

# Lech Kazimierz BOROWICZ<sup>1</sup>, Paweł BOROWICZ<sup>2</sup>, Witold RZODKIEWICZ<sup>1</sup>, Krzysztof PISKORSKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AL. LOTNIKÓW 32/46, 02-668 WARSZAWA (INSTYTUT TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ)

<sup>2</sup>UL. KASPRZAKA 44/52, 01-224 WARSZAWA (INSTYTUT CHEMII FIZYCZNEJ)

## Pomiary naprężeń w strukturach MOS metodą interferencyjną i za pomocą elipsometrii spektroskopowej

dr inż. Lech Kazimierz BOROWICZ

Urodzony w Trokach w 1934 roku. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w zakresie Optyki Instrumentalnej w 1967 roku. Jest autorem i współautorem licznych artykułów dotyczących technik laserowych i ich wykorzystania w okulistyce. Obecnie jako pracownik Instytutu Technologii elektronowej w Warszawie zajmuje się badaniem właściwości optycznych struktur MOS.



e-mail: lbor@ite.waw.pl

### Streszczenie

Zmierzone parametry elektryczne struktur MOS wskazują na obecność naprężeń mechanicznych panujących w tlenku pod powierzchnią bramki metalowej. Przyjęto do badań dwie metody optyczne: elipsometrii i mikro-interferometrii. Do oceny ugięcia prążków interferencyjnych spowodowanego zmianami drogi optycznej w warstwie dielektryka pod wpływem naprężeń stworzono oprogramowanie komputerowe oparte na regresji nieliniowej. Inny sposób oceny tej wielkości wykorzystuje ekwidensytometrię. Pomiary optyczne pozwoliły wyznaczyć niektóre składowe tensora naprężeń w warstwie dielektryka sąsiadującej z krawędzią bramki.

**Słowa kluczowe:** struktury MOS, naprężenie, interferometria, elipsometrii, parametry elektryczne

### Stress determination of MOS structures by interference and spectroscopic ellipsometry methods

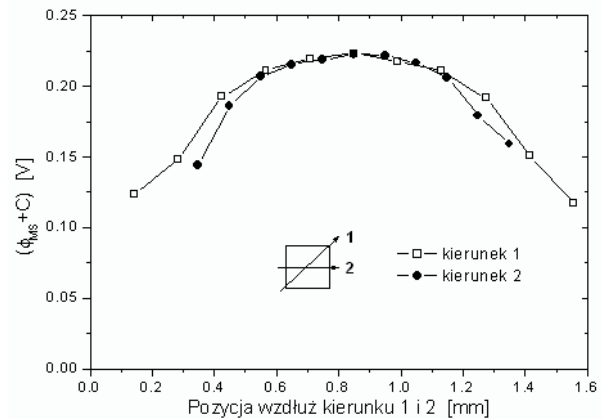
#### Abstract

Observed changes in some electrical parameters of MOS structures indicate existence of stresses in SiO<sub>2</sub> layer under aluminum gate. In order to find out why these parameters were changed, we have studied optical properties of the dielectric in the vicinity of metal and poly-silicon gate.

