

doi:10.15199/48.2021.08.06

Zastosowanie zogniskowanych wiązek mikrofal do wytwarzania silnych impulsowych pól magnetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono projekt układu doświadczalnego do badania materiałów w silnych, impulsowych polach magnetycznych. Do wytwarzania pola wykorzystano ogniskowanie wiązek mikrofal w układzie złożonym z magnetronów albo wirkatorów oraz falowodów, soczewek i zwierciadeł parabolicznych. Wykonane obliczenia pokazały możliwość otrzymania pól magnetycznych o indukcji 9,64 T w obszarze o rozmiarach 10 mm oraz 967 T w obszarze o rozmiarach 0,1 mm. Przedyskutowano zalety i wady proponowanego układu i oceniono jego wykonalność.

Abstract. The experimental setup to research of materials in the pulsed high magnetic fields is presented. Focusing of the microwave beams in the system composed of magnetrons or vircators, and waveguides, parabolic lenses and mirror is exploited in the setup. Executed computation shows possibilities obtaining of the magnetic field induction of 9.64 T in area of 10 mm and 967 T in area of 0.1 mm. Advantages, disadvantages and feasibilities of the setup are discussed. (**Application of the focused microwave beams to generation of the pulsed high magnetic fields**)

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, impuls, parametry, mikrofałe, wiązka, ogniskowanie, zwierciadło soczewka, parabola.

Keywords: magnetic field, pulse, parameters, microwaves, beam, focusing, mirror, lens, parabolas.

Wstęp

Silne pola magnetyczne mają wiele zastosowań. Ogólnie te zastosowania można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej grupy należą zastosowania do celów badawczych, natomiast druga grupa obejmuje zastosowania praktyczne w nowoczesnych technologiach. Przykładami zastosowań z pierwszej grupy są: badanie zjawisk transportu, rezonansu cyklotronowego, efektu Faradaya, niektórych zjawisk kwantowych oraz pomiary parametrów nowych typów nadprzewodników i materiałów [1, 2]. Przykładami zastosowań z drugiej grupy są: diagnostyka obrazowa przy użyciu jądrowego rezonansu magnetycznego, separacja materiałów sypkich, a także broń elektromagnetyczna [3]. Przegląd zakresów silnych pól magnetycznych, ich podstawowe parametry oraz metody wytwarzania zostały podane w tablicy 1.

Wytwarzanie silnych pól magnetycznych, szczególnie o indukcji kilkudziesięciu lub więcej T jest trudnym i skomplikowanym problemem technicznym. Rozwiązanie tego problemu wymaga usunięcia barier powodowanych m.in. przez ograniczoną wytrzymałość oraz przewodność elektryczną i cieplną materiałów, ograniczoną szybkość chłodzenia i moc zasilania. Pola o indukcji magnetycznej mniejszej niż 50 T można wytwarzać w zasadzie przez dowolnie długi czas i stąd są one nazywane polami stacjonarnymi. W tym celu stosuje się cewki zasilane prądem stałym, nazywane umownie magnesami. Są to magnesy: Bittera, polihelikalne, nadprzewodzące lub ich kombinacje nazywane magnesami hybrydowymi [4, 5].

W powodu istnienia przedstawionych barier, pola magnetyczne o indukcji większej, niż 50 T mogą być wytwarzane tylko w formie impulsów. Dla indukcji w zakresie 50-100 T czas trwania tych impulsów jest stosunkowo długi i wynosi 0,1-1 s, dlatego te pola są nazywane polami quasistacjonarnymi. Używa się do tego specjalnych cewek o zwiększonej wytrzymałości, które mimo tego mają ograniczoną trwałość. Czas trwania pól magnetycznych o indukcji powyżej 100 T jest jeszcze krótszy i ulega zmniejszeniu nawet do 10^{-6} s. Pola te wytwarzane są przez cewki jednozwojowe w wyniku kompresji strumienia magnetycznego. Do kompresji wykorzystuje się oddziaływanie elektrodynamiczne, albo materiały wybuchowe. Do wytwarzania pól o najwyższej indukcji magnetycznej $(1,2-2,7) \cdot 10^3$ T stosuje się kaskadową kompresję strumienia magnetycznego tylko przy użyciu materiałów wybuchowych. Wadą tej metody jest

zniszczenie prawie całego układu doświadczalnego (oprócz baterii kondensatorów i przyrządów pomiarowych) po wytworzeniu jednego impulsu pola [6-8]. Oczywiście, ograniczona trwałość układów doświadczalnych lub ich zniszczenie jest poważną wadą [9, 10]. Warto tu dodać, że w warunkach laboratoryjnych najsilniejsze pola o indukcji magnetycznej wynoszącej nawet $4 \cdot 10^4$ T są wytwarzane niejako „przy okazji”. Pola te występują w ognisku silnych impulsów laserów piko- lub femtosekundowych. Stąd też ich czas trwania wynosi 10^{-12} - 10^{-15} s, a zajmowany obszar ma rozmiary ok. 10 μ m.

