PL ISSN 0209-0058 MATERIAŁY ELEKTRONICZNE T. 36 - 2008 NR 3

POMIAR DŁUGOZASIĘGOWEGO ODCHYLENIA OD PŁASKOŚCI POWIERZCHNI PŁYTEK SI ZA POMOCĄ HR XRR

Krystyna Mazur[1], Jerzy Sass[1], Barbara Surma[1], Bronisław Piątkowski[1], Artur Wnuk[1], Andrzej Gładki[1] , Andrzej Turos[1]

Opracowano metodę oszacowania stopnia długozasięgowego odchylenia od płaskości powierzchni za pomocą rentgenowskiej metody reflektometrycznej XRR w układzie niezwierciadlanym (*non - specular)*. Otrzymane wyniki dla ośmiu płytek krzemowych o zróżnicowanej grubości porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod: (1) optycznej (w przypadku próbek grubości< 200 μm), (2) z wykorzystaniem stykowego miernika grubości (TSK) (dla próbek o grubości>200 μm). Pomimo różnych założeń dla porównywanych metod uzyskano wystarczająco dobrą zgodność wyników co świadczy o użyteczności opracowanej metody.

Słowa kluczowe: płytka Si, reflektrometria rentgenowska
Key words: Si wafers, X-Ray reflectrometry

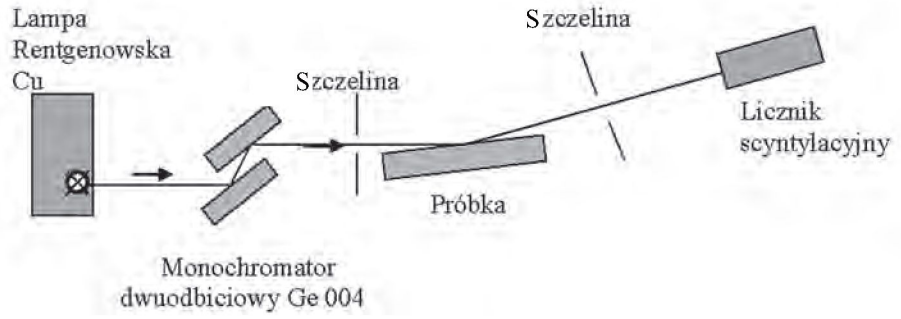
1. WPROWADZENIE

Jednym z typowych parametrów opisujących geometryczne (topograficzne) własności płytek podłożowych stosowanych w półprzewodnikowych technologiach planarnych jest długozasięgowe odchylenie od płaskości powierzchni. Może ono powstawać wskutek fluktuacji pozycji tarczy piły podczas cięcia płytki – (WARP). Dla standardowych próbek do pomiaru wykorzystuje się metodę pomiaru stykowego za pomocą stykowego miernika grubości – SMG. Do pomiaru próbek o niestandardowych wymiarach np. bardzo cienkich lub o nietypowych średnicach

[1] Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa
e-mail: Krystyna.Mazur@itme.edu.pl

http://rcin.org.pl

itp. opracowano metodę pomiaru tzw. długozasięgowego odchylenia od płaskości powierzchni wykorzystując do tego celu metodę reflektometrii rentgenowskiej (*X-Ray Reflectrometry*) XRR w układzie niezwierciadlanym „*non-specular*" [1-2]. Na czułość pomiaru w reflektometrii niezwierciadlanej ma duży wpływ rozbieżność wiązki pierwotnej. Stąd niezbędne było zaadoptowanie wysokorozdzielczego dyfraktometru znajdującego się w ITME do czułych pomiarów za pomocą reflektometrii niezwierciadlanej. Poprawę profilu wiązki pierwotnej uzyskano przez zastąpienie systemu: monochromator jednoodbiciowy Ge 004 – wąska szczelina, systemem monochromator dwuodbiciowy Ge 004 – wąska szczelina. Rys. 1.



Rys. 1. Schemat wysokorozdzielczego dyfraktometru rentgenowskiego wykorzystanego do badań za pomocą rentgenowskiej reflektometrii XRR.
h - wektor „wave vector transfer"; I_0 - padająca wiązka promieni X; I - odbita wiązka promieni X; ω - kąt poślizgu.
Fig. 1. Scheme of high resolution X-Ray Diffractometer used for XRR investigation.
h - wave vector transfer; I_0 – wave vector of incident beam; I - wave vector of reflected beam; ω- glancing angle.

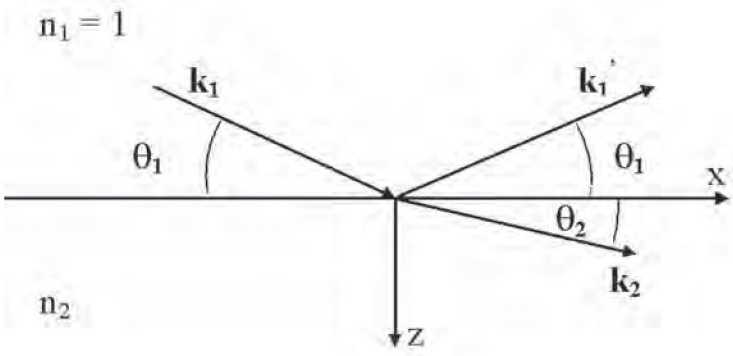
2. REFLEKTOMETRIA

Reflektometria opiera się na ogólnych zasadach znanych z optyki. Gdy wiązka promieni X biegnąca w ośrodku o współczynniku załamania n^1 np. w próżni trafia na swej drodze na inny ośrodek o współczynniku załamania n^2 , to na powierzchni granicznej część promieniowania zostanie odbita, część rozproszona, część może ulec pochłonięciu, a reszta przejdzie do drugiego ośrodka, ulegając załamaniu zgodnie z prawem Snelliusa:

$$n_1 \cos\theta_1 = n_2 \cos\theta_2 \tag{1}$$

Kąty są oznaczone na Rys. 2.

http://rcin.org.pl



k_1 - wektor falowy wiązki padającej
k_1' - wektor falowy wiązki odbitej
k_2 - wektor falowy wiązki załamanej
q_1 - kąt padania
q_2 - kąt załamania

Rys. 2. Schemat kierunków wiązek padającej, odbitej i załamanej na granicy dwóch ośrodków.
Fig. 2. Scheme of the incident and reflection beam directions on the boundary between the two medias.