**Keywords:** Metal Oxide Semiconductor (MOS) structures, stress, interferometry, ellipsometry, electrical parameters

### 1. Przesłanki istnienia naprężeń w strukturach MOS

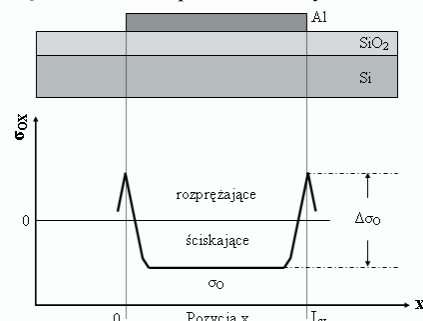
W pracach naszych [1,2] stwierdziliśmy, że efektywna kontaktowa różnica potencjałów ( $\phi_{MS}$  lub EKRP) w strukturach Al-SiO<sub>2</sub>-Si ma charakterystyczny kształt rozkładu w płaszczyźnie powierzchni kwadratowej bramki. Przykład takiego eksperymentalnego rozkładu pokazano na rys. 1, gdzie  $U_G^0 = \phi_{MS} + C$ , przy czym  $C = \text{const}$ . [3]. Wynika stąd, że rozkład  $\phi_{MS}$  jest identyczny jak kształt  $U_G^0$  jak pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Typowa zależność napięcia ( $\phi_{MS} + C$ ) zmierzonego dla długości fali  $\lambda = 244$  nm na strukturach Al-SiO<sub>2</sub>-Si(n<sup>+</sup>) z aluminiumową bramką o grubości  $t_{Al} = 35$  nm oraz warstwą tlenku SiO<sub>2</sub> o grubości  $t_{OX} = 60$  nm. Pomiar wykonano w dwóch kierunkach: (1) wzdłuż przekątnej kwadratowej bramki oraz (2) przez środek, równoległe do krawędzi kwadratowej bramki.

Fig. 1. Typical dependence of the ( $\phi_{MS} + C$ ) voltage measured at the wavelength  $\lambda = 244$  nm on the position in Al-SiO<sub>2</sub>-Si(n<sup>+</sup>) structures with aluminum gate thickness  $t_{Al} = 35$  nm and SiO<sub>2</sub> layer thickness  $t_{OX} = 60$  nm. The direction is either (1) along the diagonal of the square gate, or (2) through the center of the square gate and parallel to its edges.

Naprężenia panujące w strukturach MOS mają wpływ na parametry elektryczne tychże struktur [4,5]. Jednym z takich parametrów jest efektywna kontaktowa różnica potencjałów  $\phi_{MS}$ . Wpływ naprężeń mechanicznych na wartości  $\phi_{MS}$  w strukturach MOS był szacunkowo określony [6] i pokazano, że te naprężenia mają dominujący wpływ na kształt rozkładu  $\phi_{MS}$  (choćby przez wpływ grubości aluminiumowej bramki na ten kształt). Naprężenia mechaniczne panujące w tlenku pod powierzchnią metalowej bramki [5,7,8] są nierównomierne i zmieniają się gwałtownie w pobliżu krawędzi bramki, co pokazano na rys. 2.

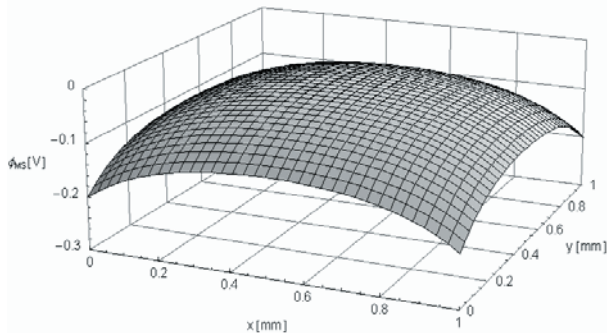


Rys. 2. Jednowymiarowy rozkład naprężeń  $\sigma_{OX}(z)$  w tlenku pod powierzchnią aluminiumowej bramki.

Fig. 2. The expected one-dimensional distribution of stress  $\sigma_{OX}(z)$  in the oxide layer under the aluminum gate.

Zakładając, że zmiany w wartościach  $\phi_{MS}$  są proporcjonalne do zmian naprężeń mechanicznych pod bramką w strukturze MOS, opracowano i zweryfikowano eksperymentalnie model rozkładu  $\phi_{MS}$  w płaszczyźnie powierzchni kwadratowej bramki [1,2]. Typowy rozkład  $\phi_{MS}$  policzony wg tego modelu pokazano

na rys. 3. Jest charakterystyczne, że najwyższe wartości obserwujemy na środku struktury, mniejsze na krawędziach a najmniejsze na rogach kwadratowej bramki.



