

Jacek SZUBER
Bogusława DŁUGOSZ

ANALIZA KSZTAŁTU LINII EPR PARAMAGNETYCZNYCH CENTRÓW
POWIERZCHNIOWYCH NA PASYWOWANEJ PRÓŻNIOWO POWIERZCHNI
(111) Si METODĄ LINIOWEJ ANAMORFOZY

Streszczenie. Przeprowadzono metodą liniowej anamorfozy analizę kształtu linii EPR o $g = 2.0055$ paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzonej powierzchni (111) Si, na podstawie której określono charakter dominujących oddziaływań wzajemnych oraz średnią odległość pomiędzy nimi. Zaproponowano wysepkowy model wzrostu tlenku SiO_2 na pasywowanej próżniowo powierzchni (111) Si.

1. WSTĘP

Wcześniejsze badania metodą EPR pasywowanych próżniowo powierzchni (111) Si, zastosowanych w stopowych diodach n^+p , przeprowadzone przez Shiotę ze współpracownikami [1] oraz przez nas [2, 3], wykazały, że posiadają one specyficzne własności paramagnetyczne. Paramagnetyczne centra powierzchniowe odpowiedzialne za dwie obserwowane linie EPR: szeroką izotropową linię EPR P_B o $g = 2.0055$ oraz $\Delta H_{pp} = 0,7$ mT i wąską anizotropową linię EPR P_A o $g_{\perp} = 2.0015$ i $\Delta H_{pp} \cong 0,4$ mT wykazywały, w przeciwieństwie do paramagnetycznych centrów powierzchniowych na atomowo czystej powierzchni (111) Si [4-7], dużą czułość w kontakcie z powietrzem, O_2 , O_3 , H_2 , wilgotnym N_2 , wilgotnym He.

Wstępna analiza kształtu szerokiej linii EPR P_B wykazała [1, 2], że ze wzrostem temperatury wygrzewania próżniowego linia EPR P_B o $g = 2.0055$ paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzonej powierzchni (111) Si miała kształt coraz bardziej zbliżony do kształtu linii typu Lorentza.

Celem pracy było określenie charakteru dominujących oddziaływań występujących pomiędzy paramagnetycznymi centrami powierzchniowymi wytworzonymi na wygrzanej próżniowo ($5 \cdot 10^{-5}$ Torr, 300-500°C, 3 godz.) i zapowietrzonej powierzchni (111) Si, odpowiedzialnymi za szeroką izotropową linię EPR P_B o $g = 2.0055$ na podstawie analizy jej kształtu przeprowadzonej metodą liniowej anamorfozy.

2. METODA LINIOWEJ ANAMORFOZY ANALIZY KSZTAŁTU LINII EPR

W zależności od typu oddziaływań występujących pomiędzy cząstkami paramagnetycznymi w badanej substancji linia absorpcji EPR może posiadać kształt Gaussa, Lorentza lub pośredni. Znajomość kształtu linii EPR pozwala określić rodzaj dominujących oddziaływań pomiędzy cząstkami paramagnetycznymi oraz ich koncentrację.

Najprostsza metoda analizy kształtu linii EPR polega na porównaniu wartości rzędnych linii w wybranych punktach oraz linii kształtu Gaussa lub Lorentza [8].

Analiza kształtu linii EPR metodą liniowej anamorfozy (wyrównania) [9-11] polega natomiast na przedstawieniu linii widmowej w takim układzie współrzędnych, w którym uzyskuje się linię prostą i umożliwia obliczenie wartości szerokości dla gaussowskich i lorentzowskich brzegów linii, pola i energii wymiany oraz pola powierzchni pod częścią gaussowską i lorentzowską linii EPR.

