

NUMERYCZNE METODY OKREŚLANIA PARAMETRÓW CIENKICH WARSTW MAGNETYCZNYCH GRANATÓW

Ryszard Jabłoński

Opracowano procedurę obliczania stałych anizotropii magnetycznej w domieszkowanych warstwach YIG, na podstawie serii pomiarów FMR (rezonans ferromagnetyczny) przeprowadzonych w dwóch płaszczyznach badanych próbek.

1. WSTĘP

Stałe anizotropii cienkich warstw magnetycznych określa się na ogół z pomiarów przeprowadzonych jedną z trzech metod: 1) badania optyczne 2) pomiar momentu skręcającego, 3) pomiary FMR.

W każdej ze wspomnianych metod, w celu określenia szukanych stałych minimalizuje się energię swobodną próbki. Zanim przystąpiono do przeglądu metod numerycznych przybliżono czytelnikowi postać badanej energii swobodnej.

2. ANIZOTROPIA MAGNETYCZNA

Struktura kubiczna granatu implikuje w nim anizotropię kubiczną, podczas procesu technologicznego powstaje także anizotropia osiowa. W niniejszej pracy nie będziemy zajmowali się fizycznymi mechanizmami powstawania anizotropii. Przyjmując podejście fenomenologiczne oraz posługując się metodą rozwiązywania równań ruchu magnetyzacji z uwzględnieniem anizotropii, przeprowadzoną przez Smit'a [1] i Suhl'a [2], można otrzymać wyrażenie na całkowitą energię swobodną układu F składające się: z energii oddziaływania z polem F_H , energii odmagnesowania F_M , oraz energii anizotropii osiowej F_u i kubicznej F_k . Na podstawie wyników doświadczalnych energię anizotropii można wyrazić jako funkcję kątów, jakie tworzy magnetyzacja z osiami krystalograficznymi kryształu. W niniejszej pracy na podstawie literatury [3 -5] energię swobodną przyjęto w następującej postaci:

$$F = -H_{\text{rez}} [\sin\theta\sin\beta \cos(\varphi-\varphi_H) + \cos\theta\cos\beta] + F_u + F_k \quad (1)$$

$$F_u = H_u \cos^2\theta + B \cos^4\theta + C \cos^6\theta + D \cos^8\theta$$

$$H_u = 2 (K_u/M_s - 4\pi M_s), B=K_B/M_s, C=K_C/M_s, D=K_D/M_s,$$

gdzie K_u, K_B, K_C, K_D - stałe anizotropii osiowej wchodzące do wyrazów stojących odpowiednio przy parzystych potęgach kosinusów.

$F_k = H_1 s + H_2 p + H_3 s^2$, gdzie $H_i = K_i/M_s$ dla $i = 1, 2, 3$

$$s = (\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2), p = \alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2,$$

$\alpha_{1,2,3}$ - kosinusy kierunkowe w stosunku do osi [100], [010], [001].

W eksperymencie FMR próbka umieszczona jest w stałym polu magnetycznym i prostopadle do niego przyłożonym polu mikrofalowym, z warunku na rezonans mamy:

$$\omega = \gamma H_{\text{eff}} \text{ lub } \nu = g\beta/h H_{\text{eff}},$$

gdzie :

ω - pulsacja zmiennego pola magnetycznego o częstotliwości ν ,

γ - współczynnik żyromagnetyczny, g - współczynnik rozszczepienia,

β - magneton Boh'ra, h - stała Planck'a,

ze znanego wzoru [1-2] określamy pole efektywne H_{eff} , które wynosi:

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_{\text{eff}} = \frac{1}{\sin\theta} \left[\frac{\partial^2 F}{\partial\theta^2} \frac{\partial^2 F}{\partial\varphi^2} - \left[\frac{\partial^2 F}{\partial\theta\partial\varphi} \right]^2 \right]_{\theta=\theta_0, \varphi=\varphi_0}^{1/2} \quad (2)$$