Sytuację na granicy próżnia – ośrodek opisują wzory Fresnela. Dla małych kątów, poniżej 1^0, wzory Fresnela przybierają postać:
współczynnik odbicia

$$R = |(\theta_1 - \theta_2)/(\theta_1 + \theta_2|^2 \tag{2}$$

współczynnik załamania

$$T = |2\theta_1/(\theta_1 + \theta_2|^2 \tag{3}$$

W przypadku ośrodków przezroczystych dla kątów $\theta_1 \leq \theta_c$ cała energia wiązki padającej zostanie odbita od granicy ośrodków, czyli R = 1. Kąt krytyczny θ_c odpowiada kątowi padania θ_1 przy kącie $\theta_2 = 0$ i jest najmniejszym kątem, przy którym promienia rentgenowskie mogą przenikać do drugiego ośrodka przez granicę ośrodków.

Powyżej kąta krytycznego θ_c współczynnik odbicia spada proporcjonalnie do $1/\theta^4$ zgodnie ze wzorem [1]:

$$R = \delta/(4\theta_1^4) \tag{4}$$

Wartość kąta krytycznego można obliczyć z równania

$$\theta_c = \sqrt{|\chi_o|} \tag{5}$$

gdzie χ_o to polaryzowalność w refleksie zerowym.

http://rcin.org.pl

Polaryzowalność χ_o zależy od długości fali promieniowania i dla CuK_α wynosi:

$$\chi_o = 2.11 \times 10^5 F_o/V \quad (6)$$

gdzie: F_o – czynnik struktury,

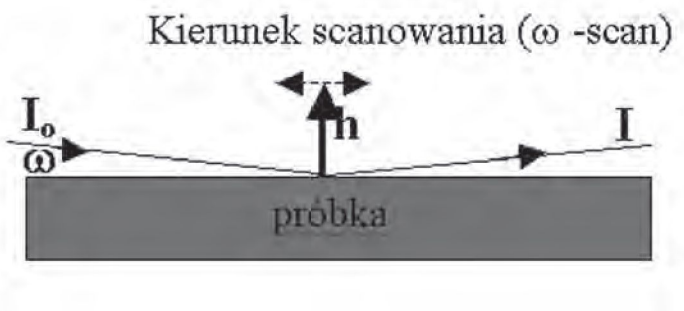
V - objętość komórki elementarnej w $Å^3$

Dla kątów θ_1 w zakresie od 0 do wartości granicznej równej kątowi krytycznemu θ_c zachodzi zjawisko całkowitego zewnętrznego odbicia promieniowania rentgenowskiego polegające na tym, że promień padający ulega zwierciadlanemu odbiciu od powierzchni granicznej próżnia – ośrodek i dalej rozchodzi się pod kątem poślizgu równym θ_1.

W materiałach półprzewodnikowych wartości kątów krytycznych są mniejsze od 0.5^0 i wynoszą np. (przy zastosowaniu promieniowania CuK_α) dla krzemu $\theta_c = 0.225^0$, dla arsenku galu $\theta_c = 0.308^0$.

3. ZASADY POMIARU ZA POMOCĄ REFLEKTOMETRII RENTGENOWSKIEJ

Dalekozasięgowe odchylenia od płaskości powierzchni mierzono za pomocą reflektometrii w układzie nie-zwierciadlanym (*non-specular X-ray scattering*) – XRR tzn. krzywe pomiarowe uzyskiwano za pomocą skanowania sieci odwrotnej kryształu prostopadle do wektora (*wave vector transfer*) (Rys. 3).



h - wektor *wave vector transver*
I_0 - padająca wiązka promieni X
I - odbita wiązka promieni X
ω - kąt poślizgu
ω -scan oznacza zmianę kąta ω przy ustalonej pozycji licznika

Rys.3. Schemat zasady pomiaru XRR w układzie niezwierciadlanym.
Fig.3. Schematic illustration of the non-specular XRR measurement idea.

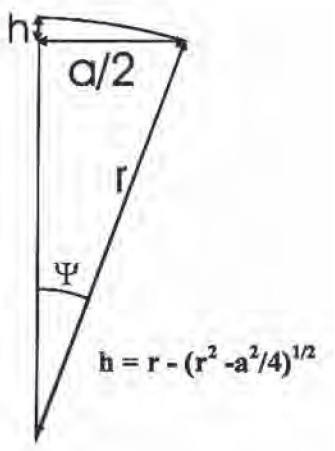
http://rcin.org.pl

Krzywą *non-specular* rejestrowano tuż w pobliżu kąta krytycznego dla całkowitego odbicia zewnętrznego. Wiązka wejściowa (promieniowanie CuK_{α}) była formowana przez dwuodbiciowy monochromator 004 Ge. Przed licznikiem ustawiono szczelinę 0.05 mm (Rys. 1). Taka konfiguracja pomiaru powoduje dużą czułość odbitej wiązki na odstępstwa od płaskości.

Stosując prosty model przy założeniu, że kształt wygięcia jest sferyczny i że materiał badanej próbki jest jednorodny (nie ma zmian gęstości w kierunku lateralnym) możemy policzyć odstępstwo od idealnie płaskiej powierzchni zdefiniowane jako h w oparciu o szerokość połówkową FWHM krzywej rozkładu intensywności promieni X w kierunku prostopadłym do wektora (*wave vector transfer)* - oznaczonej jako β.

$$h = r - (r^2 - a^2/4)^{1/2} \tag{7}$$

gdzie: r = 0.5 a/ψ, $\psi = \beta$, r – promień krzywizny, a – szerokość oświetlonego pola (a = 14 mm) (Rys.4).



