

doi:10.15199/48.2015.12.70

Absorpcja mikrofal przez namagnesowane ferrofluidy

Streszczenie. Opisano budowę układu do badania oddziaływania mikrofal z ferrofluidem umieszczonym w polu magnetycznym, wytwarzanym przez cewki Helmholtza. Częstotliwość mikrofal wynosiła 6,5 GHz. Indukcja pola magnetycznego, skierowanego wzdłuż wiązki mikrofal była zmieniana w zakresie 0-80 mT. W tym układzie umieszczano próbki ferrofluidu o grubości 0-15 mm, składającego się z nanocząstek magnetytu pokrytych kwasem oleinowym i zdyspergowanych w oleju mineralnym. Najważniejszym wynikiem badań jest wykrycie zależności natężenia wiązki mikrofal przechodzącej przez ferrofluid od indukcji pola magnetycznego. Zależność ta może znaleźć zastosowanie w absorberach mikrofal sterowanych polem magnetycznym.

Abstract: The construction of the system for research of microwaves interaction with ferrofluid located in the magnetic field produced by Helmholtz coils is describe. The microwaves frequency equals of 6,5 GHz. The magnetic field induction directed alongside of microwaves beam were change in range of 0-80 mT. The ferrofluid's samples of thickness 0-15 mm consist of magnetite nanoparticles coated by oleic acid and dispersed in mineral oil were tested in this system. The most important result of this investigation is detection that intensity of microwaves transmitted by ferrofluid depends on the applied magnetic field induction. Technological application of this dependence in microwave's absorber controlled by the magnetic field is possible. (**Microwave's absorption by magnetized ferrofluids**)

Słowa kluczowe: ferrofluid, mikrofałe, pole magnetyczne, oddziaływanie.
Keywords: ferrofluid, microwaves. magnetic field, absorption.

Wstęp

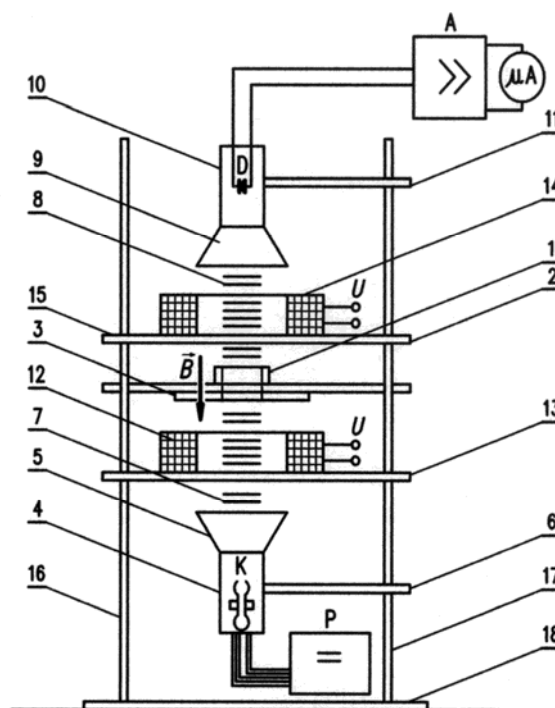
W ostatnich latach obserwuje się wzrastające zainteresowanie bronią elektromagnetyczną, nazywaną bronią E [1]. Działanie tej broni, uznawanej za humanitarną, polega na wysyłaniu impulsowych fal elektromagnetycznych o dużej mocy, szczególnie o częstotliwościach z zakresu mikrofalowego [2]. Impulsy takie napotykając na swojej drodze rozchodzenia się przedmioty wykonane z materiałów przewodzących powodują indukowanie w nich sił elektromotorycznych i przepływ prądów elektrycznych o wysokich natężeniach. W przypadku napotkania urządzeń elektrycznych i elektronicznych indukowane prądy powodują ich zniszczenie [3]. Głównym celem rażenia broni E są różnego rodzaju sieci elektroenergetyczne, informatyczne, urządzenia nadawczo-odbiorcze oraz stacjonarny i mobilny sprzęt komputerowy [4].