θ_0 oraz φ_0 oblicza się z warunków równowagi $\theta = \theta_0, \varphi = \varphi_0$

$$\frac{\partial F}{\partial\theta} = \frac{\partial F}{\partial\varphi} = 0 \quad (3)$$

3. WYBÓR METODY OBLICZEŃ

Problem sprowadza się do rozwiązania równań (1), (2) oraz (3), z których chcemy wyznaczyć

$$H_{\text{rez}} = f(\theta, \varphi, \beta, \varphi_H, A_i), \quad (4)$$

gdzie θ, φ określają położenie wektora magnetyzacji M , natomiast β, φ_H odnoszą się do wektora pola magnetycznego, A_i oznacza stałe anizotropii.

Dla założonej, początkowej wartości H_{rez} oraz parametrów A_j obliczamy z warunków równowagi (3) dla zadanych wartości β oraz φ_H kąty θ i φ . Obliczenia wykonuje się iteracyjnie rozwiązując powyższe dwa równania nieliniowe (3) metodą Newton'a-Raphson'a [6,7]. Otrzymane θ i φ podstawia się do wyrażenia (2), które można przekształcić jako równanie kwadratowe względem H_{rez} . Obliczone stąd pole H_{rez} podstawia się ponownie do wyrażenia (3). Powyższe dwie pętle iteracyjne przerywane są z chwilą osiągnięcia zadanych minimalnych przyrostów $\Delta\theta$ i $\Delta\varphi$ oraz ΔH_{rez} .

Nadmienia się, iż wchodzące do równań (2), (3) pochodne cząstkowe 1-go i 2-go stopnia względem θ i φ przedstawione są w postaci analitycznej. Działanie powyższych dwu pętli pokazuje schemat blokowy rys. 1. Procedura powyższych czynności zbudowana jest jako funkcja FUNCTION FUNC (X,I,A), gdzie X tablica zmiennej niezależnej (β lub φ_H), natomiast zawarta w niej YFIT(I) jest zmienną zależną, w naszym przypadku reprezentuje tablicę H_{rez} . Otrzymany w ten sposób zbiór H_{rez} porównywany jest z wartościami eksperymentalnymi pól rezonansowych do chwili, aż zmiany parametrów A_j spowodują najlepszą zgodność porównywanych krzywych. Kryterium przerywania procesu iteracyjnego jest minimum różnicy kwadratów, innymi słowy musi zachodzić nierówność:

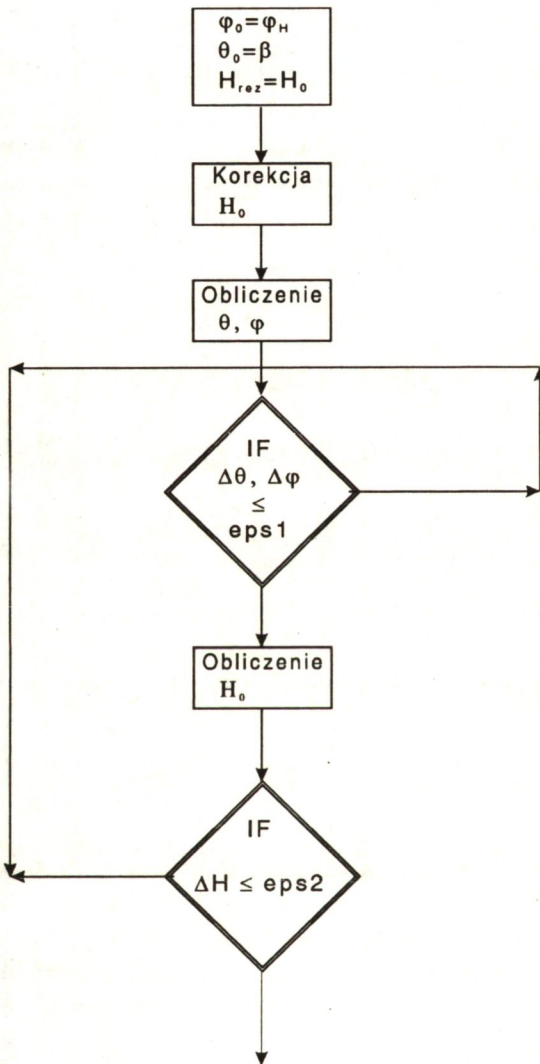
$$\chi \leq \text{eps} ,$$

gdzie:

$$\chi^2 = 1 / (n - \text{nterms}) \sum_i^n (yfit(i) - y(i))^2 \tag{5}$$

n - liczba punktów pomiarowych, nterms - liczba parametrów, eps żądana dokładność np. 10^{-4} .

W tym momencie stajemy przed decyzją wybrania sposobu zmiany parametrów A_j . W bogatej na ten temat



Rys. 1. Schemat blokowy działania funkcji FUNC, symulującej H_{rez} dla zadanych kątów przy znanych parametrach A_j .

literaturze [8-12] pod hasłami optymalizacji procesów, "fitowania", szukania minimum funkcji, autorzy podają szereg algorytmów rozwiązujących postawiony problem. Nie ma jednak uniwersalnej recepty na wybór metody dla danego problemu [12]. Na ogół uznaje się każdy przypadek za indywidualny, a kryterium przydatności danej metody to dokładność i szybkość działania algorytmu. W obecnym czasie ogromnej popularności i rozpowszechnienia komputerów osobistych (PC) istnieje dużo gotowych programów do rozwiązywania takich problemów.

Są to na ogół programy, które między innymi pozwalają na "fitowanie" funkcji badanej wielomianami, funkcjami eksponentialnymi itp. Będą to: SIGMAPLOT 5.1, MicroCal ORIGIN, czy wreszcie MATHCAD 4 oraz ostatnio rozpowszechniany MATHEMATICA 2.2. Ten ostatni ma dość duże możliwości, gdyż można nim fitować dane eksperymentalne funkcjami wprowadzonymi z innego języka np.: FORTRAN'u, TURBO PASCALA. Często jednak istnieje potrzeba posiadania wyspecjalizowanego programu dostosowanego do badanego problemu i wtedy korzystniejsze jest stosowanie procedur istniejących w bibliotekach FORTRAN'u lub PASCAL'a [13], z własnymi uzupełnieniami uwzględniającymi specyfikę badanego zagadnienia.

W niniejszej pracy uruchomiono i przetestowano następujące algorytmy: program simplexowy AMOEBA [13], szukanie minimum paraboli GRIDLS oraz CURFIT stosujący znany algorytm MARQUARD'TA [14].

Algorytm AMOEBA okazał się wrażliwy na wybór punktów startowych, GRIDLS wprawdzie nie miał tej wady, lecz działał stosunkowo wolno. Najlepszym dla naszych celów okazał się CURFIT. Dalsze rozważania będą dotyczyły tylko tego programu. Ze względu na fakt, iż program źródłowy napisano w języku FORTRAN w opracowaniu stosowano kompilator FORTRAN 77 f-my MicroSoft pod handlową nazwą Microsoft FORTRAN wersja 5.1.

4. POMIARY FMR

Próbki miały wymiary 3.5x3.5 mm, grubość warstwy około 10 μm . Przyklejano je do pręta kwarcowego, który umieszczano w rezonatorze spektrometru BRUKER ESP300 pracującego w paśmie X (9.43 GHz) z modulacją pola magnetycznego 100 kHz. Spektrometr jest wyposażony w przepływową kriostat helowy f-my Oxford, dzięki czemu możliwe były pomiary FMR dla kilku temperatur w przedziale 4-300K.

