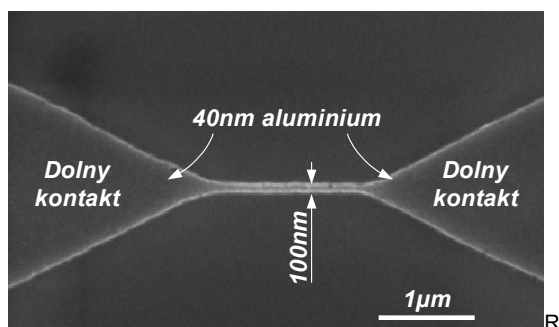
Technologia struktur MIM została opracowana dla 2-calowych podłoży krzemowych typu p o orientacji $\langle 100 \rangle$. Pierwszym etapem było usunięcie zanieczyszczeń organicznych w roztworze Pirania ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ 3:1) oraz mycie w standardowych roztworach SC1, SC2. Następnie w celu usunięcia tlenu natywnego wykonano kąpiel w roztworze buforowym kwasu fluorowodorowego (HF) w czasie 1 minuty. Przygotowane w ten sposób podłoże zostało poddane procesowi mokrego utleniania w temperaturze 1000°C w mieszaninie tlenu (8l/min) oraz wodoru (8l/min). W wyniku prowadzonego w czasie 3 godzin procesu otrzymano tlenek o grubości 585nm. Wytworzona warstwa dwutlenku krzemu (SiO_2) pełni funkcje dielektryka separującego strukturę MIM od podłoża krzemowego.

Na tak przygotowany dielektryk osadzono metodą magnetronowego rozpylania warstwę aluminium o grubości 40nm, która pełni rolę dolnej elektrody struktury MIM. Następnie wykonano pierwszy etap litografii z wykorzystaniem rezystu pozytywowego z rodziny PMMA za pomocą urządzenia JEOL JBX-9300-FS. Rys. 3 przedstawia topologię struktury wykonanej w pierwszym etapie litografii. Wymiar krytyczny wynosi 100 nm.



Rys. 3 Kształt dolnej elektrody struktury MIM wraz z wyprowadzonymi kontaktami.

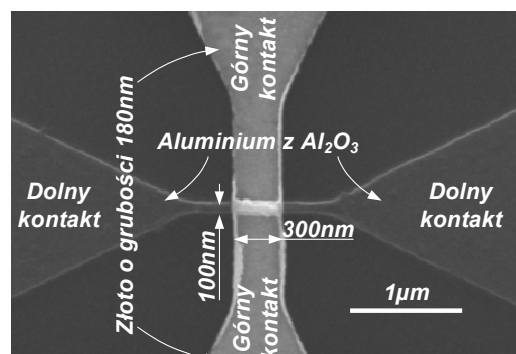
Po wywołaniu rezystu niezamaskowane obszary aluminium zostały całkowicie wytrawione plazmowo w urządzeniu Cobra 100 firmy Oxford. Rys. 4 przedstawia zdjęcie SEM wytrawionej struktury. Szerokość struktury wynosi 100 nm.



ys. 4 Zdjęcie dolnej elektrody struktury MIM po procesie suchego trawienia aluminium wykonane skaningowym mikroskopem elektronowym.

Po procesie trawienia struktury zostały poddane procesowi utleniania w celu uformowania tlenku glinu (Al_2O_3). Proces wykonano przy temperaturze podłoża 300°C w atmosferze tlenu uzyskując warstwę Al_2O_3 o grubości kilku nm.

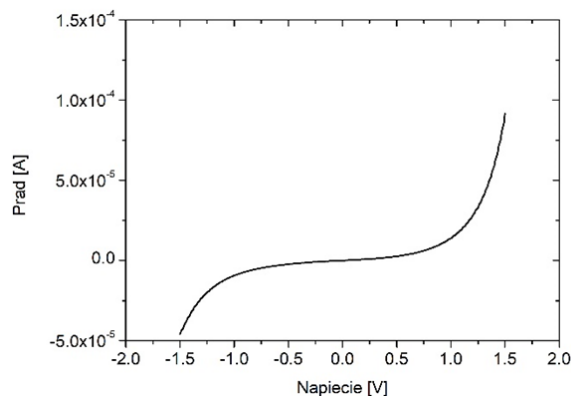
W celu uformowania górnych kontaktów wykonano drugi etap elektronolitografii. Po wywołaniu pokryto całą strukturę warstwą złota o grubości 180 nm. Górną elektrodę struktury MIM stanowiła warstwa złota, której kształt został zdefiniowany w procesie zrywania (ang. lift-off) warstwy metalu osadzonej na warstwie rezystu. Ostatnim krokiem procesu *lift-off* jest usunięcie rezystu. W konsekwencji metal jest odrywany wyłącznie w obszarach na rezysty. W przeciwnym przypadku, kiedy pod metalem nie ma warstwy rezystu, pozostaje on na próbce. Rys. 5 przedstawia wykonaną strukturę po ukończonym procesie produkcyjnym. Szerokość poziomej metalizacji (*dolny kontakt*) wynosi 100 nm natomiast szerokość pionowej metalizacji (*górnny kontakt*) wynosi 300 nm.



