

- [3] Bencs L., Horvath V., Varga I., Beregi E., Kantor T.: Analysis of yttrium aluminium borate crystals by solution-based methods: inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and flame atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B* 59 (2004) 1851-1859
- [4] Busiew A. I., Tipcowa W. G., Iwanow W. M.: Chemia analityczna pierwiastków ziem rzadkich, WNT, 1982
- [5] Minczewski J., Marczenko Z.: Chemia analityczna, PWN 1965
- [6] Marczenko Z.: Spektrofotometryczne oznaczanie pierwiastków, WNT 1979
- [7] Kohei Ametani: AAS determination of rare earths (Y, Eu, Gd, Dy, Ho, Er) in single crystals of magnetic garnets and sulfides, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 47, (9), 2238-2241
- [8] GBC Scientific Application Notes: Determination of aluminium, iron and silicon in rock samples
- [9] GBC Scientific Application Notes: The measurements of Fe, Al, Ca and Mg in FeSi and FeSiMg samples by FAAS
- [10] Sprawozdanie ITME 2009

ZASTOSOWANIE PROCESU BOSCHA DO PLAZMOWEGO TRAWIENIA KRZEMU

Krzysztof Góra, Andrzej Kozłowski

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa
e-mail: krzysztof.gora@itme.edu.pl

W pracy opisano wielostopniowy proces plazmowy powszechnie znany jako proces Boscha. Składa się on z wielokrotnie powtarzanych sekwencji kroków trawienia i pasywacji. Dzięki temu można otrzymać w krzemie bardzo głębokie struktury o wysokim współczynniku kształtu. Proces zaimplementowano na urządzeniu Alcatel 601E. Końcowym efektem opracowanej procedury jest wytrawiony profil o wysokim współczynniku kształtu, pionowych ścianach i gładkiej powierzchni.

Słowa kluczowe: proces Boscha, ICP, trawienie plazmowe krzemu, współczynnik kształtu

Bosch process for silicon plasma etching

This paper reports on two step time multiplexed plasma etch process, widely known as a Bosch process. The Bosch process was implemented on Alcatel 601E plasma reactor. On the basis of this patented process we created the procedure to achieve high aspect ratio submicron trenches in silicon. A deep silicon etching Bosch process in ICP reactive ion plasma reactor was based on SF₆/C₄F₈ chemistry. Process consists of two alternating etching and deposition cycles. In thirstep, SF₆ a very effective source of F* radicals is responsible for etching. In second step C₄F₈ gas creates polymers layer that protect side wall from lateral etching. This technique consisting of series alternating etch and deposition cycles(each lasts only a few seconds) produces high aspect ratio features. The etch rate and thickness of deposition layer are controlled by gas flow and cycle time, respectively. Created recipe can be used to etch silicon high aspect ratio features with smooth vertical walls.

Key words: Bosch process, ICP, plasma etching, high aspect ratio, silicon etched profile