Ponieważ wymienione obiekty rażenia mają istotne znaczenie dla funkcjonowania współczesnych państw i społeczeństw, to poszukuje się nowych rodzajów środków zabezpieczających przed działaniem broni E [5]. W ramach tych poszukiwań badane są m.in. różnego rodzaju materiały absorbujące energię impulsów mikrofalowych, np. postaci struktur wnękowych, porowatych, kompozytów, farb oraz past i zawiesin. Przydatnym materiałem do tego celu mogą okazać się ferrofluidy. Założenie to wynika z faktu, że ferrofluidy stanowią zawiesiny cząstek o dużej przenikalności magnetycznej, która powoduje wzrost współczynnika absorpcji fal elektromagnetycznych [6]. Ponadto rozkład przestrzenny tych cząstek może być łatwo zmieniany przy użyciu zewnętrznego pola magnetycznego, co pozwoliłoby na sterowanie własnościami absorbującymi takich ośrodków. Omówione przesłanki przyczyniły się do podjęcia badań oddziaływania mikrofal z ferrofluidem, których metoda i wyniki zostaną tutaj przedstawione.

Układ doświadczalny

Do badania absorpcji mikrofal przez ferrofluidy zastosowano układ doświadczalny przedstawiony na rys. 1 i fot. 1. Próbkę ferrofluidu zamkniętą były w cylindrycznym pojemniku 1 o średnicy wewnętrznej 32 mm, wykonanym z pleksiglasu, rys. 2 i fot. 2. Budowa tego pojemnika pozwalała na łatwe zwiększanie ilości zawartego w nim ferrofluidu. Pojemnik został umieszczony poziomo na podstawie 2 z otworem, zaopatrzonej od dołu w przysłonę 3, wykonaną blachy aluminiowej i przeznaczoną do

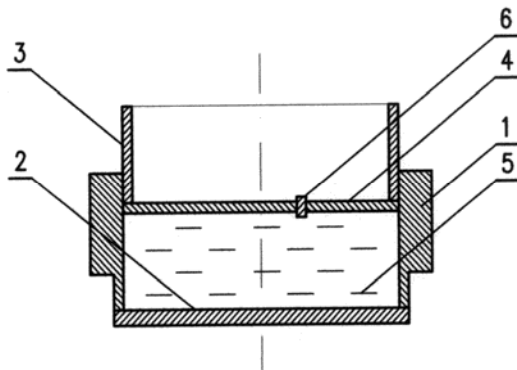
ograniczania szerokości wiązki mikrofal do średnicy wewnętrznej pojemnika. Jako źródło mikrofal zastosowano nadajnik 4, wyposażony w klustron refleksowy typu k-19 [7]. Napięcia niezbędne do pracy klustronu były wytwarzane przez zasilacz P. Częstotliwość mikrofal wynosiła 6,5 GHz, a moc wiązki 35 mW.



Rys. 1. Schemat układu do badania absorpcji mikrofal w ferrofluidach; 1 – pojemnik z ferrofluidem, 2 – podstawa pojemnika, 3 – przysłona, 4 – nadajnik mikrofal, 5 – tuba nadajnika, 6 – uchwyt nadajnika, 7 – wiązka mikrofal padająca, 8 – wiązka mikrofal przechodząca, 9 – tuba odbiornika, 10 – odbiornik mikrofal, 11 – uchwyt odbiornika, 12 – dolna cewka Helmholtza, 13 – podstawa cewki dolnej, 14 – górna cewka Helmholtza, 15 – podstawa cewki górnej, 16, 17 – wsporniki, 18 – podstawa układu, K – klustron refleksowy, P – zasilacz klustronu D – dioda mikrofalowa, A – wzmacniacz, μA – mikroamperomierz, U – napięcie zasilania cewek, B – indukcja pola magnetycznego



Fot. 1. Wygląd zewnętrzny układu, w którym badano absorpcję mikrofal w ferrofluidach



Rys. 2. Budowa pojemnika z ferrofluidem; 1 – dolna część pojemnika, 2 – dno części dolnej, 3 – górna część pojemnika, 4 – dno części górnej, 5 – ferrofluid, 6 – korek odpowietrzający