Rys. 4. Schemat ideowy służący do oszacowania odstępstwa od idealnie płaskiej powierzchni h w oparciu o szerokość połówkową krzywej FWHM oznaczonej jako β.
$r = 0.5$ a/ψ, $\psi = \beta$, r - promień krzywizny, a – szerokość oświetlonego pola (a = 14 mm).
Fig. 4. Schematic illustration of the idea for evaluation the deviation of ideal flat surface h in relation to FWHM signed as b. r – radius of curvature, a – width of irradiated surface.

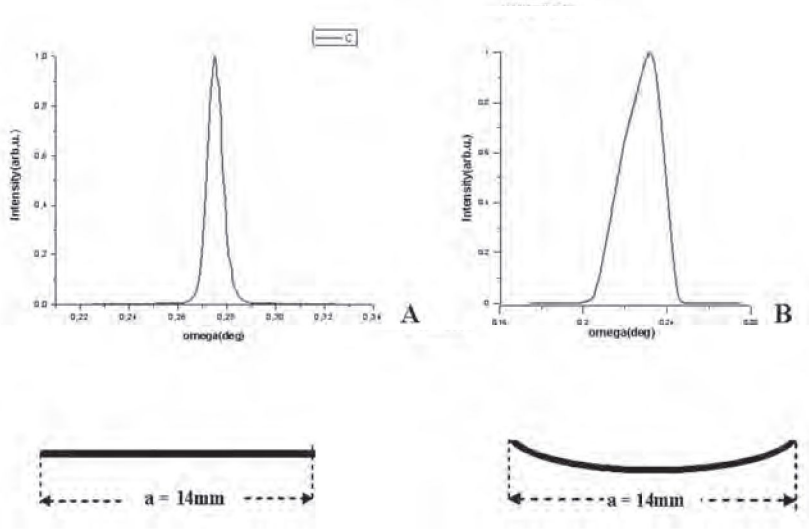
Eksperymentalna krzywa jest splotem dwóch krzywych: (1) instrumentalnej i (2) pochodzącej od badanego obiektu. Zakładając, że obydwie krzywe można przybliżyć funkcją Gaussa, a ich szerokości połówkowe wynoszą odpowiednio β_I oraz β_{II} szerokość połówkowa FWHM eksperymentalnej krzywej β jest dana w postaci:

http://rcin.org.pl

$$\beta = (\beta^2_I + \beta^2_{II})^{1/2} \tag{8}$$

gdzie β_I jest FWHM krzywej instrumentalnej; β_{II} jest FWHM badanego obiektu.

Kiedy kierunek skanowania próbki jest prostopadły do *wave vector transfer*, FWHM tzn. szerokość połówkowa krzywej instrumentalnej β_I zależy od dywergencji wiązki pierwotnej δ oraz od kąta akceptancji detektora σ. Kiedy $\sigma > \delta$ można pokazać, że $\beta_I = \sigma/2$. W naszych eksperymentach $\sigma = 30$ sek, co oznacza, że FWHM krzywej eksperymentalnej wynosi $\beta_I \cong 15$ sek. Wielkość ta odpowiada wartości $h = 0.25$ μm i jest to jednocześnie granica możliwości naszych oszacowań wielkości wygięcia. Dla $\sigma \to 0$, β_I redukuje się do wartości dywergencji wiązki pierwotnej, δ. Należy podkreślić, że jeżeli profil powierzchni jest bardziej złożony i nie może być przybliżony za pomocą kształtu sferycznego, wtedy nie można za pomocą β oszacować poprawnie odstępstwa od płaskości powierzchni. Przykładowe krzywe dla płaskiej i wygiętej powierzchni próbki przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Przykładowe krzywe dla dwóch próbek: A) z bardzo małym odstępstwem od płaskości, FWHM = 26 sek ⇒ $h = 0.3$ μm, B) ze znacznie większym, FWHM = 85 sek ⇒ $h = 1.435$ μm.

Fig. 5. The example of two samples: A) with small flatness deviation, FWHM = 26 sek ⇒ $h = 0.3$ mm, B) with biggest one FWHM = 85 sek ⇒ $h = 1.435$ mm

4. EKSPERYMENT I OMÓWIENIE WYNIKÓW

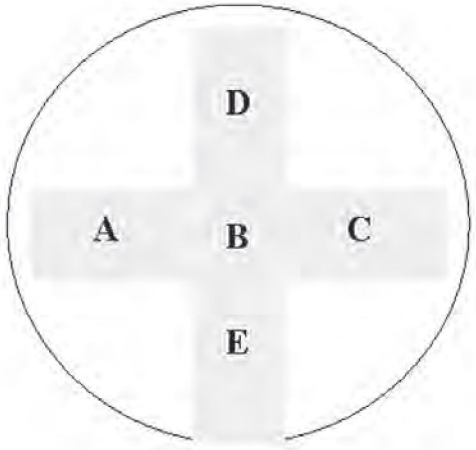
Dla płytek o grubościach nie przekraczających 200 mikrometrów można przeprowadzić weryfikacje uzyskanych wyników za pomocą konfokalnej metody optycznej [3-4]. Badania prowadzono na płytkach Si o grubościach zarówno < 200 mikro-

http://rcin.org.pl

metrów, jak i płytkach Si o standardowych grubościach 300 -500 μm, dla których dodatkowo w celach porównawczych zbadano płaskość powierzchni próbek za pomocą stykowego miernika grubości SMG.

Badania prowadzono na trzech płytkach Si(111) o grubościach < 200 mikrometrów (próbki nr 10, 11, 12) oraz na dwóch płytkach Si(001) o grubościach 300 μm (próbki nr 1, 2). Ponadto zbadano płytkę Si(111) (280 μm) z 10 stopniowym odchyleniem od płaszczyzny krystalograficznej (próbka nr 4) oraz płytkę Si(111) (500 μm) (próbka nr 3). Średnica wszystkich badanych próbek wynosiła $\varphi = 2$ cale.