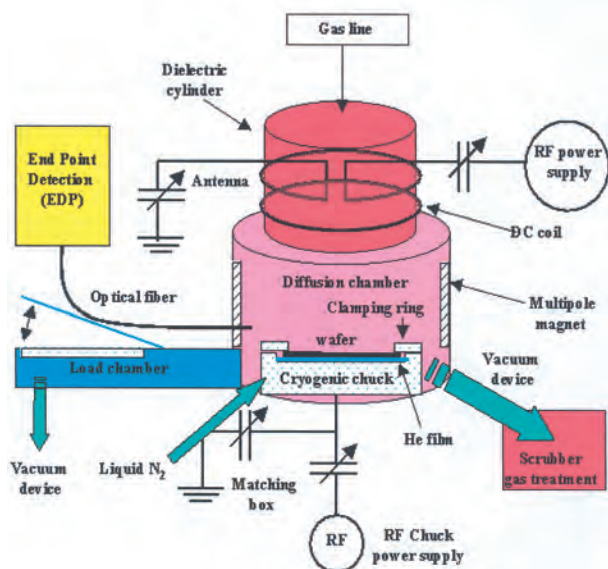
1. WSTĘP

Proces Boscha rozwinięty i opatentowany przez firmę Robert Bosch GmbH [1] jest plazmowym procesem głębokiego trawienia krzemu. Jak każdy proces reaktywnego trawienia wykorzystuje on dwa mechanizmy: chemiczny-polegający na izotropowej reakcji z materiałem podłoża i mechaniczny-polegający na rozpylaniu przyspieszonymi w polu elektrycznym plazmy jonami. W wyniku tego procesu otrzymuje się anizotropowe trawienia o pionowych ścianach, niezależne od orientacji krystalograficznej krzemu. Proces ten zyskał dużą popularność i jest szeroko stosowany przy produkcji układów wysokiej skali integracji. Jego podstawową zaletą jest bardzo wysoka anizotropowość trawienia. Charakteryzuje się on też: wysoką selektywnością, brakiem utraty wymiaru krytycznego, nie występuje też w nim podcinanie maski. Proces Boscha jest złożeniem powtarzanych kilkusekundowych kroków trawienia i osadzania w wyniku czego wzór z fotorezystywnej lub tlenkowej maski jest przenoszony na podłoże krzemowe.

2. OPIS EKSPERYMENTU

Proces przeprowadzono na płytkach krzemowych o średnicy \varnothing 100 mm orientacji krystalograficznej $\langle 100 \rangle$, domieszkowanych borem, o oporności $1 \div 10 \Omega \text{cm}$ i grubości około 500 μm . W nałożonym na płytce rezyście naświetlono i wywołało wzór złożony z sekwencyjnie ułożonych pasków. Pod mikroskopem optycznym o powiększeniu 200 lub 500 \times można było ocenić wizualnie głębokość trawienia, trawienie boczne oraz zaobserwować kąt pochylenia ściany. Obserwacja bezpośrednio przy stanowisku była niezbędna do korekcji parametrów procesu w celu uzyskania zamierzonego wyniku. Wynikiem eksperymentu miał być przeniesiony z maski wzór, wytrawiony w krzemie.

Proces trawienia wykonano na reaktorze plazmowym ICP 601E firmy Alcatel przedstawionym schematycznie na Rys. 1. Urządzenie umożliwia generowanie wysokiej gęstości wolnych rodników fluorowych wraz z kontrolowalną obecnością w plazmie wysokoenergetycznych jonów. Duża gęstość rodników jest niezbędna do chemicznego szybkiego trawienia, proporcjonalnego do ich strumienia docierającego do powierzchni płytki. Wysokoenergetyczne jony odpowiadają za trawienie mechaniczne, ukierunkowane przyłożonym polem elektrycznym.



Rys. 1. Schemat reaktora ICP Alcatel 601E (otrzymane od Adixen Alcatel Vacuum Technology).