Fot. 2. Wygląd zewnętrzny pojemnika z ferrofluidem

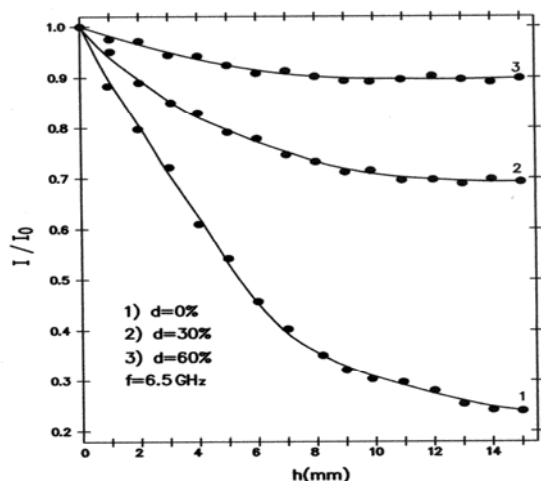
Wychodząca z klustronu wiązka mikrofal była skierowana pionowo od dołu na pojemnik z ferrofluidem za pomocą tuby nadajnika 5 i stanowiła wiązkę padającą 7. Do ferrofluidu przykładano pole magnetyczne, wytwarzane przez układ cewek Helmholtza 12, 14, umieszczonych symetrycznie względem pojemnika na podstawach 13, 14. Kierunek indukcji pola magnetycznego B był równoległy do osi wiązki mikrofal i osi pojemnika z ferrofluidem. Indukcję pola magnetycznego zmieniano w zakresie 0-80 mT za pomocą zmiany napięcia zasilania U cewek Helmholtza. Dzięki zastosowaniu układu tych cewek niejednorodność

indukcji pola magnetycznego wewnątrz pojemnika z ferrofluidem nie przekraczała 8%. Pomiar indukcji pola magnetycznego wykonywano teslomierzem hallotronowym. Po przejściu przez pojemnik z ferrofluidem wiązka padająca 7, przekształcała się we wiązkę przechodzącą 8 i wchodziła do tuby odbiornika 9. Natężenie tej wiązki było mierzone przez odbiornik 10, którego zasadniczy element stanowiła dioda mikrofalowa D, spolaryzowana w kierunku zaporowym. W wyniku tego, gdy do złącza diody nie dochodziły mikrofały, to natężenie płynącego przez nią prądu wynosiło zero [8].

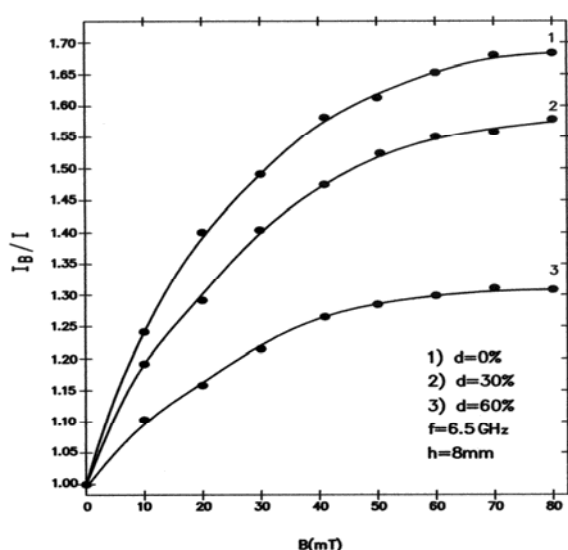
Padanie wiązki mikrofal na złącze diody generowało w nim nośniki ładunku elektrycznego i powodowało przepływ prądu o natężeniu wprost proporcjonalnym do natężenia tej wiązki. Uzyskany w ten sposób prąd był wzmacniany przez wzmacniacz A i mierzony za pomocą mikroamperomierza μA . Na podstawie wskazań mikroamperomierza obliczono stosunek natężenia wiązki przechodzącej przez ferrofluid do natężenia wiązki padającej. Zastosowano ferrofluid zawierający nanocząstki magnetytu o rozmiarach 10-40 nm, pokryte monomolekularną warstwą kwasu oleinowego i zdyspergowane w oleju mineralnym. Warstwa kwasu oleinowego zapobiegała aglomeracji i sedymentacji cząstek. Zawartość magnetytu stanowiła 6,15% masy ferrofluidu i została wyznaczona przy użyciu mikroanalizatora rentgenowskiego. Używano ferrofluidu nierozcieńczonego oraz ferrofluidu rozcieńczonego przez dodanie 30%, albo 60% objętości rozcieńczalnika, którym była mieszanina toluenu i acetonu w stosunku objętościowym 7:3. Wszystkie badania zostały przeprowadzone w temperaturze 24°C.