Przedstawiona metoda pomiaru daje uśrednioną informację z obszaru ~ 14 mm x 8 mm, dlatego na każdej próbce Si wykonano 5 pomiarów według schematu przedstawionego na Rys. 6.



Rys. 6. Schemat obszarów pomiarowych na próbce.
Fig. 6. Scheme of the measurement areas on the sample.

Należy zaznaczyć, że oszacowana z danego pomiaru wielkość h dotyczy średniego odstępstwa od płaskości w mierzonym obszarze.

Bardzo ważną sprawą przy wykonywaniu powyższych pomiarów jest sposób mocowania próbki. Należy eliminować wszelkie dodatkowe naprężenia prowadzące do ewentualnych wygięć. Do badań za pomocą metody XRR próbki były delikatnie mocowane za pomocą trzech odpowiednio wyprofilowanych magnesów do płaskiej płyty metalowej i powoli wprowadzane w pozycję pionową. Pomiar krzywych odbywał się w pozycji pionowej. Ze względu na możliwość wygięcia próbek pod wpływem siły ciężkości pomiary były powtarzane – w tym samym miejscu pomiarowym - po uprzednim zdjęciu danej próbki i ponownym zamocowaniu.

Otrzymane (w sposób powtarzalny) wyniki przedstawiono na Rys. 7-14. Dla próbek o grubości > 200 μm badania płaskości powierzchni próbek wykonano

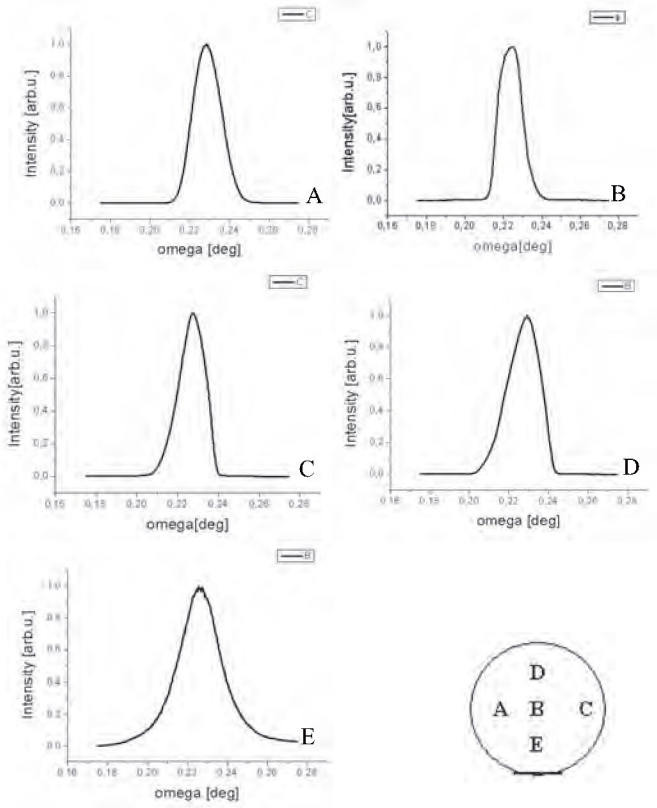
http://rcin.org.pl

także za pomocą stykowego miernika grubości SMG, a dla próbek o grubości < 200 μm za pomocą optycznej metody konfokalnej [3-4]. Uzyskane uśrednione wyniki przedstawiono w tabelach umieszczonych na Rys. 7-14. Przykładową mapę rozkładu odstępstwa od płaskości powierzchni dla całej próbki nr 11 uzyskaną za pomocą metody konfokalnej przedstawiono na Rys. 14a.

Dla próbek o grubościach powyżej 200 mikrometrów tzn. dla próbek nr 1-5 stwierdzono występowanie odstępstwa od płaskości w granicach od $h = 0.79$ do $h = 1.63$ μm. W jednym tylko przypadku na brzegu próbki nr 5 wystąpiło $h = 2.25$ μm. W badaniach za pomocą stykowego miernika grubości wystąpił podobny rozrzut wartości od $h = 0.71$ μm do $h = 1.21$ μm. Zauważono też, że profil próbek ma raczej kształt sferyczny - nie ma odstępstw od płaskości typu WARP.

W przypadku próbek cienkich o grubości 80 μm tzn. próbki nr 6-8 miały rozrzut wartości h w granicach od $h = 0.3$ μm do $h = 2.0$ μm. W jednym tylko miejscu na brzegu próbki nr 8 wystąpiło $h = 3.3$ μm.

http://rcin.org.pl

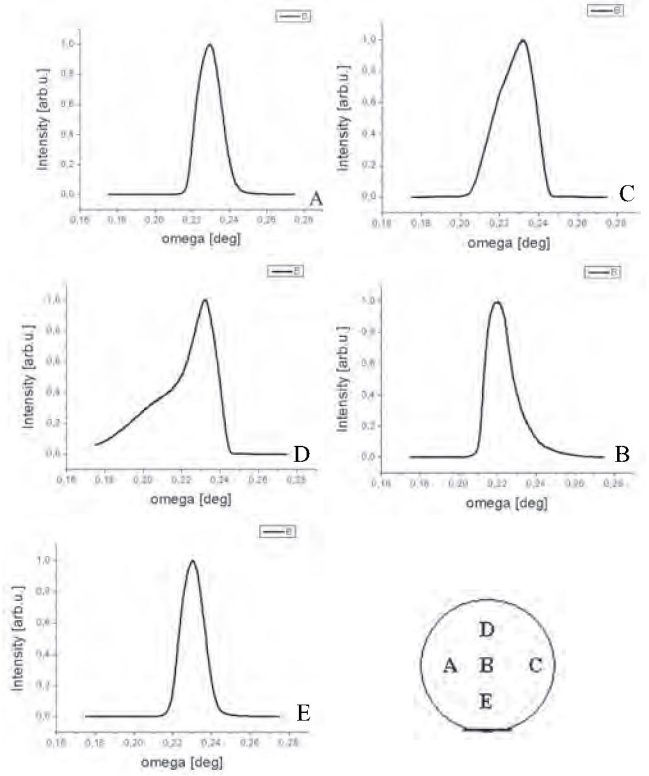


Rys 7. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu non-specular dla różnych miejsc na próbce nr 1 – Si(001) o grubości 300 μm („300"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.
Fig. 7. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 1 – Si(001) with thickness 300 μm („300"). Measurement places are marked from A to E.