Kształt pierwszej pochodnej linii absorpcji EPR typu Gaussa i Lorentza opisują odpowiednio równania:

$$J'_G = e^{\frac{1}{2}} \cdot J_G^0 \left(\frac{H - H_0}{\frac{1}{2} \Delta H_{pp}^G} \right) \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{H - H_0}{\frac{1}{2} \Delta H_{pp}^G} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$J'_L = \frac{J_L^0 \left(\frac{4}{3} \right)^2 \cdot (H - H_0)}{\frac{1}{2} \Delta H_{pp}^L \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{H - H_0}{\frac{1}{2} \Delta H_{pp}^L} \right)^2 \right]^2}, \quad (2)$$

gdzie:

- J_G^0 - amplituda linii EPR typu Gaussa,
- ΔH_{pp}^G - szerokość linii EPR typu Gaussa,
- J_L^0 - amplituda linii EPR typu Lorentza,
- ΔH_{pp}^L - szerokość linii EPR typu Lorentza,
- H_0 - rezonansowe pole magnetyczne,

które można zapisać w postaci:

$$\left[\frac{H - H_0}{J'_L} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{3}{4} \left[\frac{\Delta H_{pp}^L}{2J_L^0} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{(H - H_0)^2}{(2J_L^0)^{\frac{1}{2}} (\Delta H_{pp}^L)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$\ln \frac{H - H_0}{J_G} = -\ln \frac{2e^{\frac{1}{2}} \cdot J_G^0}{\Delta H_{pp}^G} + 2 \frac{(H - H_0)^2}{\Delta H_{pp}^G} \quad (4)$$

Po wprowadzeniu oznaczeń:

$$Y_L = \frac{H - H_0}{J_L} ; B_L = \frac{3}{4} \left(\frac{\Delta H_{pp}^L}{2J_L^0} \right)^{\frac{1}{2}} ; X = (H - H_0)^2 ; \operatorname{tg} \alpha_L = \frac{1}{(2J_L^0)^{\frac{1}{2}} (\Delta H_{pp}^G)^2}$$

linię Lorentza można zapisać w postaci:

$$Y_L = B_L + X \operatorname{tg} \alpha_L \quad (5)$$

Po wprowadzeniu oznaczeń:

$$Y_G = \ln \frac{H - H_0}{J_G} ; B_G = -\ln \frac{2e^{\frac{1}{2}} \cdot J_G^0}{\Delta H_{pp}^G} ; X = (H - H_0)^2 ; \operatorname{tg} \alpha_G = \frac{2}{(\Delta H_{pp}^G)^2}$$

linia Gaussa otrzyma postać:

$$Y_G = B_G + X \operatorname{tg} \alpha_G \quad (6)$$

Postacie równań (5) i (6) świadczą o tym, że w układzie współrzędnych:

$$\left[\frac{H - H_0}{J_L} \right]^{\frac{1}{2}} ; (H - H_0)^2$$

linia Lorentza, natomiast w układzie współrzędnych:

$$\ln \frac{H - H_0}{J_G} ; (H - H_0)^2$$

linia Gaussa będą liniami prostymi o współczynnikach kierunkowych odpowiednio $\operatorname{tg} \alpha_L$ i $\operatorname{tg} \alpha_G$.

Van Vleck [12] udowodnił, że w przypadku, gdy w danej substancji paramagnetycznej występują zarówno oddziaływania wymienne jak i statyczne oddziaływania dipolowe a linia absorpcji EPR ma kształt pośredni, tylko ta część linii EPR ma kształt Lorentza, dla której:

$$H_0 - H_e < H < H_0 + H_e.$$

gdzie: $H_e = \frac{E_e}{g \cdot \beta}$ i jest tzw. polem wymiany.