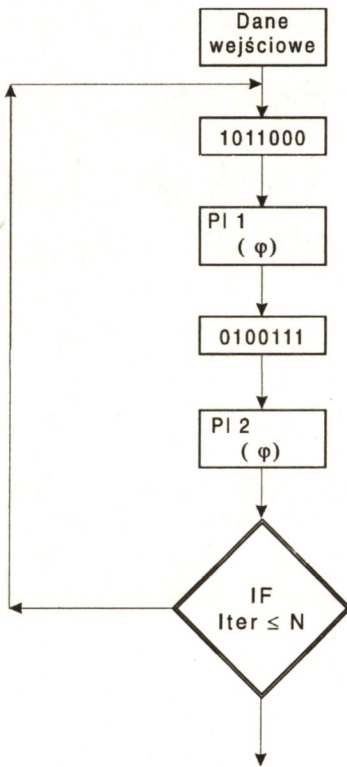
5. OBLICZENIA NUMERYCZNE

W naszych obliczeniach musimy wyznaczyć siedem parametrów, w tym H_1 , H_2 , H_3 reprezentujące anizotropię kubiczną oraz H_u , B , C , D , związane z anizotropią osiową.

Punkty pomiarowe H_{rez} , β oraz φ_H z najmniejszym błędem otrzymano w płaszczyźnie próbek, zmieniając φ_H przy ustalonym $\beta=90^\circ$, jest to płaszczyzna (001). W dalszym

tekście będzie się ją oznaczać (F). Jako drugą płaszczyznę wybiera się (110), w której przy ustalonym $\varphi_H=45^\circ$ zmienia się β , dalej oznacza się ją jako (T).

W pierwszym przybliżeniu stwierdzono, że płaszczyznę (F) można dopasować trzema parametrami tzn. H1, H3, HU pozostałe nie mają istotnego znaczenia. Jeżeli oznaczymy przez 1-parametr fitowany, natomiast 0-parametr ustalony to płaszczyznę (F) fitujemy z filtrem [1 0 1 1 0 0 0]. Natomiast w płaszczyźnie (T) największy wpływ mają H1, H2 oraz B, C, D, z tych względów w płaszczyźnie tej można fitować parametry z filtrem [0 1 0 0 1 1 1]. Przeprowadzone fitowania wszystkich parametrów osobno dla każdej z płaszczyzn programem MCN3, dały dla zadawalającego χ^2 różne komplety szukanych parametrów, co wykluczyło ten sposób postępowania. Oczywiście jest, iż ta sama funkcja dla różnych β oraz φ_H powinna być opisana tymi samymi parametrami. Z tych powodów płaszczyznę (T) "fitowano" stosując filtr [0 1 0 0 1 1 1] z danymi startowymi z płaszczyzny (F), które uzyskano stosując filtr [1 0 1 1 0 0 0], wyniki okazały się lepsze, po wielokrotnym powtórzeniu procesu.



Rys. 2. Schemat blokowy działania programu MCN5.

Powyższy sposób rozumowania doprowadził do modyfikacji programu, który zapewniał wielokrotne dopasowanie z dwoma płaszczyznami, nazwano go MCN5. Schemat blokowy przebiegu iteracji pokazuje rys. 2. Jak widać w tab.1 po 16 iteracjach proces stabilizował się. Jednakże metoda ta okazała się dość długa oraz dająca χ^2 różne dla płaszczyzn (F) i (T) jak pokazano to na rys. 3ab oraz tab.1.

Aby uniknąć osiągnięcia dopasowania minimów lokalnych, które mogą być wymuszane przez selekcję niektórych stałych w wyniku stosowania filtrów, wybrano sposób polegający na jednoczesnym fitowaniu danych pomiarowych z dwóch płaszczyzn. W tym celu zmodyfikowany program MCN3 doprowadził do procedury nazwanej MCN4.