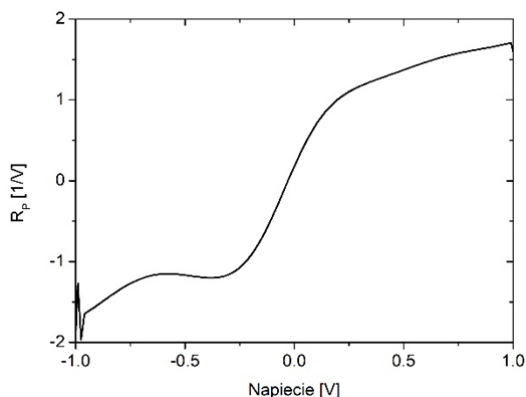
Rys. 5. Obraz struktury MIM po zakończeniu procesów technologicznych. Zdjęcie wykonano z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego.

Pomiary elektryczne

Wykonane struktury zostały zmierzone elektrycznie z wykorzystaniem dedykowanej stacji ostrzowej oraz systemu dedykowanego do charakteryzacji przyrządów półprzewodnikowych Keithley 4200-SCS. Na Rys. 6 została przedstawiona charakterystyka prądowo-napięciowa przykładowej diody MIM wytworzonej zgodnie z opisanym procesem technologicznym. Asymetria charakterystyki prądowo-napięciowej wynika z różnicy prac wyjścia materiałów elektrody dolnej i górnej co sprawia, że struktura nie jest symetryczna. Różnica prac wyjścia pomiędzy Au i Al wpływa na kształt charakterystyki I-V. Na Rys. 7 została przedstawiona zależność R_p w funkcji napięcia przyłożonego do przyrządu, wyznaczona na podstawie charakterystyki I-V. Widać, iż zależność jest asymetryczna. Dla niskich wartości napięć obserwujemy szybki wzrost parametru R_p , natomiast wraz ze zwiększaniem napięcia, obserwujemy słabszą zależność wzrostu współczynnika w funkcji napięcia. Wartość R_p dla $V=1.0$ V wynosi 1.7 1/V.



Rys. 6. Zmierzona charakterystyka prądowo-napięciowa wytworzonej diody MIM.



Rys. 7. Parametr R_p w funkcji napięcia V dla przyrządu z Rys. 6.

Podsumowanie

W niniejszej pracy została przedstawiona opracowana technologia wytwarzania sub-mikrometrowych diod tunelowych typu MIM. Został opisany proces technologiczny wykorzystujący litografię elektronową jako kluczową technikę pozwalającą na odwzorowanie głęboko sub-mikrometrowych kształtów. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wykonanego przyrządu MIM (Al/Al₂O₃/Au). Dalsze prace technologiczne oraz charakterystyczne są konieczne, aby zweryfikować potencjał opisanych przyrządów w zastosowaniach detekcji sygnałów wysokoczęstotliwościowych.

Prace zostały częściowo zrealizowane w ramach projektu Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, grant nr MAB/2018/9.

Autorzy: mgr inż. Bartłomiej Stonio, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: bartlomiej.stonio@pw.edu.pl; dr inż. Piotr Wiśniewski, Politechnika Warszawska, Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii ul. Poleczki 19, 02-822 Warszawa, E-mail: piotr.wisniewski@pw.edu.pl; dr inż. Maciej Haras, Politechnika Warszawska, Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii ul. Poleczki 19, 02-822 Warszawa, E-mail: maciej.haras@pw.edu.pl; dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: msochack@imio.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] I. E. Hashem, N. H. Rafat, and E. A. Soliman, "Theoretical study of metal-insulator-metal tunneling diode figures of merit," *IEEE J. Quantum Electron.*, 49 (2013), no. 1, pp. 72–79
- [2] C. Fumeaux, W. Herrmann, F. K. Kneubühl, and H. Rothuizen, "Nanometer thin-film Ni-NiO-Ni diodes for detection and mixing of 30 THz radiation," *Infrared Physics and Technology*, 39(1998), no. 3. Elsevier, pp. 123–183
- [3] E. G. Arsoy, M. Inac, A. Shafique, M. Ozcan, and Y. Gurbuz, "The metal-insulator-metal diodes for infrared energy harvesting and detection applications," *Infrared Technology and Applications XLII*, 9819 (2016), p. 98190F
- [4] S. Krishnan, S. Bhansali, E. Stefanakos, and Y. Goswami, "Thin Film Metal-Insulator-Metal Junction for Millimeter Wave Detection," *Procedia Chemistry*, 1 (2009), no. 1, pp. 409–412
- [5] G. Jayaswal, A. Belkadi, A. Meredov, B. Pelz, G. Model, and A. Shamim, "Optical rectification through an Al₂O₃ based MIM passive rectenna at 28.3 THz," *Mater. Today Energy*, 7 (2018), pp. 1–9
- [6] L. Lutiani Silva, V. Almeida, N. A. S. Gomes, N. Adriano dos Santos Gomes, and V. Rosa Almeida, "Metal-insulator-metal tunnel diodes on micro/nano antennas for energy harvesting and detector applications." *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2017, pp. 1-5