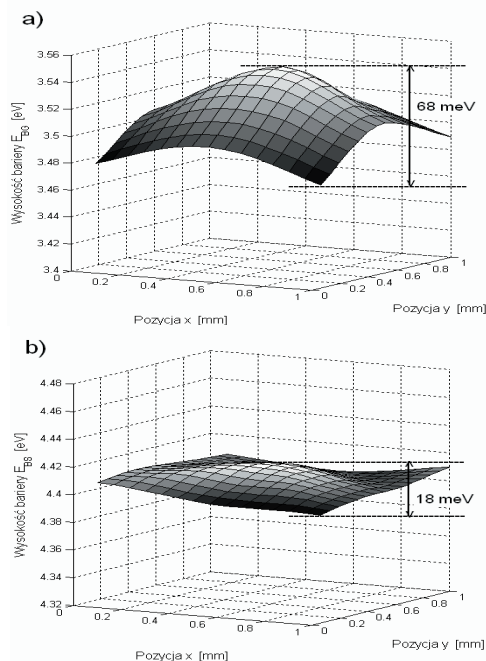
Rys. 3. Dwuwymiarowy rozkład  $\phi_{MS}$  policzony wg założeń modelu [1] dla struktur MOS z kwadratową bramką o boku  $L = 1$  mm.

Fig. 3. Two-dimensional distribution of  $\phi_{MS}$  (x,y) calculated using model [1] for MOS structures with square gates of side length  $L = 1$  mm.

Efektywna kontaktowa różnica potencjałów  $\phi_{MS}$  zależy bezpośrednio od różnicy wysokości barier potencjału na obu powierzchniach granicznych w strukturze MOS: bramka – dielektryk ( $E_{BG}$ ) oraz półprzewodnik – dielektryk ( $E_{BS}$ ) [9].

$$\phi_{MS}^* = \phi_M - \chi = \frac{1}{q} (E_{BG} - E_{BS} + E_G) \quad (1)$$

Gdzie  $\phi_M$  jest wysokością bariery potencjału dla fotoemisji z metalu do dielektryka,  $\chi$  oznacza powinowactwo elektronowe na granicy półprzewodnik-dielektryk,  $E_g$  - przerwa energetyczna krzemu,  $q$  – ładunek elektronu. Zatem, można podejrzewać, że jedna lub obie bariery mają charakterystyczny kształt rozkładu w płaszczyźnie powierzchni bramki w strukturze MOS bezpośrednio wynikający z nierównomiernego rozkładu naprężeń mechanicznych w tlenku pod powierzchnią bramki. W tym celu, używając zmodyfikowanej metody Powella-Berglunda [10,11] (modyfikacja polegała na zastosowaniu do pomiarów bardzo małej plamki światła w porównaniu z wielkością bramki) na kilkudziesięciu strukturach zmierzono lokalne wartości barier potencjału w celu określenia rozkładów obu barier  $E_{BG}$  i  $E_{BS}$ . Wyniki tych badań pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Średnie dwuwymiarowe rozkłady barier a)  $E_{BG}$  and b)  $E_{BS}$  zmierzone przy użyciu zmodyfikowanej metody Powella-Berglunda dla 26 struktur MOS.

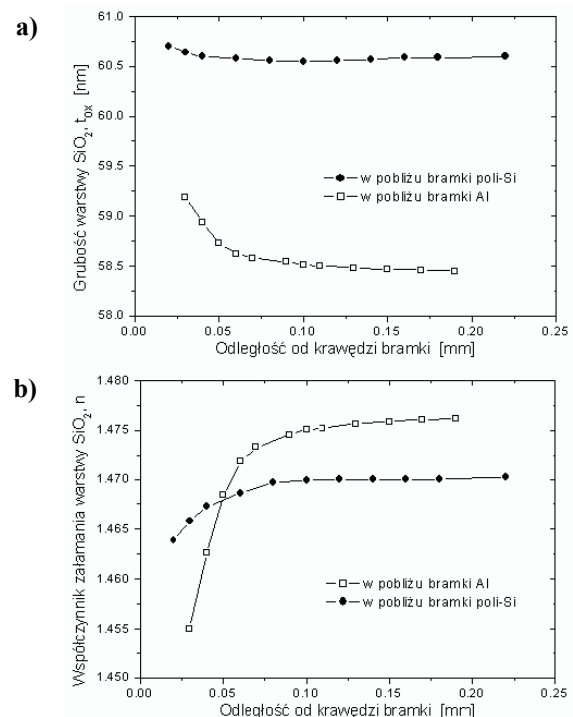
Fig. 4. Averaged two-dimensional distribution of a)  $E_{BG}$  and b)  $E_{BS}$  barrier heights measured using modified Powell-Berglund method for 26 MOS structures.