Oddziaływania wymienne nie mogą wtedy uśrednić lokalnych pól magnetycznych dla tych cząstek, dla których pola te różnią się znacznie od średniej wartości. Dlatego centralna część linii $|H - H_0| < H_e$ powinna spełniać równanie Lorentza, natomiast jej brzegi $|H - H_0| > H_e$ powinny być opisane równaniem Gaussa. Przedstawiając zatem badaną linię EPR w układzie współrzędnych Gaussa powinniśmy w przedziale $|H - H_0| > H_e$ uzyskać linię prostą, natomiast ta część linii rezonansowej, która leży poza tym przedziałem, powinna być linią prostą w układzie współrzędnych Lorentza. Z przebiegów badanej linii EPR w układzie współrzędnych Gaussa i Lorentza można określić przedziały, w których linia ta ma kształt Gaussa oraz Lorentza, oszacować pole H_e i energię E_e wymiany, a z równań (5) i (6) obliczyć charakterystyczne parametry części gaussowskiej $J_G^{\prime 0}$, ΔH_{pp}^G oraz lorentzowskiej $J_L^{\prime 0}$, ΔH_{pp}^L linii EPR, za pomocą których można oszacować pole pod częścią lorentzowską:

$$S_L = 2 \left(\frac{4}{3}\right)^2 \cdot J_L^{\prime 0} (\Delta H_{pp}^L)^2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{H_e}{\left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta H_{pp}^L} \quad (7)$$

i gaussowską:

$$S_G = \frac{1}{2} \pi \cdot e^{\frac{1}{2}} \cdot J_G^{\prime 0} (\Delta H_{pp}^G)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\frac{2H_e}{\Delta H_{pp}^G}} e^{-t^2} dt \right] \quad (8)$$

Do określenia rozmieszczenia paramagnetycznych centrów powierzchniowych odpowiedzialnych za linię EPR P_B o $g = 2.0055$ i wytworzonych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzanej powierzchni (111) Si wykorzystano zależność Van Vlecka [12] na drugi moment linii EPR μ_2 , określony przez oddziaływanie dipol-dipol pomiędzy centrami paramagnetycznymi zależne od ich wzajemnej odległości r_{1k}

$$\mu_2 = (\Delta H_{1e}^G)^2 = \frac{3}{4} \cdot g^2 \beta^2 \cdot S(S+1) \sum_k r_{1k}^{-6} (3 \cos^2 \theta_{1k} - 1)^2. \quad (11)$$

gdzie:

r_{1k} - średnia wzajemna odległość centrów,

θ_{1k} - kąt pomiędzy r_{1k} i kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego.

Ponieważ dla "wiszących" wiązań powierzchniowych Si sterzących prostopadle do powierzchni (111) Si kąt $\Phi_{1k} = 90^\circ$, a sieć krystaliczna Si jest kubiczna, równania (11) można zapisać w postaci [12]:

$$\mu_2 = (\Delta H_{1s}^G)^2 = \frac{3}{4} g^2 \beta^2 \cdot S(S+1) \cdot Cq^2 \cdot d_0^{-6}, \quad (12)$$

gdzie:

C - stała numeryczna wynosząca dla sieci typu F; C = 7,23,

Q - liczba centrów paramagnetycznych przypadających na komórkę elementarną o stałej sieciowej d_0 .

Przyjmując $Q = 1$ równanie (12) można zapisać:

$$\mu_2 = (\Delta H_{1s}^G)^2 \approx \frac{3}{4} g^2 \beta^2 S(S+1) \cdot Cd^{-6}, \quad (13)$$

gdzie $d = nd_0$ będzie stałą sieciową komórki elementarnej zawierającej jedno centrum paramagnetyczne i można d traktować jako średnią odległość centrów paramagnetycznych w obszarze granicy fazowej Si-SiO₂.

3. METODYKA BADAŃ

Monokrystaliczne płytki (111) Si o oporności właściwej 10 ohm .cm i wymiarach 20 x 2 x 0,2 mm po wymyciu w wodzie dejonizowanej, wygotowaniu w 10% roztworze H₂O₂, wytrawieniu w mieszaninie trawiącej 15HNO₃ : 10 HF: 300 H₂O i powtórny wymyciu w wodzie dejonizowanej wygrzewano próżniowo w $5 \cdot 10^{-5}$ Tora przez 3 godziny w temperaturze 300, 400, 500°C. Po szybkim ochłodzeniu do temperatury pokojowej i zapowietrzeniu rejestrowano ich widmo EPR wytworzonych centrów paramagnetycznych spektrometrem odbiciowym EPR typu WT-1 o czułości 10^{16} spinów . T⁻¹.