Tabela I_Rys.7. Próbka nr 1 Si(001) o grubości 300 μm. Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i stykowego miernika grubości.
Table I_ Fig.7. Sample nr 1 Si(001), thickness 300 μm. Parameters from X-ray and from contact thickness gage (TSK) measurements.

	Metoda XRR			Metoda SMG
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	uśrednione h (μm)
A	60.84	1.71	1.429	
B	51.84	2.7	0.879	
C	56.16	2.02	1.209	0.71
D	71.28	2.57	0.953	
E	84.24	2.37	1.032	

http://rcin.org.pl

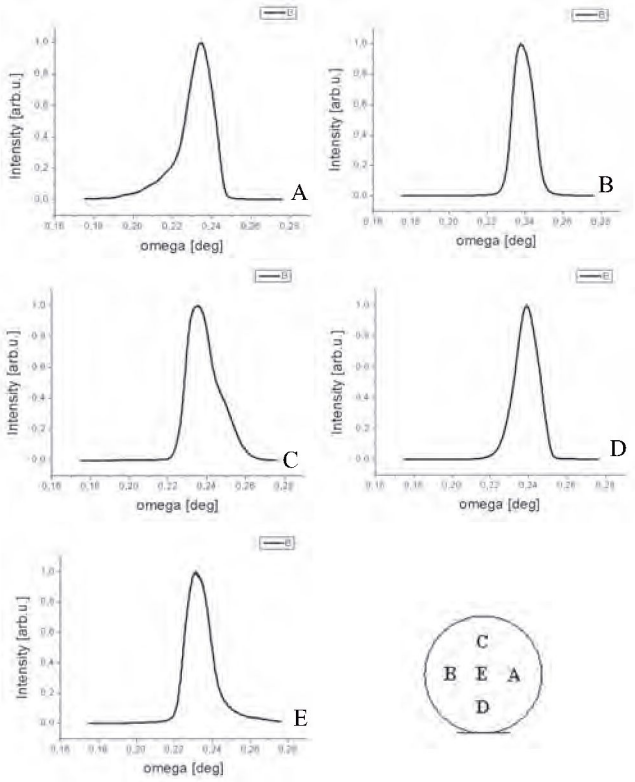


Rys. 8. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu non-specular dla różnych miejsc na próbce nr 2 – Si(001) o grubości 300 μm („300I"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.
Fig. 8. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 2 – Si(001) with thickness 300 μm („300I"). Measurement places are marked from A to E.

Tabela II_Rys. 8. Próbka nr 2 Si(001) o grubości 300 μm. Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i stykowego miernika grubości.
Table II Fig.8. Sample nr 2 Si 001, thickness 300 μm. Parameters estimated from X-ray and from contact thickness gage (TSK) measurements

	Metoda XRR			Metoda SMG
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	uśrednione h (μm)
A	55.8	2.58	0.947	
B	84.63	1.70	1.435	
C	72.0	2.0	1.221	0.92
D	55.8	2.58	0.947	
E	51.12	2.82	0.867	

http://rcin.org.pl

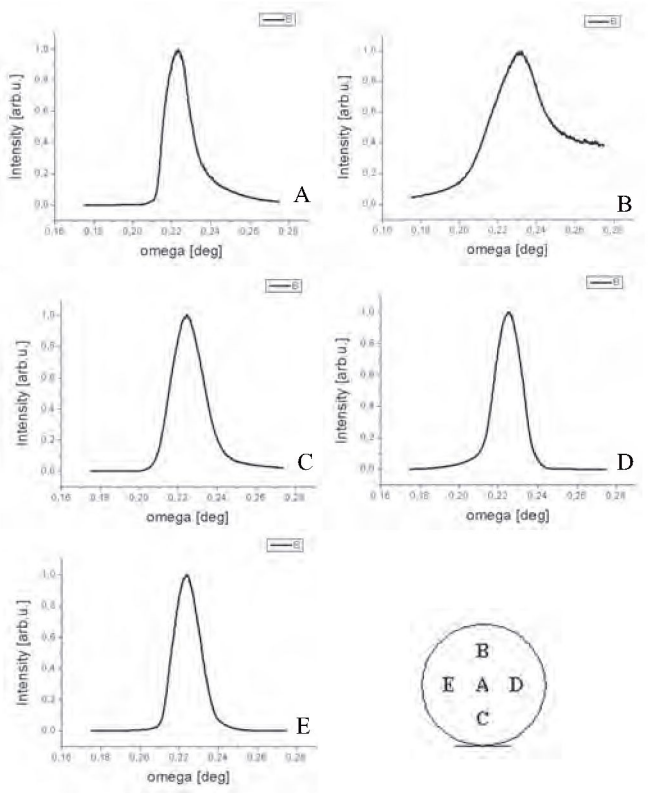


Rys 9. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu non-specular dla różnych miejsc na próbce nr 3 Si(111) o grubości = 500 μm („500"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.
Fig. 9. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 3 Si(111) with thickness 500 μm („500"). Measurement places are marked from A to E.

Tabela III. Rys. 9. Próbka nr 3 Si (111) o grubości = 500 μm. Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich metodą stykowego miernika grubości.
Table III Fig.9. Sample nr 3 Si(111), thickness 500 μm. Parameters estimated from X-ray and from contact thickness gage (TSK) measurements.