Wyniki działania programu okazały się zadawalające. Działanie jego pokazano w tabeli 2, w której zmiany parametrów następowały przy wartościach startowych dla wszystkich parametrów wynoszących 1×10^{-4} . Program osiąga wynik w ciągu około 1 minuty (pojedynczy krok trwa średnio

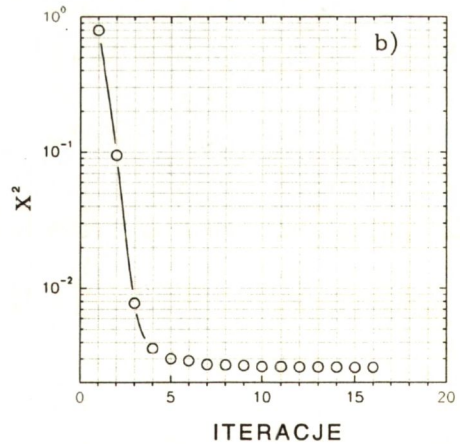
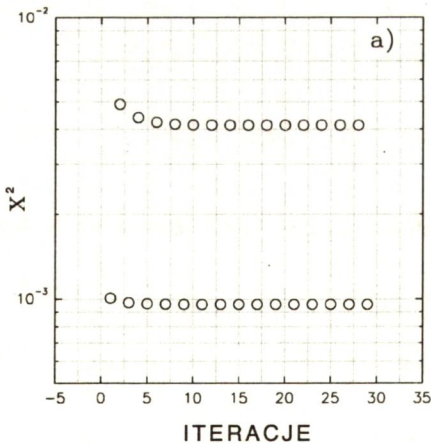
3.15 s.) na komputerze AT 386 DX z koprocesorem 387. Jest to około 30 razy szybciej w porównaniu z działaniem MCN5.

Tabela 1. Wartości parametrów w kolejnych krokach (MCN5) dla próbki (120K).

iter	χ^2	H1	H2	H3	HU	B	C	D
1	.1009E-02	.4116	.0001	-1.6894	-1.6837	.0001	.0001	.0001
2	.4909E-02	.4116	.0759	-1.6894	-1.6837	-1.5891	.6702	.0014
3	.9732E-03	.4161	.0759	-1.6920	-1.6557	-1.5891	.6702	.0014
4	.4405E-02	.4161	.1015	-1.6920	-1.6557	-1.5511	.6299	.0177
5	.9641E-03	.4176	.1015	-1.6925	-1.6461	-1.5511	.6299	.0177
6	.4239E-02	.4176	.1128	-1.6925	-1.6461	-1.5445	.6288	.0167
7	.9604E-03	.4183	.1128	-1.6927	-1.6419	-1.5445	.6288	.0167
8	.4171E-02	.4183	.1166	-1.6927	-1.6419	-1.5396	.6245	.0182
9	.9592E-03	.4185	.1166	-1.6928	-1.6405	-1.5396	.6245	.0182
10	.4148E-02	.4185	.1180	-1.6928	-1.6405	-1.5383	.6236	.0184
11	.9588E-03	.4186	.1180	-1.6928	-1.6400	-1.5383	.6236	.0184
12	.4140E-02	.4186	.1186	-1.6928	-1.6400	-1.5379	.6236	.0184
13	.9586E-03	.4186	.1186	-1.6928	-1.6398	-1.5379	.6236	.0184
14	.4136E-02	.4186	.1188	-1.6928	-1.6398	-1.5379	.6236	.0184
15	.9585E-03	.4187	.1188	-1.6928	-1.6397	-1.5379	.6236	.0184
16	.4135E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
17	.9585E-03	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
18	.4134E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
19	.9585E-03	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
20	.4134E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
21	.9585E-03	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
22	.4134E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
23	.9585E-03	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
24	.4134E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
25	.9585E-03	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
26	.4134E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
27	.9585E-03	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184
28	.4134E-02	.4187	.1189	-1.6928	-1.6397	-1.5378	.6236	.0184

Tabela 2. Wartości parametrów w kolejnych krokach (MCN4) dla próbki 120 K.