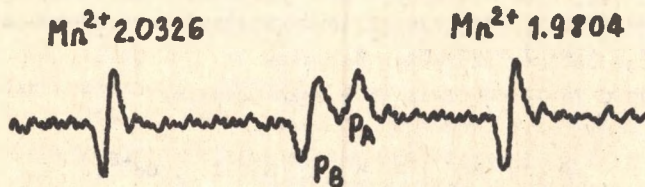
Do określania parametrów linii EPR użyto wzorca Mn²⁺ w MgO, którego dwie linie struktury nadsubtelnej o g odpowiednio 2.0326 i 1.9804, odległe o 8.745 mT, pozwalały na dokładne określenie współczynnika g i szerokości linii EPR, badanych powierzchniowych centrów paramagnetycznych o $g \sim 2$.

Metodykę badań pasywacji próżniowej powierzchni (111) Si metodą EPR opisano dokładnie wcześniej [2, 3].

Z przebiegów badanych linii EPR P_B w układach współrzędnych Gaussa i Lorentza określono przedziały, w których linie te miały kształt Gaussa oraz Lorentza, pole H_e i energię E_e wymiany oraz charakterystyczne parametry części gaussowskiej i lorentzowskiej, za pomocą których obliczono pola pod częścią gaussowską i lorentzowską.

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Paramagnetyczne centra powierzchniowe wytwarzane na wygrzanej próżniowo ($5 \cdot 10^{-5}$ Torr, 300, 400, 500°C, 3 godz.), ochłodzonej i zapowietrzonej powierzchni (111) Si dawały dwie linie EPR: szeroką izotropową linię P_B o $g = 2.0055$ i $\Delta H_{pp} = 0,7$ mT oraz wąską anizotropową linię P_A o $g_{\perp} = 2.0015$ i $\Delta H_{pp} \cong 0,4$ mT [1, 2, 3]. Obie linie EPR P_A i P_B na tle linii wzorca Mn^{2+} w MgO przedstawia rys. 1.



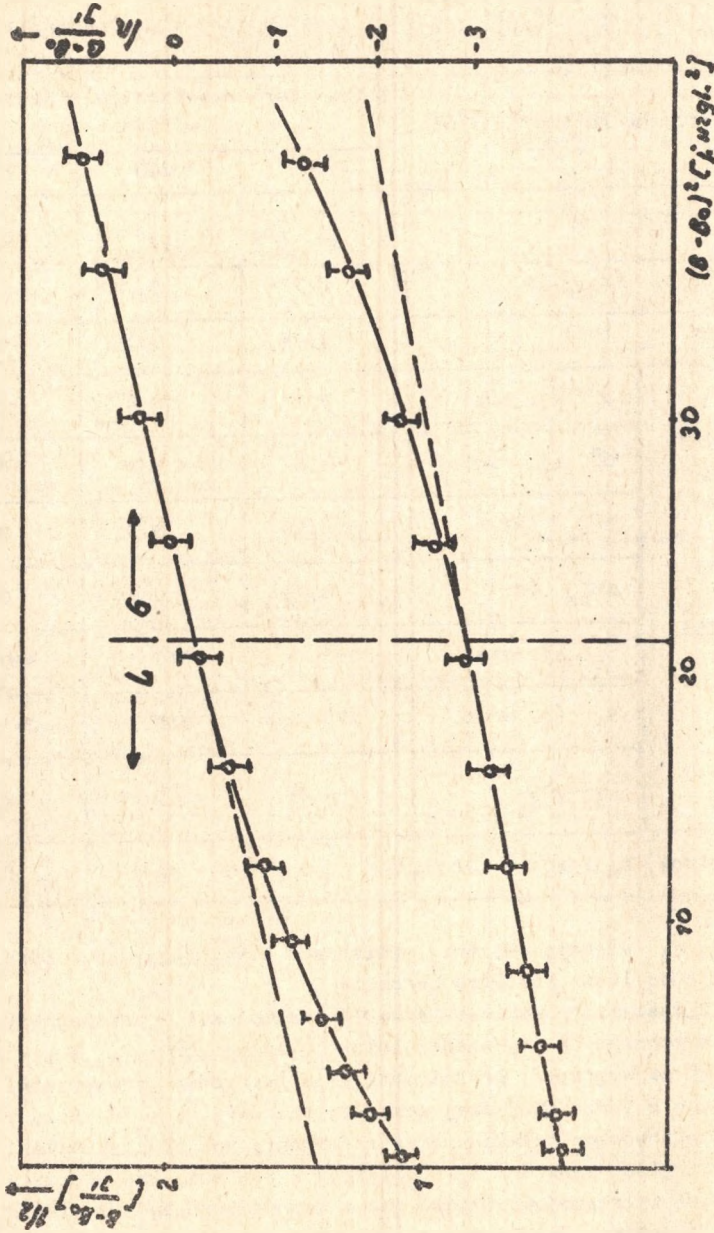
Rys. 1. Linie EPR P_A i P_B paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzonej powierzchni (111) Si