W pierwszej części doświadczenia zbadano zdolność przepuszczania wiązki padającej mikrofal o ustalonym natężeniu przez warstwę ferrofluidu w zależności od grubości tej warstwy. W tej części doświadczenia do ferrofluidu nie było przyłożone pole magnetyczne. W tym celu w układzie doświadczalnym umieszczono najpierw pusty pojemnik 1 i przepuszczono przez niego wiązkę mikrofal. Za pomocą mikroamperomierza zmierzono przy tym natężenie prądu odpowiadające natężeniu tej wiązki I_0 . Następnie w pojemniku umieszczano coraz większą ilość ferrofluidu, powodując w ten sposób wzrost grubości h , warstwy ferrofluidu, przez którą przechodziła wiązka w granicach od 0 mm do 15 mm z odstępem 1 mm. Dla każdej grubości warstwy mierzono odpowiadające jej natężenie prądu, które było wprost proporcjonalne do natężenia wiązki mikrofal, przechodzących przez tę warstwę I . Na podstawie wyników tych pomiarów obliczono stosunek natężenia wiązki przechodzącej przez warstwę ferrofluidu do natężenia wiązki padającej I/I_0 . Otrzymane wyniki wykorzystano do sporządzania wykresów przedstawionych na rys. 3.

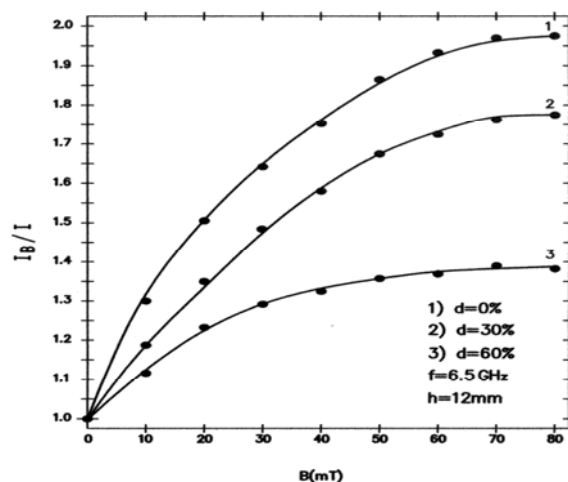
Druga część doświadczenia polegała na zbadaniu zdolności przepuszczania wiązki padającej mikrofal o ustalonym natężeniu przez warstwę ferrofluidu, mającą zadaną grubość od indukcji pola magnetycznego, przyłożonego do ferrofluidu. Badania przeprowadzono dla trzech wybranych warstw o grubościach 4 mm, 8 mm oraz 12 mm. W tym celu w pojemniku umieszczano warstwę ferrofluidu o wybranej grubości i przepuszczano przez niego wiązkę mikrofal. W tych warunkach mierzono natężenie prądu I , odpowiadające wiązce przechodzącej bez pola magnetycznego. Po tym do ferrofluidu przykładano pole magnetyczne w o indukcji B , zmienianej w granicach 0-80 mT z odstępem 10 mT i mierzono natężenie prądu I_B odpowiadające natężeniom przechodzącej wiązki mikrofal. Korzystając z otrzymanych w ten sposób wartości obliczano stosunek I_B/I . Wyniki tych obliczeń wykorzystano do sporządzenia wykresów przedstawionych na rys. 4-6.