t[sek]	χ^2	H1	H2	H3	Hu	B	C	D
.0	.0000E+00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
1.8	.7966E+00	.301	.006	-1.154	-1.045	-.753	-.139	.092
4.9	.9501E-01	.327	-.165	-1.103	-1.419	-.983	-.136	.291
3.2	.7771E-02	.448	.410	-1.758	-1.499	-1.140	.035	.292
3.1	.3608E-02	.465	.400	-1.825	-1.407	-1.218	.245	.183
3.1	.3004E-02	.454	.418	-1.772	-1.476	-1.388	.485	.076
3.1	.2908E-02	.438	.318	-1.708	-1.527	-1.478	.646	-.014
3.1	.2725E-02	.432	.327	-1.695	-1.511	-1.426	.572	.023
4.0	.2701E-02	.435	.224	-1.722	-1.563	-1.463	.564	.038
3.1	.2675E-02	.425	.163	-1.658	-1.589	-1.474	.594	.016
3.1	.2625E-02	.436	.268	-1.702	-1.514	-1.409	.540	.037
4.0	.2624E-02	.436	.268	-1.702	-1.514	-1.409	.540	.037
3.1	.2610E-02	.436	.275	-1.698	-1.516	-1.410	.540	.037
3.1	.2608E-02	.434	.287	-1.698	-1.519	-1.411	.540	.037
3.5	.2605E-02	.435	.297	-1.707	-1.516	-1.411	.540	.037
3.1	.2593E-02	.436	.275	-1.704	-1.519	-1.414	.541	.038
3.4	.2591E-02	.436	.279	-1.703	-1.520	-1.414	.541	.038
56.6	.2591E-02	.436	.279	-1.703	-1.520	-1.414	.541	.038



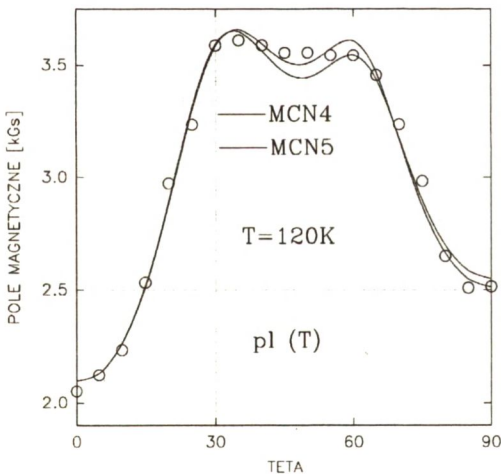
Rys. 3. a) Zmiany χ^2 dla płaszczyzny (F) oraz (T) w wyniku działania programu MCN5, b) "fitowanie" jednoczesne obu płaszczyzn program MCN4.

Tabela 3. Wartości parametrów otrzymanych różnymi sposobami dopasowania dla próbki w temperaturze 120 K.

lp.		χ^2	H1	H2	H3	HU	B	C	D
1.	MCN4	0.2591×10^{-2}	0.4362	0.2791	-1.703	-1.520	-1.414	0.5410	0.03799
2.	MCN5	0.2546×10^{-2}	0.4187	0.1189	-1.693	-1.640	-1.538	0.6236	0.01835
3.	ΔM		0.0175	0.1602	0.010	-0.120	-0.124	-0.0826	0.01964
4.	$\Delta M\%$		4.01	57.3	0.59	-7.89	-8.49	-15.27	51.7

Uwagi: w pozycji 2 χ^2 jest średnią z $\chi^2_T = 0.4134 \times 10^{-2}$ oraz $\chi^2_F = 0.9585 \times 10^{-3}$, natomiast pozycje 3 oraz 4 podają różnice między pozycjami 1 i 2.

Interesujące jest porównanie wyników z obu programów, które zestawiono w tabeli 3. W wierszu 4-tym tabeli pokazano względne różnice między obliczonymi stałymi. Największe różnice występują dla H2 57.3% oraz dla D 51.7%, pozostałe zawierają się w granicach od 4 do 15%. Natomiast χ^2 z obu programów są bardzo podobne. Przeprowadzono obliczenia i symulacje mające za cel określenie wpływu poszczególnych stałych na końcowe dopasowanie. Okazało się, iż zmiana parametru H2 = 0.2791 otrzymana przy stosowaniu programu MCN4 na H2=0.1189 otrzymanego



Rys. 4. H_{rez} w funkcji, kątka -eksperyment, linia ciągła dopasowanie programem MCN4, linia kropkowana dopasowanie programem MCN5.