Jak widać na Rys. 4a, kształt rozkładu bariery  $E_{BG}$  jest kopułkowy, przypomina kształt rozkładu wartości  $\phi_{MS}$  z wartościami najwyższymi na środku, mniejszymi na krawędziach a najmniejszymi w narożach kwadratowej bramki. Amplituda rozkładu bariery  $E_{BG}$ , tj. różnica pomiędzy wartością maksymalną  $E_{BGmax}$  i wartością minimalną  $E_{BGmin}$  lokalnych wartości barier w płaszczyźnie powierzchni bramki (~68 meV) jest zdecydowanie większa (ok. 4 razy) od amplitudy bariery  $E_{BS}$  (~18 meV), której rozkład ma przypadkowy charakter (Rys. 4b). Przewaga amplitudy zmian bariery  $E_{BG}$  świadczy o tym, że naprężenia mechaniczne (zgodnie z naszymi przewidywaniami) wpływają na rozkład lokalnych wartości bariery  $E_{BG}$  w stopniu większym niż na wartości bariery  $E_{BG}$  (gdzie ten wpływ nie istnieje lub jest bardzo mały).

Zatem w powyższych badaniach potwierdzono, że nierównomierność rozkładu naprężeń mechanicznych panujących w warstwie tlenku pod powierzchnią metalowej bramki w strukturach MOS ma wpływ na lokalne wartości (czyli te mierzone w poszczególnych miejscach struktury) parametrów elektrycznych struktur MOS. Parametry te ( $\phi_{MS}$  oraz  $E_{BG}$ ) mają kopułkowy kształt rozkładu, z wartościami największymi na środku struktury i najmniejszymi w jej narożach.

## 2. Badania elipsometrycznie i interferencyjne struktur MOS

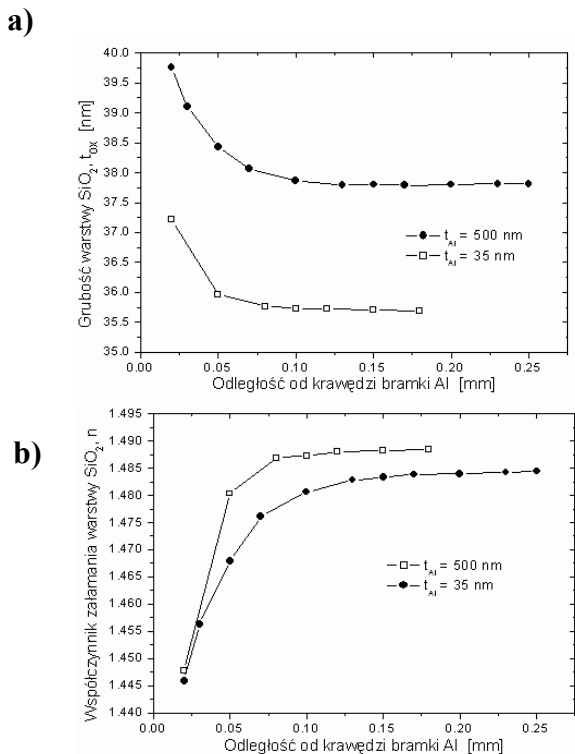
Metodą elipsometrii spektroskopowej przy dwóch kątach padania 65 i 75 stopni w zakresie spektralnym długości fali 360-1000nm zbadano czterociałowe płytki krzemowe typu n i orientacji (100) ze strukturami MOS. Pomiary wykonywane były w sąsiedztwie zarówno bramek aluminiowych jak i krzemowych. Pomimo, że szerokość wiązki padającej nie była dostatecznie mała ok. 20um (uzyskana za pomocą lunetek kolimacyjnych), zaobserwowane zostały zmiany we współczynnikach załamania i grubości warstwy  $SiO_2$  (rys. 5, 6, 7).