	Metoda XRR			Metoda SMG
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	uśrednione h (μm)
A	56.88	2.53	0.965	
B	46,8	3.09	0.794	
C	60.48	2.38	1.026	1.21
D	51.12	2.82	0.867	
E	54.72	2.64	0.929	

http://rcin.org.pl

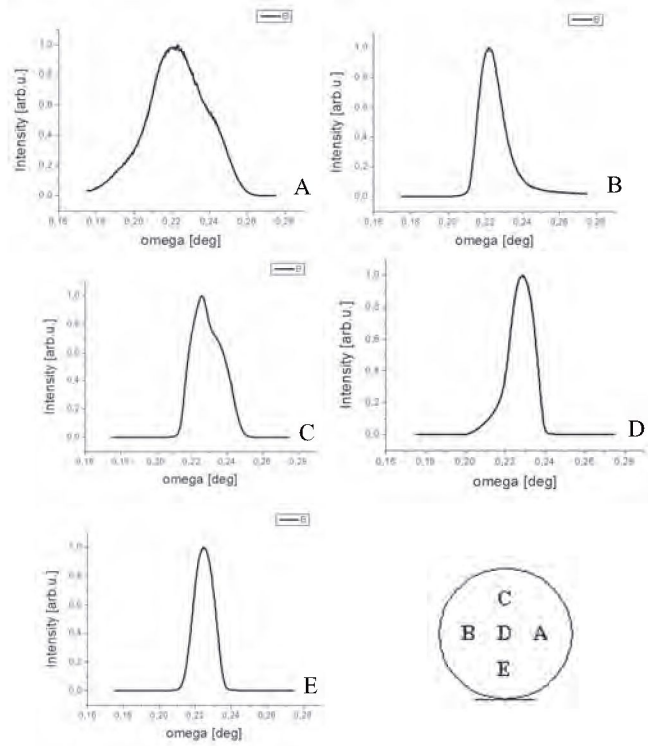


Rys. 10. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu *non-specular* dla różnych miejsc na próbce nr 4 Si(111) o grubości 280 μm z 100 dezorientacją („dez10"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.
Fig.10. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 4 Si(111) with thickness 280 μm ("dez100"). Measurement places are marked from A to E.

Tabela IV_Rys.10. Próbka nr 4 Si(111) o grubości 280 μm. Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i stykowego miernika grubości.
Table IV_ Fig.10. Sample nr 4 Si(111), thickness 280 μm. Parameters from X-ray and from contact thickness gage (TSK) measurements.

	Metoda XRR			Metoda SMG
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	uśrednione h (μm)
A	55.44	2.60	0.941	
B	95.76	1.50	1.625	
C	69.84	2.06	1.110	0.86
D	56.88	2.54	0.965	
E	57.96	2.49	0.983	

http://rcin.org.pl

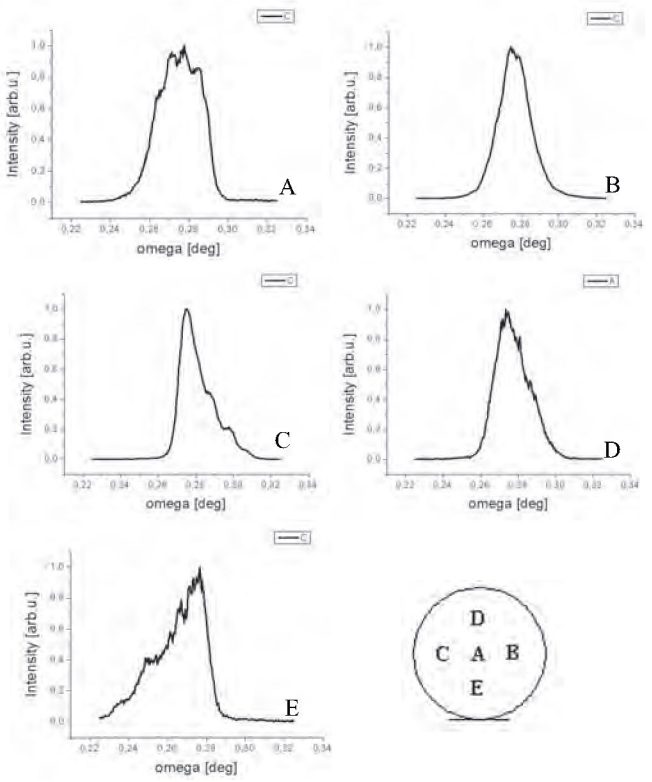


Rys. 11. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu *non-specular* dla różnych miejsc na próbce nr 5 – Si(111) obustronnie polerowanej o grubości = 400 μm („GRSi"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.
Fig. 11. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 5 – Si(111) with thickness 400 μm („GRSi") – both sides polished. Measurement places are marked from A to E.

Tabela V_Rys. 11. Próbka nr 5 – Si(111) o grubości = 400 μm. Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i stykowego miernika grubości.
Table V_ Fig.11. Sample nr 5 - Si(111), thickness 400 μm. Parameters estimated from X-ray and contact thickness gage (TSK) measurements.