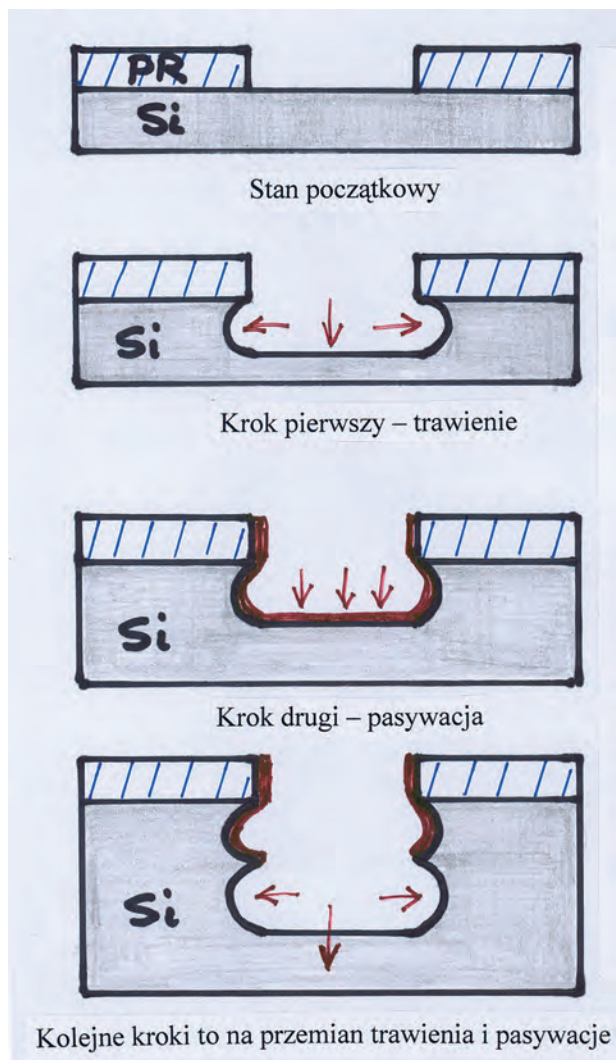
Fig. 1. Diagram of the ICP Alcatel 601E reactor (by courtesy of Adixen Alcatel Vacuum Technology).

Reaktor posiada generator rf o mocy 2 kW i częstotliwości pracy 13,56 MHz sprzężony z plazmą za

pomocą anteny, która otacza cylinder dielektryczny. Źródło plazmy znajduje się w górnej części komory. Cewka umieszczona dookoła źródła wytwarza pole magnetyczne, wygenerowane rodniki dyfundują do komory dyfuzyjnej. U góry cylindra znajduje się wlot gazów i otwór pozwalający na zamocowanie optycznych wzierników monitorowania procesu. Wzbudzenia plazmy ICP dokonuje się poprzez kolizje cząstek. Pole elektromagnetyczne oscyluje z częstotliwością 13,56 MHz. Elektronów poruszają się zgodnie ze zmianą polaryzacji w zmiennym polu, w przeciwieństwie do jonów, które są zbyt ciężkie. Elektronów w czasie zderzeń nieelastycznych jonizują wprowadzany gaz reaktywny wytwarzając plazmę. Umieszczona wokół źródła cewka wytwarza pole magnetyczne zacieśniające obszar plazmy i ograniczające straty elektronów na ściankach. Komora dyfuzyjna znajduje się między źródłem plazmy i stolikiem. Wokół niej rozlokowane są magnesy stałe ograniczające i stabilizujące gęstość plazmy. Uchwyt płytek zamontowany jest na płycie dolnej, wraz z nim płytka półprzewodnikowa jest dociskana mechanicznie obrzeżem do obejmy komory dyfuzyjnej reaktora. Elektroda uchwytu jest spolaryzowana, przyciągając i przyspieszając jony z plazmy. Napięcie to jest regulowane generatorem podłoża rf o mocy do 500W.

Na Rys. 2 pokazano schematycznie istotę procesu. W kroku pierwszym wykorzystuje się gaz reakcyjny SF_6 jako źródło rodników fluorowych, ich reakcja z podłożem krzemowym jest odpowiedzialna za trawienie. W jej wyniku tworzy się lotny związek SiF_4 usuwany ze środowiska reakcji przez pompy. Krok ten trwa tylko kilka sekund. W kroku drugim powstaje warstwa polimeru osadzająca się na dnie wgłębienia i ściankach. Warstwa jest szczelna, zwarta i nie reaguje z rodnikami fluorowymi. Teraz w kroku pierwszym kolejnej sekwencji, jony jakie wytworzyły się w plazmie i które towarzyszą generacji aktywnych rodników są przyspieszane napięciem odłożonym na dolnej elektrodzie. Ruch ich jest prostopadły do powierzchni podłoża. Umożliwia to usunięcie polimeru z dna. Odsłonięta powierzchnia reaguje z rodnikami fluorowymi. Proces trawienia przebiega w sposób niezakłócony. Jony poruszające się w kierunku prostopadłym do podłoża nie mogą usunąć filmu polimerowego ze ściany bocznej. Dzięki temu nie zachodzi tam reakcja chemiczna z fluorem. Nie ma trawienia na bok. Wielokrotnie powtarzana sekwencja głęboko i pionowo trawi wymagany wzór. Oba kroki procesu są bardzo krótkie, kilkusekundowe. Głębokość na jaką można wytrawić krzem jest praktycznie dowolna. Będzie zależała od liczby sekwencji kroków trawienia i pasywacji oraz grubości maski. Średnie selektywności trawienia