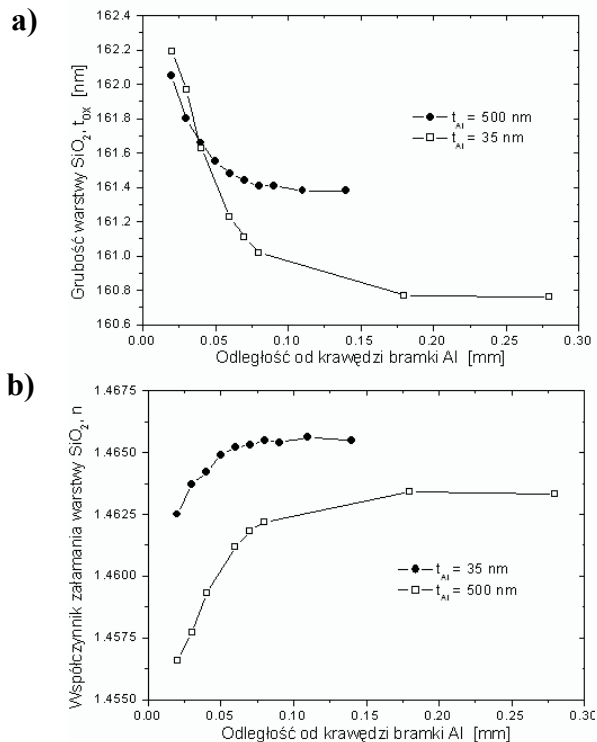
Rys. 5. Zależności grubości warstwy  $SiO_2$  (a) i współczynnika załamania (b) od odległości od krawędzi bramki dla układów  $SiO_2/Al$  oraz  $SiO_2/poly-Si$ .

Fig. 5.  $SiO_2$  layer thickness (a) and refractive index (b) vs. distance from the gate edge for  $SiO_2/Al$  and  $SiO_2/Poly-Si$  systems with thick gate (c.a. 500nm) and 60 nm thick dielectric layer

Na rysunkach 5-7 obserwujemy wzrost grubości warstwy SiO<sub>2</sub> oraz spadek we współczynniku załamania tejże warstwy (wyniki przedstawiono dla długości fali 630 nm) w pobliżu krawędzi bramki.



Rys. 6. Zależności grubości warstwy SiO<sub>2</sub> (a) i współczynnika załamania (b) od odległości od krawędzi bramki dla różnych grubości bramek aluminiowych ( $t_{Al}$ ).  
 Fig. 6. SiO<sub>2</sub> layer thickness (a) and refractive index (b) vs. distance from the gate edge for SiO<sub>2</sub>/Al systems with different thickness of the gate ( $t_{Al}$ ) and 40 nm thick dielectric layer ( $t_{ox}$ ).



Rys. 7. Zależności grubości warstwy SiO<sub>2</sub> (a) i współczynnika załamania (b) od odległości od krawędzi bramki dla różnych grubości bramek aluminiowych ( $t_{Al}$ ).  
 Fig. 7. SiO<sub>2</sub> layer thickness (a) and refractive index (b) vs. distance from the gate edge for SiO<sub>2</sub>/Al systems with different thickness of the gate ( $t_{Al}$ ) and 160 nm thick dielectric layer ( $t_{ox}$ ).

Zaobserwowano dwa zjawiska dla płytek z bramką aluminiową i polikrzemową:

- Mianowicie, spadek współczynnika załamania tlenu i wzrost grubości warstwy tlenu w sąsiedztwie granicy bramka-dielektryk. Takie zachowanie się warstwy może wskazywać na obecność naprężeń w sąsiedztwie krawędzi bramki.
- W przypadku grubszej warstwy dielektryka (160nm), zmiany we współczynniku załamania warstwy SiO<sub>2</sub> są mniejsze niż dla tych zaobserwowanych dla cieńszej warstwy dielektryka (40-60nm). Natomiast droga optyczna (iloczyn współczynnika załamania i grubości) dla badanego układu SiO<sub>2</sub>/Si jest prawie taka sama.