	Metoda XRR			Metoda SMG
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	uśrednione h (μm)
A	132.48	1.09	2.247	
B	54	2.67	0.916	
C	81.36	1.77	1.380	0.53
D	51.84	2.78	0.879	
E	48.96	2.94	0.830	

http://rcin.org.pl

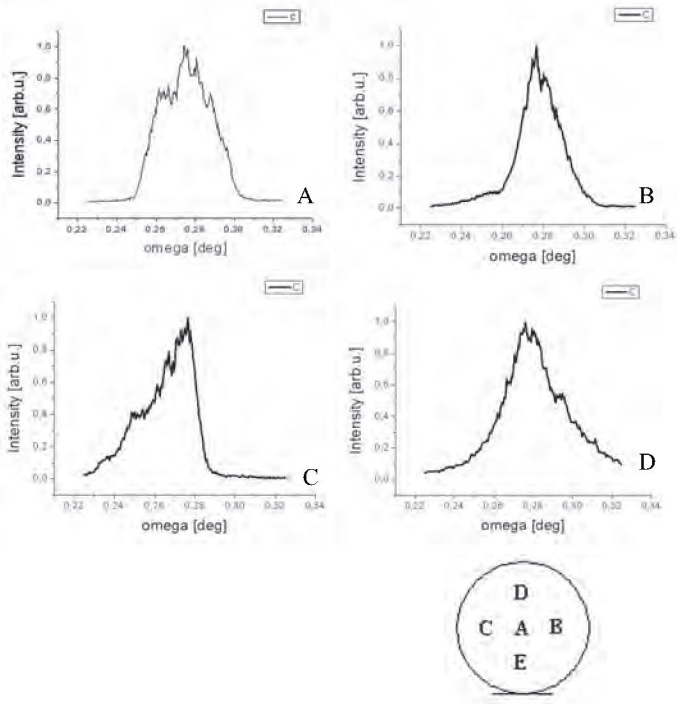


Rys. 12. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu non-specular dla różnych miejsc na próbce nr 6 Si(111) o grubości 80 μm obustronnie polerowanej („S16_17"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.
Fig. 12. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 6 – Si(111) with thickness 80 μm – both sides polished("S16_17"). Measurement places are marked from A to E.

Tabela VI _Rys. 12. Próbka nr 6 Si(111)_ (S16_17) o grubości 80 μm. Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i metodą konfokalną
Table VI_ Fig. 12. Sample nr 6 - Si(111)_(16_17) thickness 80 μm. Parameters estimated from X-ray and confocal measurements.

	Metoda XRR			Metoda konfokalna
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	*h* (μm)
A	103.68	1.39	1.759	–
B	65	2.22	1.099	0.7
C	50	2.86	0.855	0.4
D	70.56	2.04	1.197	1.16
E	79.2	1.82	1.343	1.65

http://rcin.org.pl

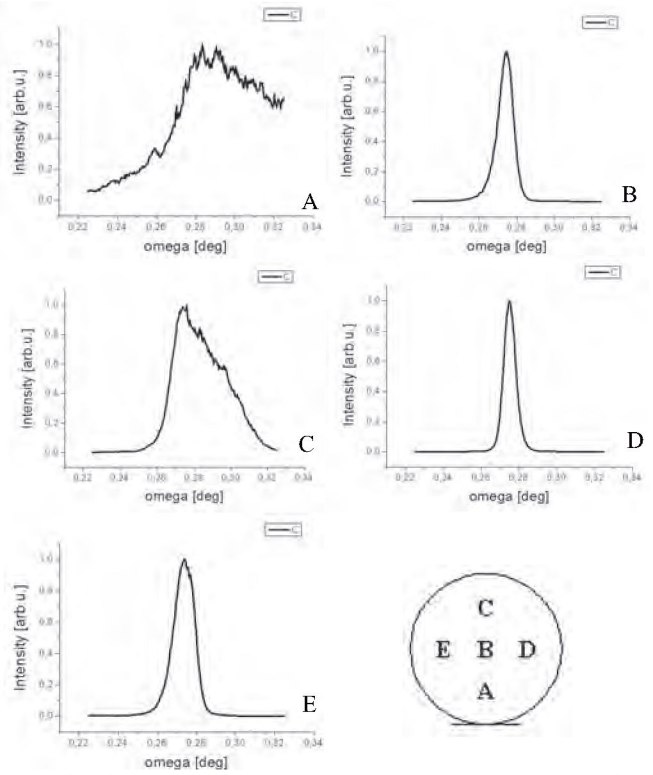


Rys. 13. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu non-specular dla różnych miejsc na próbce nr 7 – Si(111) ,o grubości 80 μm obustronnie polerowanej („S16_31"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-D.
Fig. 13. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 7 – Si(111) with thickness 80 μm – both sides polished ("S16_31"). Measurement places are marked from A to D.

Tabela VII_Rys. 13. Próbka nr 7 – Si(111)_(S16_31). Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i metodą konfokalną.
Table VII_ Fig. 13. Sample nr 7 - Si(111)_(16_31). Parameters estimated from X-ray and confocal measurements.

	Metoda XRR			Metoda konfokalna
	ß [sek]	$r^{*}10^{4}$ (mm)	h (μm)	*h* (μm)
A	120.24	1.20	2.040	–
B	71.28	2.02	1.209	1.3
C	95.04	1.51	1.612	1.4
D	97.92	1.47	1.661	1.64

http://rcin.org.pl



Rys. 14. Rentgenowskie krzywe reflektometryczne otrzymane w ustawieniu non-specular dla różnych miejsc na próbce nr 8 – Si(111) o grubości 80 μm obustronnie polerowanej („S16_35"). Miejsca pomiarowe schematycznie pokazują litery A-E.