Linie P_B o $g = 2.0055$ przypisano niesparowanym elektronom Si o strukturze $-Si$, zlokalizowanym w granicy fazowej $Si-SiO_2$ przy powierzchni Si i stabilizowanym przez mostki tlenowe [2, 3].

Na rys. 2a i b przedstawiono przebiegi linii P_B o $g = 2.0055$ paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygrzanej próżniowo w 400°C i zapowietrzonej powierzchni (111) Si, w układach współrzędnych Gaussa i Lorentza. Z przebiegów badanych linii EPR P_B paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygrzanej próżniowo w temperaturze 300, 400 i 500°C i zapowietrzonej powierzchni (111) Si w układach współrzędnych Gaussa i Lorentza określono przedziały, w których linie te miały kształt Gaussa i Lorentza, oszacowano pole H_0 i energię E_e wymiany oraz charakterystyczne parametry części gaussowskiej i lorentzowskiej, za pomocą których obliczono pola pod krzywą gaussowską i lorentzowską. Otrzymane wyniki wraz z podstawowymi parametrami linii P_B zestawiono w tabeli 1.

Widać z niej, że ze wzrostem temperatury wygrzewania próżniowego rośnie natężenie linii P_B , pole i energia wymiany oraz udział części lorentzowskiej w całkowitym polu powierzchni pod linią P_B , maleje natomiast szerokość linii P_B .

Prawdopodobnie, ze wzrostem temperatury wygrzewania próżniowego wzrasta ilość wytwarzanych paramagnetycznych centrów powierzchniowych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzonej powierzchni (111) Si, zmniejszają się ich wzajemne odległości, w wyniku czego oddziaływania wymienne pomiędzy centrami B zaczynają przeważać nad statycznymi oddziaływaniami dipolo-



$g \text{ przegl.} = 2.011 \text{ mT}$

Rys. 2. Przebiegi linii EPR Pb paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygranej próżniowo i zapowietrzzonej powierzchni (111) Si w układzie współrzędnych Gaussa i Lorentza

Tabela 1

Charakterystyczne parametry części gaussowskiej i lorentzowskiej linii EPR P_B o $g = 2.0055$

Charakterystyczne parametry linii EPR P_B o $g = 2.0055$		Temperatura wygrzewania próżniowego ($^{\circ}\text{C}$)		
		300	400	500
Intensywność linii J° (j. wzgl.)		10	17	30
Szerokość linii ΔH_{ppB} (mT)		0,77	0,72	0,68
Pole wymiany H_e (mT)		0,44	0,50	0,55
Charakterystyczne parametry części gaussowskiej i lorentzowskiej linii EPR P_B o $g = 2.0055$	J_L° (j. wzgl.)	9,2	9,4	10,2
	J_G° (j. wzgl.)	6,6	8,7	10,2
	ΔH_{pp}^L (mT)	0,52	0,56	0,59
	ΔH_{pp}^G (mT)	0,73	0,64	0,58
	S_L (j. wzgl.)	259	336	420
	S_G (j. wzgl.)	271	237	211
	$\frac{S_L}{S_L + S_G}$	0,49	0,59	0,67
Energia wymiany $E_e \cdot 10^{-27}$ (J)		8,2	9,4	10,2

wymi i linie P_B ulegają zwężeniu wymiennemu oraz stają się coraz bardziej zbliżone do linii kształtu Lorentza.