Wyniki tych badań mogą być użyteczne dla określenia modelu rozkładu naprężeń w strukturach MOS, które pozwolą wyjaśnić zaobserwowane zmiany zarówno w parametrach elektrycznych jak i fotoelektrycznych w płaszczyźnie bramki metalowej.

Podstawą do oceny drogi optycznej w sąsiedztwie krawędzi bramki struktury MOS, gdzie można spodziewać się, stosownie do przedstawionych uprzednio wyników badań fotoelektrycznych, zmian drogi optycznej w warstwie tlenkowej (SiO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i innych będących obecnie przedmiotem zainteresowania technologów materiałów elektronicznych z uwagi na ich wysoki współczynnik załamania), jest interferogram powierzchni struktury MOS obserwowany w polu widzenia mikroiinterferometru bądź zarejestrowany za pomocą fotografii elektronicznej. Przykład takiego interferogramu uzyskanego w świetle białym i w liniach konturowych przedstawiono na rys. 8a i 8b. Jest oczywiste, że w przypadku pomiarów topografii bramek metalicznych lub polikrzemowych konieczne jest wykonanie interferogramu w świetle białym w celu oceny, używając nomenklatury M. Pluty, „co jest wyżej a co niżej”. Ostateczne pomiary wykonuje się z użyciem filtra interferencyjnego o centralnej długości fali przepuszczanej 546 nm.

Program wykonujący dopasowanie sinusoidy do rozkładu natężenia w interferogramie struktury MOS napisano w środowisku Mathematica 5.2.

Interferogram przeznaczony do obróbki cyfrowej wykonano w taki sposób, aby prążki interferencyjne były położone możliwie najbardziej prostopadle do krawędzi bramki w przypadku bramek o kształcie prostokątnym lub w postaci paska...

Program działa według następującego schematu:

Część pierwsza to komenda wczytania odpowiedniej tablicy w formacie tekstowym, w której zanotowane są wartości natężenia interferującego promieniowania. Po wczytaniu następuje pokazanie tablicy – zdjęcia w postaci graficznej oraz podanie jego wymiarów.

Część druga to wybór interesującego fragmentu zdjęcia, który będzie poddany dalszej analizie. W tym celu program żąda podania dwóch numerów linii zdjęcia: pierwszego i ostatniego fragmentu wziętego do dalszej analizy. Ta część programu pokazuje dalej w postaci graficznej wybraną część tablicy – zdjęcia oraz podaje jej wymiary. Dodatkowo wyświetla na ekranie sześć równo oddalonych od siebie wierszy wybranej części tablicy – zdjęcia. Wyświetlone wykresy są podstawą do określenia wartości początkowych amplitudy dopasowywanej sinusoidy i jej fazy.

Część trzecia to przygotowanie macierzy, która będzie poddana analizie. Przygotowanie to polega na uśrednieniu tablicy otrzymanej w części drugiej. W tym celu program żąda podania liczby wierszy oraz pikseli w wierszu, które będą sumowane. Omawiana część programu oblicza nową, uwzględniającą uśrednienie, tablicę, pokazuje ją w postaci graficznej oraz podaje jej wymiary..

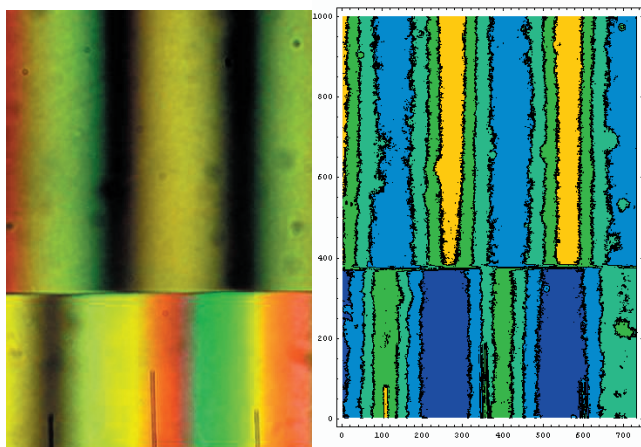
Część czwarta, czyli dopasowanie, można podzielić na dwa etapy: wczytanie parametrów początkowych oraz samą procedurę dopasowania. Przy wczytaniu podaje się parametry odpowiadające wartościom na pierwotnym zdjęciu a sam program uwzględnia uśrednianie wg odpowiedniej liczby