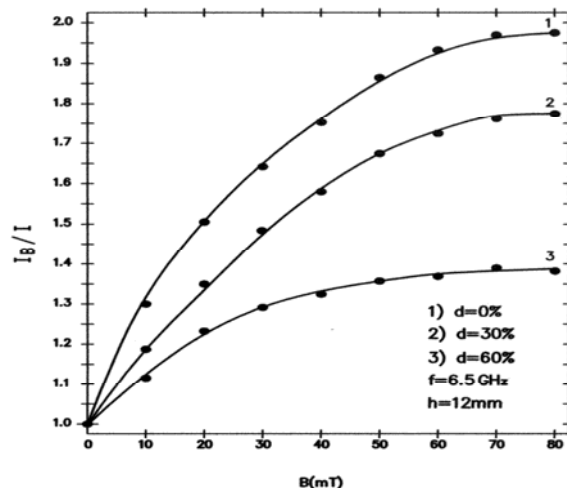
Rys. 3. Zależność stosunku natężenia wiązki przechodzącej do natężenia wiązki padającej I/I_0 od grubości warstwy ferrofluidu h dla różnych stopni rozcieńczenia d



Rys. 4. Zależność stosunku natężenia wiązki przechodzącej po przyłożeniu pola magnetycznego do natężenia wiązki przechodzącej bez pola I_B/I od indukcji pola B dla warstwy ferrofluidu $h = 4$ mm przy różnych stopniach rozcieńczenia d



Rys. 5. Zależność stosunku natężenia wiązki przechodzącej po przyłożeniu pola magnetycznego do natężenia wiązki przechodzącej bez pola I_B/I od indukcji pola B dla warstwy ferrofluidu $h = 8$ mm przy różnych stopniach rozcieńczenia d



Rys. 6. Zależność stosunku natężenia wiązki przechodzącej po przyłożeniu pola magnetycznego do natężenia wiązki przechodzącej bez pola I_B/I od indukcji pola B dla warstwy ferrofluidu $h = 12$ mm przy różnych stopniach rozcieńczenia d

Dyskusja wyników

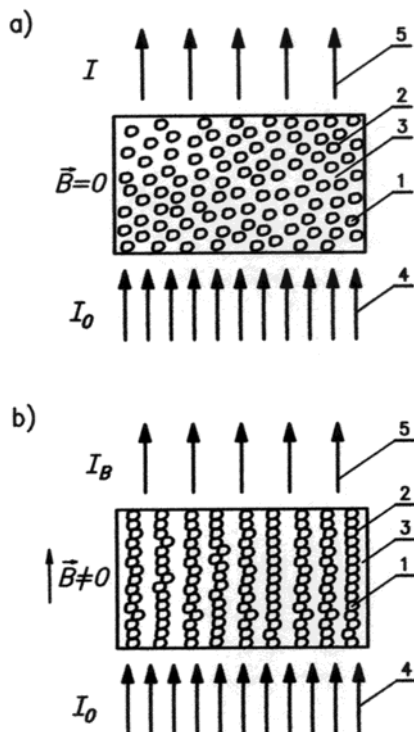
Przeprowadzone badania wykazały, że natężenie wiązki mikrofal przechodzących przez warstwę ferrofluidu I maleje wraz z grubością tej warstwy h , rys. 3. W przypadku nie rozcieńczonego ferrofluidu stwierdzono, że jego warstwa o grubości 15 mm powoduje zmniejszenie natężenia wiązki przechodzącej 3,9 razy, natomiast dla roztworów ferrofluidu zawierającego 30% i 60% rozcieńczalnika osłabienie wiązki przez tę warstwę wynosiło odpowiednio 1,5 i 1,1 razy. Zależność natężenia wiązki przechodzącej I od grubości warstwy ferrofluidu h ma charakter nieliniowy. Dla mniejszych grubości ferrofluidu, w granicach kilku milimetrów, spadek natężenia wiązki przechodzącej zachodzi szybciej, niż dla większych grubości, przy czym tendencja ta jest znacznie słabsza dla ferrofluidów rozcieńczonych. Dla nierozcieńczonego ferrofluidu wzrost grubości warstwy h od 0 mm do 4 mm spowodował spadek natężenia wiązki przechodzącej 1,9 razy, a po dodaniu 60% rozcieńczalnika tylko 1,05 razy. Dla porównania, wzrost grubości warstwy nierozcieńczonego ferrofluidu od 10 mm do 14 mm skutkowało zmniejszeniem natężenia wiązki przechodzącej tylko 1,4 razy, natomiast dla ferrofluidu o zawartości 60% rozcieńczalnika to zmniejszenie było już niezauważalne (zob. krzywa 3 na rys. 3).