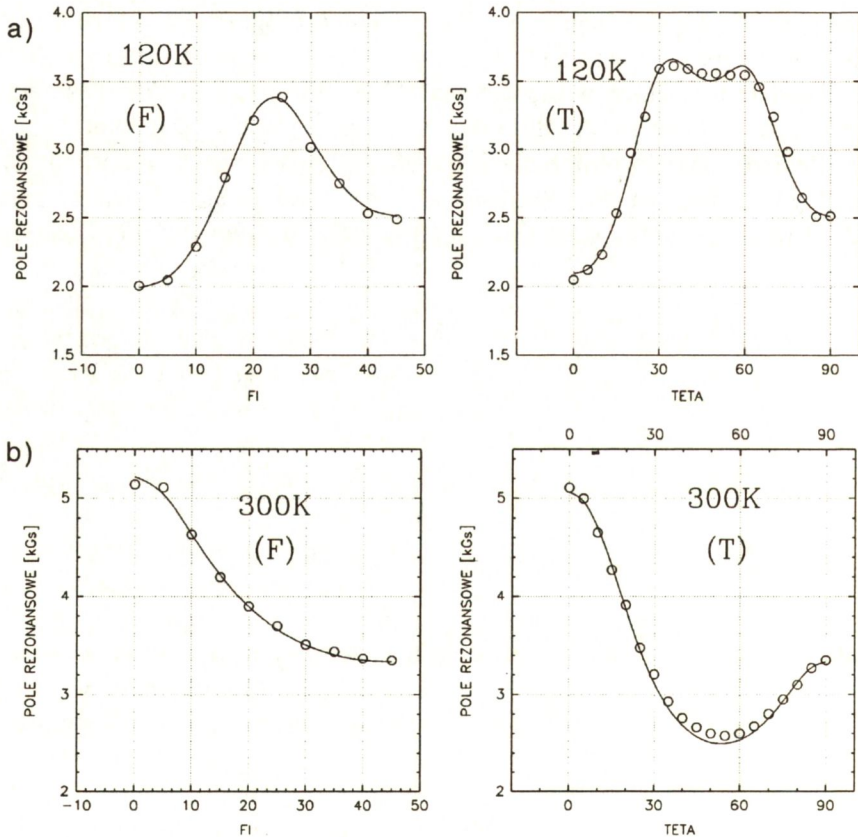
z MCN5 zmieniła $\chi^2 = 0.2591 \times 10^{-2}$ na 0.3915×10^{-2} , co nie miało większego wpływu na kształt badanego przebiegu (patrz rys.4), zaś stała D ma małą bezwzględną wartość i nie ma znaczącego wpływu na χ^2 . Jednak mniejszy błąd otrzymuje się stosując program MCN4, ponadto jest on poprawniejszy ze względu na brak ograniczeń, gdyż dopasowuje wszystkie parametry uwzględniając jednocześnie punkty pomiarowe z obu płaszczyzn bez stosowania filtrów, jak miało to miejsce w programie MCN5. Ostatecznie uznano program MCN4 za poprawniejszy i szybszy.

Wyniki dopasowań na które powołuje się w tekście dotyczą danych dla próbki w temperaturze około 120 K oraz dla tej samej próbki tylko w 300 K (rys.5). Na rysunkach dane eksperymentalne są

Tabela 4. Wartości parametrów dla tej samej próbki obliczone dla T=120 K oraz temperaturze pokojowej.