wierszy i pikseli. Program żąda również podania nazwy zbioru w celu zapisu residuów dla każdego dopasowania. Samo dopasowanie przebiega w dwóch etapach: w pierwszym dwa parametry są stałe a dopasowaniu podlegają dwa inne. W drugim etapie dopasowywane są wszystkie parametry, przy czym wartości otrzymane z pierwszego etapu są używane jako wartości początkowe w drugim etapie. Tego typu postępowanie ogranicza możliwość niezbieżnego przebiegu procedury nieliniowego dopasowania. Ta część programu wyświetla aktualnie analizowany wiersz uśrednionej macierzy (wykres dwuwymiarowy), wyniki pierwszego i drugiego etapu dopasowania: wartości odpowiednich parametrów, wykresy dopasowanych funkcji oraz residuów. Wartości residuów otrzymane w drugim etapie są zapisywane na dysk. Po drugim etapie obliczane są również tzw. "parametry struktury", czyli okres, położenie jednego minimum dopasowanej sinusoidy oraz położenie maksimum dopasowanej sinusoidy. Dopasowanie wykonywane jest sekwencyjnie, tzn. dla każdego wiersza uśrednionej macierzy otrzymanej w części trzeciej. Wartości dopasowanych parametrów są zapamiętywane w zadeklarowanych wcześniej tablicach.

Część piąta to wyświetlenie na ekranie monitora otrzymanych parametrów.

Ostatnia, szósta część programu to zapis na dysk otrzymanych parametrów maksimum.

W wyniku zastosowania opisanego programu oceny prążków interferencyjnych wyznaczono ich okres oraz położenie maksimum natężenia w prążku. Stwierdzono, że w zakresie ok. 50 ÷ 100  $\mu\text{m}$  od brzegu bramki zachodzi wzrost grubości optycznej dielektryka nawet do ok. 10 nm. Weryfikację wyznaczonych wielkości przeprowadzono posługując się obrazem konturowym. Metodykę wyznaczania kształtu powierzchni warstwy tlenku przedstawił w naszej pracy [12] a obliczenia wartości naprężeń dokonano wg uogólnionego wzoru Stoneya na dowolną liczbę warstw [13]. Stosownie do tej metodyki dla wyznaczonych wartości promieni krzywizny 50 do 125 m należy przypisać odpowiednio naprężenia 5.4 do 2.2 GPa.



Rys. 8. (a) Interferogram struktury MOS w świetle białym. U dołu metaliczna bramka (Al) o grubości 500 nm, u góry-SiO<sub>2</sub> o grubości 40 nm (b) Interferogram w liniach konturowych i sztucznych barwach.

Fig. 8. (a) Interferogram of MOS structure. in the white light. At the top part of the picture, we can see interference images obtained for the 40 nm thick SiO<sub>2</sub> layer. But, at the bottom, we can observe interference images obtained for the 500 nm thick aluminum gate. (b) Contour image of the interferogram (different colours are used to facilitate fringes identification).

Wyniki badań optycznych: elipsometrycznych i interferencyjnych potwierdzają obecność naprężeń w sąsiedztwie krawędzi bramki

oraz pod nią. Badania elipsometryczne mogą być stosowane w tzw. strefie dalekiej, tj. w odległości kilku dziesiątych mm od brzegu bramki, ponieważ mała średnica eliptycznej plamki skupienia wynosi ok. 0.2 mm. W strefie bliskiej zastosowanie znajduje interferometria. Zdolność rozdzielcza obiektywu mikrointerferometru wynosi ok. 1.5  $\mu\text{m}$ , co umożliwia dokonanie znacznie dokładniejszej oceny zmian drogi optycznej promieniowania diagnostycznego w dielektryku i na powierzchni bramki metalicznej. Nie występuje tu niestety możliwość rozdzielania zmian współczynnika załamania dielektryka od zmian jego grubości.