Po umieszczeniu warstwy ferrofluidu w polu magnetycznym natężenie wiązki przechodzącej I_B wzrastało wraz ze wzrostem indukcji pola magnetycznego B . Wzrost ten zachodził dla każdej z trzech warstw wybranych do badań o grubościach 4 mm, 8 mm i 12 mm, zarówno w dla ferrofluidów nierozcieńczonych, jak też rozcieńczonych. Szybkość tego wzrostu zależała od grubości warstwy ferrofluidu oraz od jego stopnia rozcieńczenia. Ponadto we wszystkich wymienionych przypadkach zależność natężenia wiązki przechodzącej I_B od indukcji pola magnetycznego B wykazywała charakter nieliniowy. Im grubsza była warstwa ferrofluidu, tym większy był stosunek natężenia wiązki przechodzącej I_B po przyłożeniu pola magnetycznego o maksymalnej indukcji 80 mT do natężenia wiązki przechodzącej I przed przyłożeniem pola. Dla warstwy o grubości $h = 4$ mm stosunek ten wynosił 1,47, a dla grubości $h = 12$ mm był równy 1,97, (por. rys. 5 i 7). Wartości te dotyczą ferrofluidu nierozcieńczonego.

Rozcieńczenie ferrofluidu powodowało natomiast zmniejszenie tego stosunku. W przypadku warstwy o grubości 8 mm, dodanie 60% rozcieńczalnika spowodowało

zmniejszenie tego stosunku z 1,69 do 1,31 (zob. rys. 6). Nieliniowa zależność natężenia wiązki przechodzącej I_B od indukcji pola magnetycznego B przejawia się szybszym wzrostem natężenia w początkowej części zakresu zmian indukcji w porównaniu z końcową częścią tego zakresu. Prawidłowość ta jest znacznie wyraźniejsza dla ferrofluidów rozcieńczonych, dla których zaobserwowano ustalenie się natężenia wiązki przechodzącej w końcowej części zakresu zmian indukcji (por. krzywe 3 i 1 na rys. 5-7).

Przyczyną stwierdzonych zmian natężenia wiązki mikrofal podczas przechodzenia przez ferrofluid jest jej oddziaływanie przede wszystkim z cząstkami magnetytu, których rozkład przestrzenny ulega zmianie po przyłożeniu pola magnetycznego, rys. 7. W ogólnym przypadku fale elektromagnetyczne padające na ośrodek o wysokiej przewodności elektrycznej i względnej przenikalności magnetycznej zbliżonej do jedności, np. aluminium, czy miedź, ulegają od niego głównie odbiciu, a ponadto wnikają do ośrodka na niewielką głębokość. Fale wnikające ulegają przy tym silnemu tłumieniu. Natężenie fali wnikającej I_w , na głębokości x , mierzoną od powierzchni ośrodka, wyraża się wzorem [6]



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie transmisji wiązki mikrofal w ferrofluidzie a) przed przyłożeniem pola magnetycznego, b) po przyłożeniu pola; 1 – cząstka magnetytu, 2 – substancja powierzchniowo-czynna, 3 – ciecz dyspersyjna, 4 – wiązka padająca 5 – wiązka przechodząca, I_0 – natężenie wiązki padającej I – natężenie wiązki przechodzącej bez pola magnetycznego, I_B – natężenie wiązki przechodzącej po przyłożeniu bez pola magnetycznego, B – indukcja pola

$$(1) \quad I_w = I_0 e^{-\frac{x}{u}}$$

gdzie: I_0 – natężenie fali padającej, u – umowna głębokość wnikania, dla której natężenie fali w ośrodku maleje e razy.

Umowną głębokość wnikania oblicza się ze wzoru:

$$(2) \quad u = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

gdzie: f – częstotliwość fali, σ – przewodność elektryczna ośrodka, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, μ_r – względna przenikalność magnetyczna ośrodka.