W tabeli 2 zestawiono wartości średnich odległości paramagnetycznych centrów powierzchniowych odpowiedzialnych za linię EPR P_B o $g = 2.0055$ i wytworzonych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzonej powierzchni (111) Si, obliczonych z powierzchniowej gęstości spinowej centrów przy założeniu ich monowarstwowego rozkładu oraz z równania Van Vlecka. Widać z niej, że średnia odległość centrów P_B , obliczona z równania Van Vlecka zarówno dla powierzchni wygrzanej próżniowo jak i zapowietrzonej, wyniosła około 40 Å. Ponieważ średnia odległość centrów B na powierzchni wygrzanej próżniowo, obliczona z powierzchniowej gęstości spinowej, przy założeniu monowarstwowego rozkładu centrów była 1,5 razy mniejsza, wydaje się, że centra B na powierzchni wygrzanej próżniowo są zlokalizowane w wysep-

Tabela 2

Średnia odległość paramagnetycznych centrów powierzchniowych odpowiedzialnych za linię EPR P_B o $g = 2.0055$ i wytworzonych na wygrzanej próżniowo w $5 \cdot 10^{-5}$ Tora i zapowietrzonej powierzchni (111) Si, obliczona z powierzchniowej gęstości spinowej centrów przy założeniu monowarstwowego rozkładu na powierzchni (111) Si oraz z równania Van Vlecka

Parametry powierzchniowych centrów paramagnetycznych $B \cdot g = 2.0055$		Temperatura wygrzewania próżniowego (°C)		
		300	400	500
Powierzchnia (111) Si wygrzana próżniowo w $5 \cdot 10^{-5}$ Tora po szybkim ochłodzeniu do temperatury pokojowej	powierzchniowa gęstość spinowa $N_{ssoB} \cdot 10^{13}$ (cm^{-2})	0,8	1,0	1,4
	szerokość linii ΔH_{ppoB} (mT)	0,60	0,64	0,66
	średnia odległość centrów obliczona z N_{ssoB} (Å)	36	32	26
	średnia odległość centrów obliczona z równania Van Vlecka (Å)	41	40	40
Powierzchnia (111) Si wygrzana próżniowo w $5 \cdot 10^{-5}$ Tora, ochłodzona i zapowietrzona	powierzchniowa gęstość spinowa $N_{ssmB} \cdot 10^{13}$ (cm^{-2})	2,4	3,5	5,6
	szerokość linii ΔH_{ppmB}^G (mT)	0,67	0,57	0,51
	średnia odległość centrów obliczona z N_{ssmB} (Å)	20	17	13
	średnia odległość centrów obliczona z równania Van Vlecka (Å)	39	40	40

kach tlenu próżniowego znajdujących się w tlenku naturalnym rozmieszczonym na powierzchni (111) Si wytrawionej i wygrzanej próżniowo.