Si w stosunku do typowej maski z fotorezystu są rzędu 20, a w stosunku do maski SiO_2 rzędu 100. Przy grubości płytki $\sim 500 \mu\text{m}$ do jej wytrawienia na wylot wymagane będzie zastosowanie tlenku krzemu $5 \mu\text{m}$ grubości.



Rys. 2. Sekwencje „kroków” trawienia i osadzania w procesie Boscha.

Fig. 2. Alternating etch and deposition in the Bosch process.

Główną różnicą pomiędzy procesami kriogenicznym i Boscha jest sposób pasywacji ścian bocznych. W procesie Boscha warstwa pasywacyjna tworzy się poprzez osadzenie na ściankach fluorowęglowego teflonopodobnego polimeru z plazmy, reaktywnego gazu C_4F_8 . W procesie kriogenicznym nie używa się związku C_4F_8 . Tworzy się warstwa blokująca SiO_xF_y z gazu reakcyjnego SF_6 i O_2 o grubości $\sim 10\div 20 \text{ nm}$. Temperatura rzędu -140°C powoduje kondensację par SiO_xF_y do ściany, co zapobiega jej trawieniu przez rodniki fluorowe. Możliwe jest tylko trawienie w głąb Si. W obu procesach reakcja

trawienia jest podobna, różne sposoby pasywacji ścian bocznych. Zawsze blokowane jest trawienie na bok. Dno wzoru trawi się, gdyż nie ma protektora usuniętego przez jony. Niekorzystną cechą procesu kriogenicznego jest negatywny wpływ niskiej temperatury na substancje organiczne takie jak fotorezyst maski [3]. Rezyst pęka w wyniku skurczu związanego z bardzo niską temperaturą, traci szczelność i tym samym źle maskuje obszary nie przeznaczone do trawienia. Proces Boscha nie ma tej wady. Można zastosować powszechnie używany w fotolitografii rezyst i trawić głębokie wzory. Inną cechą wyróżniającą proces Boscha są otrzymywane profile trawienia. Charakteryzują się one nadzwyczaj wysokimi współczynnikami kształtu (high aspect ratio), w wielu wypadkach przekraczającymi wartość 100 [2]. Osiąga się to dzięki sekwencyjności procesu. Przełączanie gazów zapewnia wymianę czynnika trawiącego w wąskiej głębokiej szczelinie. Proces ciągły nie zapewnia tak skutecznej wymiany czynnika trawiącego. Z przebiegiem reakcji trawienia spada jej szybkość. Po procesie Boscha może występować podwyższona chropowatość na ścianach i dnie wytrawienia, można to wyeliminować stosując procedurę z maksymalną ilością sekwencji kroków, z możliwie najkrótszymi czasami ich trwania. Powoduje to niestabilność napięcia odłożonego. W takim wypadku pracą generatora polaryzującego podłoże. Zwiększona zawartość SF_6 w mieszance gazowej zwiększa szybkość trawienia z powodu większej ilości rodników fluorowych, natomiast obniżenie ciśnienia procesu Boscha zwiększa jednorodność trawienia.

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW

W Tab. 1 podano ostateczne parametry opracowanej implementacji procesu Boscha do głębokiego trawienia krzemu na urządzeniu Alcatel 601E. Podano przepływy gazów reakcyjnych, czasy poszczególnych kroków oraz wartości mocy generowanej plazmy.