Dla wspomnianych ośrodków i częstotliwości z zakresu mikrofalowego umowne głębokości wnikania są bardzo małe i zawierają się w granicach od dziesiątych części milimetra do ułamków mikrometra. Jeszcze mniejsza głębokość wnikania występuje w dobrze przewodzących ferromagnetykach, np. w żelazie lub stali, które mają względną przenikalność magnetyczną znacznie większą niż jeden. W przypadku ośrodka stanowiącego dielektryk, np. tworzywa sztucznego przewodność elektryczna zapisana w mianowniku wzoru (2) jest ponad dwadzieścia rzędów wielkości mniejsza, niż w dla metali [9]. Wynika stąd, że umowna głębokość wnikania jest miliardy razy większa, niż dla metali i fale elektromagnetyczne prawie całkowicie przenikają przez dielektryki. Przykłady te są stosunkowo proste do opisu teoretycznego [10].

Jeżeli natomiast ośrodek jest w pewnym stopniu przewodzący elektrycznie i ma względną przenikalność magnetyczną znacznie większą od jedności, wówczas zachodzi częściowe pochłanianie fal elektromagnetycznych i ich częściowe przenikanie. Umowna głębokość wnikania fal elektromagnetycznych do takiego ośrodka wyraża się znacznie bardziej skomplikowanym wzorem [11]

$$(3) \quad u = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(2\pi f)^4 (\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r)^2 + (2\pi f \sigma \mu_0 \mu_r)^2} - (2\pi f)^2 \epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}$$

gdzie: ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, ϵ_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka.

Przedstawiona sytuacja występuje w przypadku badanych ferrofluidów, w których znajdują się cząstki magnetytu o właściwościach superparamagnetycznych lub w niektórych przypadkach ferromagnetycznych, mające względną przenikalność magnetyczną znacznie większą od jedności. Można stwierdzić, że cząstki te są niezbyt dobrymi przewodnikami prądu elektrycznego. Stwierdzenie to uzasadnia fakt, że przewodność właściwa magnetytu wynosi około 10^4 S/m w temperaturze 25°C [12, 13]. Dla porównania, przewodność właściwa metali w tych warunkach jest rzędu 10^5 - 10^6 S/m, a przewodność właściwa izolatorów zawiera się w granicach 10^{-12} - 10^{-17} S/m. Ponadto, ferrofluid zawiera ciecz dyspersyjną i substancję powierzchniowo czynną, które są dielektrykami. W konsekwencji tego ferrofluid w skali mikroskopowej stanowi ośrodek niejednorodny. Badania innych autorów wykazały, że przy wysokich częstotliwościach pól elektrycznych i magnetycznych, co mam miejsce w przypadku mikrofal, zarówno przenikalność magnetyczna, jak i elektryczna zależą od częstotliwości [14, 15]. Tego typu złożona struktura o zmiennych właściwościach jest bardzo trudna do opisu ilościowego.

Przeprowadzone doświadczenia pokazały jednak, że mikrofały używane do badań częściowo przenikają przez taki ośrodek, a częściowo są w nim pochłaniane oraz, że istotne znacznie dla stopnia pochłaniania mają: grubość warstwy ferrofluidu, jego stopień rozcieńczenia i indukcja przyłożonego pola magnetycznego. Zależności te można wyjaśnić zakładając, że pochłanianie mikrofal następuje głównie przez cząstki magnetytu zawarte w ferrofluidzie. Zmniejszenie ich ilości, w wyniku użycia cieńszej warstwy ferrofluidu lub jego rozcieńczenia, skutkuje obserwowanym wzrostem natężenia przechodzącej wiązki mikrofal. Z kolei zwiększenie stopnia uporządkowania cząstek po przyłożeniu pola magnetycznego i utworzenie struktury

kolumnowo-włóknowej, odkrytej przez Winslowa również skutkuje wzrostem natężenia wiązki przechodzącej [16, 17].