Ze wzrostem temperatury wygrzewania próżniowego coraz to większe obszary tlenu naturalnego przekształcają się w tlenek próżniowy, wzrasta

ilość centrów B i maleją ich wzajemne odległości w próżniowej granicy fazowej Si-SiO₂. Różnica zaś średnich odległości centrów B na powierzchni wygrzanej próżniowo i zapowietrzanej, obliczonych z powierzchniowej gęstości spinowej przy założeniu monowarstwowego rozkładu centrów oraz z równania Van Vlecka, jest prawdopodobnie spowodowana tym, że pewne obszary granicy fazowej Si-SiO₂ mogą mieć zwiększoną grubość i mogą zawierać zwiększoną liczbę centrów B, co potwierdza fakt istnienia oddziaływań wymiennych pomiędzy nimi.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona metodą liniowej anamorfozy analiza kształtu linii EPR P_B o g = 2.0055 paramagnetycznych centrów powierzchniowych wytworzonych na wygrzanej próżniowo i zapowietrzanej powierzchni (111) Si wykazała, że ze wzrostem temperatury wygrzewania próżniowego oddziaływania wymienne pomiędzy centrami powierzchniowymi w coraz większym stopniu przeważają nad statycznymi oddziaływaniami dipolowymi, w wyniku czego linia EPR P_B ulega zwężeniu wymiennemu i staje się coraz bardziej zbliżona do linii kształtu Lorentza. Jest to prawdopodobnie wynikiem zmniejszenia się średnich odległości pomiędzy centrami B, obliczonych z powierzchniowej gęstości spinowej przy założeniu monowarstwowego rozkładu, ze wzrostem temperatury wygrzewania próżniowego.

P o d z i ę k o w a n i e

Wyrażamy podziękowanie Prof. dr Aleksandrowi Opilskiemu za wnikliwe przejrzenie rękopisu i cenne uwagi.

LITERATURA

- [1] Shiota I., Miyamoto N., Nishizawa J.: Surface Sci. 36 414 (1973).
- [2] Szuber J., Salamon B.: Phys. Stat. Solidi (w druku).
- [3] Szuber J., Salamon B.: Będzie publikowane.
- [4] Haneman D.: Phys. Rev. 170 705 (1968).
- [5] Lemke B.P., Haneman D.: Phys. Rev. Lett. 35 1379 (1975).
- [6] Kaplan D., Lepine D., Petroff Y., Thierry P.: Phys. Rev. Lett. 35 1376 (1975).
- [7] Lemke B.P., Haneman D.: Phys. Rev. B 17 1893 (1978).
- [8] Poole Ch., jr.: Electron Spin Resonance, Comprehensive Treatise on Experimental Techniques-Interscience Publishers New York 1967.
- [9] Tichomirowa W.N., Wojewodski W.W.: Optika i Spektroskopia 7 829 (1959).

- [10] Anderson P.W., Weiss P.R.: Rev. Modern Phys. 25 269 (1953).
 [11] Kubo R., Tomita T.J.: J. Phys. Soc. Japan 9 888 (1954).
 [12] Van Vleck J.H.: Phys. Rev. 74 1168 (1948).

АНАЛИЗ ФОРМЫ ЛИНИЙ ЕПР ПАРАМАГНИТНЫХ ЦЕНТРОВ
 НА ПРОГРЕВАННОЙ В ВАКУУМЕ ПОВЕРХНОСТИ (111) Si
 МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО АНАМОРФОЗА

Р е з ю м е

Проведено, методом линейного анаморфоза, анализ формы линий ЭПР, координат $g = 2.0055$, отвечающих парамагнитным поверхностным центрам, образующимся на прогретой в вакууме и обработанной воздухом поверхности (111)Si.

На основании этого анализа определено природу доминирующих взаимодействий и среднее расстояние между парамагнитными центрами.

Предложено модели роста пленки SiO_2 на пассивированной в вакууме поверхности (111) Si.

ANALYSIS OF THE SHAPE OF EPR LINES OF SURFACE
 PARAMAGNETIC CENTERS ON LOW PRESSURE BAKED (111) Si
 SURFACE BY THE METHOD OF LINEAR ANAMORPHOSIS

S u m m a r y

A method of linear anamorphosis was used in analysis of the shape of EPR lines with $g = 2.0055$ of surface paramagnetic centers on low pressure baked (111) Si surface after introducing air. Basing on this method a kind of dominating interactions between the surface paramagnetic centers and their average distances have been determined. An island model of SiO_2 growth on low pressure baked (111) Si surface after introducing air has been proposed.