Pomiar miejscowych wartości krzywizny powierzchni bramki pozwala oszacować wartości naprężeń w warstwie dielektryka leżącego pod nią. Wyznaczenie tego parametru geometrycznego struktur MOS może być osiągnięte za pomocą interferometrii optycznej.

Obserwacja zmian szerokości prążków interferencyjnych w pobliżu krawędzi bramki nasuwa wniosek, że współczynnik odbicia w tej strefie nie pozostaje stały.

Z metodą konturową wiążemy duże nadzieje na ujawnienie szczegółów deformacji powierzchni bramki i zmian drogi optycznej w warstwie dielektryka, bez nadmiernego ograniczania powierzchni badanej. Technika ta otwiera drogę do badania subtelnej struktury niejednorodności obiektów przepuszczających bądź odbijających promieniowanie optyczne

### 3. Literatura

- [1] H. M. Przewlocki, A. Kudła, D. Brzezinska, H. Z. Massoud, „Distribution of the contact-potential difference local values over the gate area of MOS structures”, *Microelectronic Engineering* 72, 165–173 (2004).
- [2] A. Kudła, H. M. Przewlocki, L. Borowicz, D. Brzezinska, W. Rzdokiewicz, „Photoelectrical measurements of the local value of the contact-potential difference in metal-insulator-semiconductor (MIS) structures”, *Thin Solid Films* 450, 203–206 (2004).
- [3] H. M. Przewlocki, „Theory and applications of internal photoemission in the MOS system at low electric fields”, *Sol. State Electronics* 45, 1241–1250 (2001).
- [4] C. H. Bjorkman, J. T. Fitch, G. Lucovsky, „Correlation between midgap interface state density and thickness-averaged oxide stress and strain at Si/SiO<sub>2</sub> interfaces formed by thermal oxidation of Si”, *Appl. Phys. Lett.* 56(20), 1983–1985 (1990).
- [5] S. M. Hu, „Stress-related problems in silicon technology”, *J. Appl. Phys.* 70(6), R53–R80 (1991).
- [6] H. M. Przewlocki, H. Z. Massoud, „The effects of stress annealing in nitrogen on the effective contact-potential difference, charges, and traps at the Si/SiO<sub>2</sub> interface of metal-oxide-semiconductor devices”, *J. Appl. Phys.* 92(4), 2198–2201 (2002).
- [7] I. De Wolf, H. E. Maes, S. K. Jones, „Stress measurements in silicon devices through Raman spectroscopy: bridging the gap between theory and experiment”, *J. Appl. Phys.* 79(9), 7148–7156 (1996).
- [8] K. F. Dombrowski, I. de Wolf, B. Dietrich, „Stress measurements using ultraviolet micro-Raman spectroscopy”, *J. Appl. Phys.* 75(16), 2450–2451 (1999).
- [9] E. H. Nicollian, J. R. Brews, „MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology”, Chapter 10: “Charges, barrier heights, and flatband voltage”, pp. 423-491, John Wiley & sons, New York, 1982.
- [10] R. J. Powell, C. N. Berglund, „Photoinjection into SiO<sub>2</sub>: use of optical interference to determine electron and hole contribution”, *J. Appl. Phys.* 40, 5093–5101 (1969).
- [11] R. J. Powell, „Interface barrier energy determination from voltage dependence of photoinjected currents”, *J. Appl. Phys.* 41, 2424–2432 (1970).
- [12] W. Rzdokiewicz, L. Borowicz, Application of interference methods for determination of curvature radius in metal-oxide-semiconductor (MOS) structures, *Optica Applicata*. Vol. XXV, No. 3, 523-527 (2005)
- [13] J. Vilms, D. Kerps, Simple stress formula for multilayered thin films on a thick substrate, *J. Appl. Phys.* Vol. 53, No. 3, 1536-1537 (1981)