W uporządkowanej strukturze dochodzi do wytworzenia obszarów o zmniejszonej zawartości cząstek magnetytu, w których znajduje się ciecz dyspersyjna, wykazująca mniejszą zdolność pochłaniania mikrofal, co w sposób schematyczny przedstawia rys. 7. Energia pochłanianych w ferrofluidzie mikrofal ulega rozproszeniu w wyniku zmian kierunku namagnesowania cząstek magnetytu, zmian polaryzacji cząsteczek cieczy dyspersyjnej i substancji powierzchniowo-czynnej oraz indukowania mikroprądów wirowych w cząstkach magnetytu. Energia tych mikroprądów ulega z kolei zmianie na ciepło Joule'a. Do rozpraszania tej energii mogą też przyczyniać się drgania cząstek magnetytu, wymuszone zmianami pola magnetycznego mikrofal i tłumione przez siły lepkości cieczy dyspersyjnej. W końcowym efekcie energia pochłoniętych mikrofal powoduje wzrost temperatury ferrofluidu. Przy niewielkiej mocy mikrofal emitowanych z zastosowanego klistronu, (której część tylko dochodziła do pojemnika z ferrofluidem) wzrost temperatury byłby bardzo trudny do zmierzenia w zbudowanym układzie doświadczalnym. W celu przeprowadzenia pomiaru konieczne byłoby m.in. umieszczenie próbki ferrofluidu w kalorymetrze i dokładne termostatowanie układu.

Podsumowując przeprowadzone doświadczenia można stwierdzić, że warstwa ferrofluidu, umieszczonego w polu magnetycznym spełnia rolę sterowanego absorbera mikrofal, pozwalającego na kilkakrotną zmianę ich natężenia. Efekt ten nadaje się do praktycznych zastosowań w innowacyjnych rozwiązaniach technicznych, np. w zdalnie sterowanych filtrach lub adaptacyjnych osłonach przed promieniowaniem mikrofalowym [18].

LITERATURA

- [1] Kubacki R., Wnuk M., Broń elektromagnetyczna – broń przyszłego pola walki, w: Merczyk Z. (red.) *Ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1 (2010), 461-470.
- [2] Bechta K., Broń elektromagnetyczna – istota i znaczenie broń przyszłości, *Spectrum, Biuletyn Organizacyjny i Naukowo-Techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich*, (2011) nr 5-6, 16-19.
- [3] Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E., *High power microwaves*, Second edition, Taylor and Francis Group, New York, London, (2007), 109.
- [4] Borczyński J., Chudroliński J., Oddziaływanie pól elektromagnetycznych małej częstotliwości na organizmy żywe i urządzenia elektroniczne, *Elektronika*, XLIII (2002), nr 5, s. 24-26.
- [5] Sobiech J., Kieliszek J., Pluta R., Stankiewicz W., Modelowanie numeryczne kształtu fantomu do pomiarów pola elektromagnetycznego przez ubiór ochronny, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, s. 293-294.
- [6] Rawa H., *Elektryczność i magnetyzm w technice*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, (1994), 400.
- [7] Hennel J., *Lampy elektronowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1976), s. 130.
- [8] Stecewicz T., Kotlicki A., *Elektronika w laboratorium naukowym*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1994), 63.
- [9] Mizerski W., *Tablice fizyczno i astronomiczne*, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa, (2013), 172.
- [10] Landau J. D., Lifszyc J. M., *Fizyka teoretyczna, Elektrodynamika ośrodków ciągłych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, (2012), 511.
- [11] Wiecheć A., Rola oddziaływań magnetycznych w przemianie Verweya na podstawie badań właściwości magnetycznych magnetytu i cynkoferytów $Fe_{3-x}Zn_xO_4$ ($x \leq 0.05$), Rozprawa doktorska wykonana w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Wydziału fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, (2008) 7.
- [12] Aragón R., Rasmussen R. J., Shepherd J. P., Koenitzer J. W., Hoang J. M., Effect of stochiometry changes of electrical properties of magnetite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 50-54, (1986), nr 3, 1335-1336.
- [13] Chełkowski A., *Fizyka dielektryków*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, (1993), 90.
- [14] Gąsiorek S., Wadas R., *Ferryty, zarys właściwości i technologii*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, (1987), 126.
- [15] Winslow W. M., Induced fibrillation of suspension, *Journal of Applied Physics*, 20 (1949), nr. 12, 1137-1140.
- [16] Černík J., Aggregation of needle-like macro-clusters in thin layers of magnetic fluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 132 (1994), 258-269.
- [17] Bednarek S., Tyran P., Filtr promieniowania elektromagnetycznego i jądrowego, Opis zgłoszeniowy wynalazku, zarejestrowany w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej pod Nr 406996 (2014).

Autorzy: dr hab. Stanisław Bednarek, mgr Paweł Tyran, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, [E-mail: bedastan@uni.lodz.pl](mailto:bedastan@uni.lodz.pl)