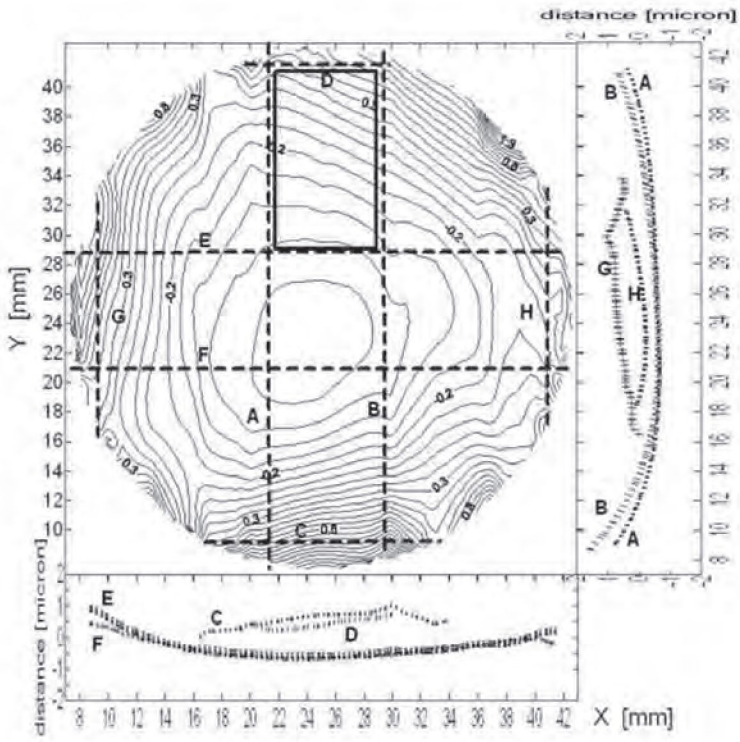
Fig. 14. Non specular X-ray reflectometric curves for different areas of the sample nr 8 – Si(111) with thickness 80 μm – both sides polished("S16_35"). Measurement places are marked from A to E.

Tabela VIII_Rys. 14. Próbka nr 8 – Si(111_(S16_35). Parametry uzyskane za pomocą pomiarów rentgenowskich i metodą konfokalną.

Table VIII_ Fig. 14. Sample nr 8 - Si(111)_(16_35). Parameters estimated from X-ray and confocal measurements.

Metoda XRR				Metoda konfokalna
Symbol pomiaru	β [sek]	r^*10^4 (mm)	h (μm)	h (μm)
A119	200	0.725	3.3	1.55; 1.04; 1.5; 0.1
B120b	32	5.15	0.47	0.3; 0.15; 0.15; 0.12
C118	111	1.31	1.8	0.56; 0.48; 0.15; 0.2
D122	26	6.87	0.3	0.3; 0.15; < 0.1; < 0.1
E121a	83	1.76	1.4	0.25; 0.15; 0.95; 0.87

http://rcin.org.pl



Rys. 14a. Konturowa mapa kształtu powierzchni uzyskana metodą konfokalną z przekrojami w miejscach badanych za pomocą XRR.
Fig. 14a. The contour map of the surface shape collected by confocal method. The particular cross section (presented as additional plots) represents the places from which the information of on the flatness by XRR method is gathered.

V. PODSUMOWANIE

1. Opracowano metodę oszacowania stopnia długozasięgowego odchylenia od płaskości powierzchni h w oparciu o szerokość połówkową FWHM krzywej uzyskanej za pomocą metody XRR w układzie niezwierciadlanym *(non - specular).*
2. Otrzymane wyniki dla ośmiu płytek krzemowych o zróżnicowanej grubości porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod: (1) optycznej (w przypadku próbek grubości < 200 μm), (2) z wykorzystaniem stykowego miernika grubości SMG (dla próbek o grubości > 200 μm). Pomimo różnych założeń dla porównywanych metod uzyskano wystarczająco dobrą zgodność wyników. Świadczy to o użyteczności opracowanej metody. Zadowalająca zgodność wyników uzasadnia także tezę, że kształt powierzchni płytek jest sferyczny i raczej wyklucza WARP.
3. Należy podkreślić, że jeżeli profil powierzchni jest bardziej złożony i nie może

http://rcin.org.pl

być przybliżony za pomocą kształtu sferycznego, wtedy nie można za pomocą β oszacować poprawnie odstępstwa od płaskości powierzchni. Ponadto jak pokazano w rozdziale 3, wartość $h = 0.25$ μm jest granicą możliwości naszych oszacowań wielkości minimalnego wygięcia próbki. Górna granica stosowalności metody związana jest ze zwiększoną szerokością połówkową krzywej β, a więc z większym zakresem kątów padania promieni X, a to z kolei powoduje zmianę wielkości oświetlonego pola w trakcie trwania rejestracji krzywej eksperymentalnej i wpływa na dokładność pomiaru. Na podstawie przeprowadzonych badań oszacowano, że dla płytek do wartości wygięcia $h \cong 10$ μm ($\beta \cong 600$ sek) otrzymujemy wyniki dające dobrą zgodność z wynikami otrzymanymi za pomocą innych metod.

LITERATURA

[1] Holy V., Pietsch U., Baumbach T.: High resolution X-ray scattering, Springer-Verlag, New York, LLC 2004

[2] Sass J., Mazur K., Surma B., Eichhorn F., Litwin D., Galas J., Sitarek S.: X-ray studies of ultra-thin Si wafers for mirror application, Proceedings of the E-MRS IUMRS ICM 2006 Spring Meeting, Nice, France, 2006

[3] Litwin D., Galas J., Kozłowski T., Sitarek S.: *Proc. SPIE* 5948, 59480K (2005), In: Photonics Applications In Industry and Research IV, October 2005 - R.S.Romaniuk, S. Simrock, V. M. Lutkowski(Eds)

[4] Galas J., Litwin D., Sitarek S., Surma B., Piątkowski B., Miros A.: Interferometric and confocal techniques testing of silicon wafers, *Proc. SPIE* 61880 C(2006); Optical micro- and nanometrology in microsystems technology, 2006-Ch.Gorecki,A.K. Asundi, W Osten (EDS)

SUMMARY

MEASUREMENT OF LONG RANGE SURFACE FLATNESS DEVIATION OF Si WAFERS BY MEANS OF HR XRR METHOD

The adaptation of the non-specular X-ray reflectivity method to control the long range random deviation of the surface flatness were done. The results obtained for eight Si samples were compared with the ones obtained (1) by optical method (for the samples < 200 μm in thickness), (2) by contact thickness gage (TSK) measurements. (for samples > 200 μm in thickness). Despite of the rather rough assumptions made for compared methods, a sufficiently good conformity has been obtained. This is important conclusion confirms the usefulness of the proposed x-ray method.

http://rcin.org.pl