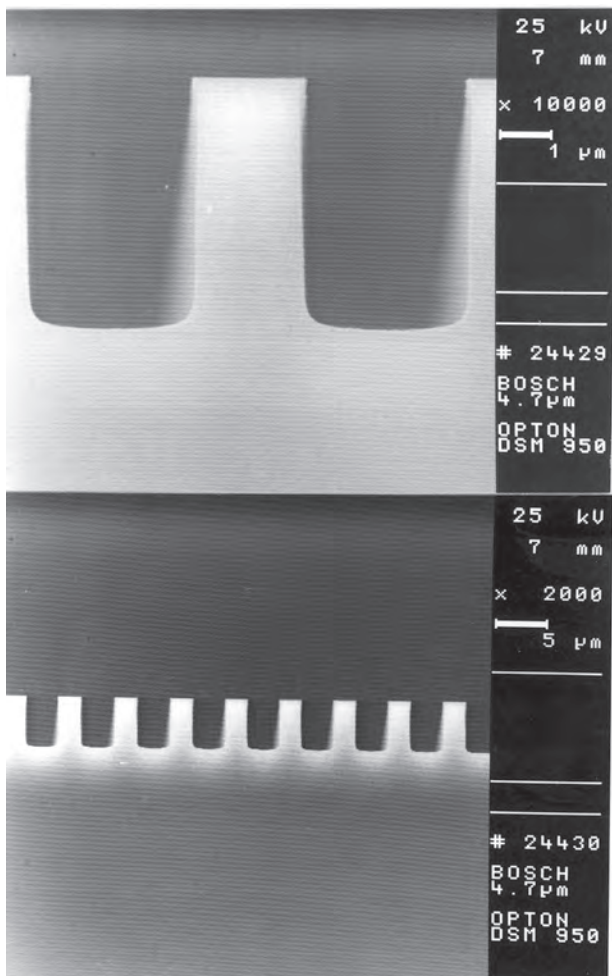
Tabela 1. Parametry procesu Boscha.

Table 1. Parameters of the Bosch process.

Parametr procesu Bosch	Wartość parametru
Przepływ SF_6	150 cm^3
Przepływ C_4F_8	90 cm^3
Czas trawienia	2 sek.
Czas pasywacji	1 sek.

Parametr procesu Bosch	Wartość parametru
Moc generatora źródła	1200 W
Moc generatora podłoża	30W
Temperatura podłoża płytki	20 °C
Próżnia początkowa	2×10^{-7} mbar

Na Rys. 3 przedstawiono zdjęcie z mikroskopu skaningowego profilu wytrawionego w krzemie. Zestawiono dwa różne powiększenia tego samego przekroju.



Rys. 3. Proces Boscha - wytrawiony profil w Si.

Fig. 3. Bosch process-cross view of a silicon etched trench.

Widoczny jest precyzyjnie wytrawiony wzór. Nie ma oznak chropowatości na powierzchni ściany bocznej. Brzegi jak i samo dno są gładkie. Nie zaobserwowano pozostałości polimeru po procesie. Ściany są równe, proste i prostopadłe do podłoża.

W dobie nieustannej miniaturyzacji i konieczności upakowania na płytce coraz większej ilości elementów, co wiąże się z trawieniem coraz węższych ścieżek o znacznych głębokościach profilu, proces Boscha ze swymi zaletami w pełni odpowiada stawianym wymaganiom.

4. LITERATURA

- [1] Larmer F., Schilp A.: Patents DE4241045, US 5501893, EP 625285
- [2] Abdolvand R., Ayazi F.: An advanced reactive ion etching process for very high aspect-ratio sub-micron wide trenches in silicon, *Sensors and Actuators A*, (2008) 109-116
- [3] Murakami K., Wakabayashi Y., Minami K.: Cryogenic dry etching for high aspect ratio microstructures; Proceedings of IEEE MEMS Conference (1993) 65-70