	χ^2	H1	H2	H3	HU	B	C	D
120 K	0.2591×10^{-2}	0.4362	0.2791	-1.703	-1.520	-1.414	0.5410	0.03799
300 K	0.2113×10^{-2}	-0.8779	-0.2827	0.3389	-0.1617	-0.1822	0.4344	-0.2849

w postaci kółek, natomiast wyniki dopasowań programem MCN4 pokazano linią ciągłą. Jak widać z przytoczonych pomiarów i obliczeń stałe anizotropii dla tej samej warstwy zmieniają się wraz z temperaturą. W przygotowaniu jest praca, w której bada się zmiany anizotropii w funkcji temperatury dla warstw otrzymywanych w różnych warunkach.



Rys 5. Zależności pól rezonansowych FMR w funkcji kąta ϕ_H płaszczyzna (001), (F) oraz w funkcji kąta θ_H płaszczyzna (110), (T) F=9.43 GHz, P=2 mW, dla próbki: a) 120 K, b) 300 K.

6. PODSUMOWANIE

1. Opracowano algorytm (schemat blokowy rys.1.) obliczający wartości pola rezonansowego sygnału FMR dla warstwy o orientacji (001) w funkcji kierunku przykładanego stałego pola magnetycznego przy danych stałych anizotropii.

2. Opracowano program wykorzystujący procedurę CURFIT [14] oraz algorytm nazwany MCN4 umożliwiający obliczenie siedmiu parametrów pola anizotropii ($H_1, H_2, H_3, H_U, B, C, D$) na podstawie jednoczesnego dopasowania punktów eksperymentalnych, wziętych z dwóch płaszczyzn: (001) oraz (110). Powyższy program zapewnia także symulację przebiegów $H_{rez} = f(\beta, \varphi_H)$ przy zadanych parametrach. Czas obliczeń fitowania około 1 minuty na komputerze AT 386DX z koprocesorem. Szczegółowy opis programu oraz sam program otrzymać można od autora.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Smit J.: Beliers H.G. Philips Res. Rep. ,10, 1955, 113
- [2] Suhl H.: Phys. Rev. 97, 1955, 555
- [3] Marysko M., Simsova J.: Ferromagnetic resonance study of $Y_{3-z}Ca_zFe_{5-x-y}Co_xGe_yO_{12}$ Films. Czech. J. Phys. B34, (1984), 1125
- [4] Maziewski A.: Unexpected magnetization processes in YIG +Co Films. J.M.M.M 88, (1990), 325-342
- [5] Marysko M., Maziewski A.: Magnetic anisotropy investigation in (210)-oriented Bi substituted magnetic garnets. Physica B 190, (1993), 190-198
- [6] Guter R.S., Owczyński B.W.: Wstęp do metod numerycznych. Warszawa: PWN 1965, 39
- [7] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. Warszawa WNT 1982
- [8] Ralston A.: Wstęp do analizy numerycznej. Warszawa: PWN 1975
- [9] Bjorck A., Dahlquist G.: Metody numeryczne. Warszawa: PWN 1987
- [10] Seidler J., Badach A., Molisz W.: Metody rozwiązywania zadań optymalizacji. Warszawa: WNT 1980
- [11] Goliński J.: Metody optymalizacyjne w projektowaniu technicznym. Warszawa: WNT 1974
- [12] Hiebert K.L.: An evaluation of mathematical software that solves nonlinear least squares problems. ACM Trans.Math.Soft. 7, (1981), (1), 1-16
- [13] Vetterling W.T.: Numerical recipes (Pascal). Cambridge University Press 1988
- [14] Bevington P.R.: Data reduction and error analysis for the physical sciences. New York McGraw-Hill 1969

SUMMARY

THE METHOD OF CALCULATION OF MAGNETIC ANISOTROPY CONSTANTS IN YIG LAYER

The method of calculation of magnetic anisotropy constants in YIG layer was elaborated. The method is based on a number of FMR measurements performed for two different orientations of investigated samples.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОД РАСЧЁТА КОНСТАНТ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ В ПЛЁНКАХ YIG

В работе представлено метод расчёта констант магнитной анизотропии для плёнки YIG. Метод основан на проведении ряда измерений FMR при различных ориентациях исследуемых образцов.