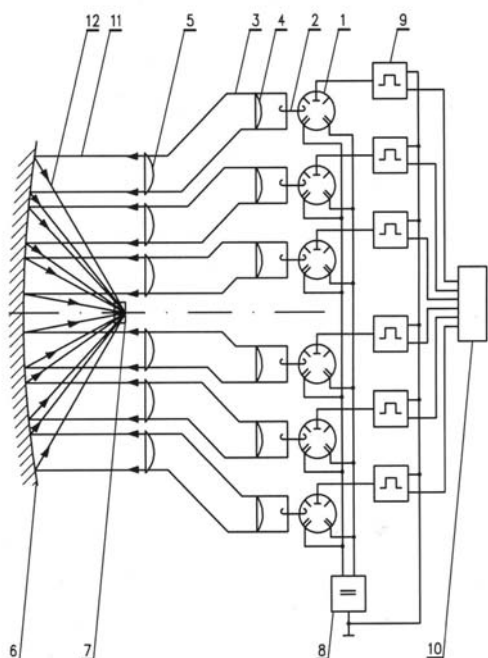
Przedstawiona sytuacja powoduje, że są prowadzone badania w celu opracowania nowych i bardziej skutecznych metod wytwarzania silnych pól magnetycznych [11]. Jednym z interesujących osiągnięć w tej dziedzinie jest np. wywarzanie impulsowych pól magnetycznych o indukcji 50 T przy użyciu mikrocewki nie ulegającej zniszczeniu [12]. Układ przeznaczony do tego celu ma rozmiary wynoszące kilkanaście cm i wymaga dostarczenia bardzo małej ilości energii elektrycznej. Niestety, średnica i długość obszaru, w którym wytwarzane jest pole magnetyczne są ograniczone do kilku μ m, a czas trwania impulsu do 10^{-12} s. Mimo takiego ograniczenia niektórych parametrów pola mikrocewka pozwala na przeprowadzenie badań właściwości magnetoptycznych. Inne podejście polega na wykorzystaniu do wywarzania silnych impulsowych pól magnetycznych wiązki elektronów, przyspieszonych w akceleratorze. W tym przypadku osiągnięta jest indukcja magnetyczna 20 T, w obszarze o rozmiarach kilku μ m, a czas trwania impulsu pola jest rzędu 10^{-12} s [13-15]. Celem tego artykułu jest przedstawienie innowacyjnego projektu układu do wytwarzania silnych, impulsowych pól magnetycznych. Innowacyjność polega na zastosowaniu ogniskowania krótkich impulsów mikrofal na badanej próbce. Zostanie opisana budowa i działanie tego układu oraz będą obliczone podstawowe parametry wytwarzanego pola magnetycznego i przeprowadzona dyskusja otrzymanych wyników.

Budowa układu

Rozpatrywany układ składa się ze źródeł fal elektromagnetycznych 1, umieszczonych regularnie w jednej płaszczyźnie pionowej i tworzących matrycę (rys. 1). Zakłada się, że tymi źródłami są magnetrony impulsowe dużej mocy, które emitują mikrofałe. Zamiast magnetronów impulsowych mogą być też zastosowane wirkatory, emitujące impulsy mikrofal o znacznie większej mocy.

Tabela 1. Parametry i sposoby wytwarzania dostępnych zakresów silnych pól magnetycznych

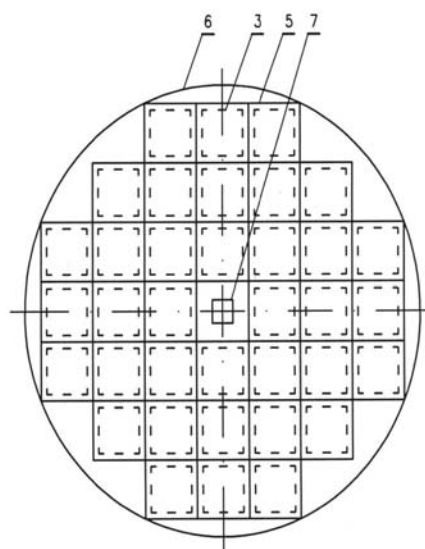
Nr	Indukcja [T]	Czas trwania [s]	Objętość [cm ³]	Metoda wytwarzania	Uwagi
1	0-2	>10 ⁴	1-10 ⁶	magnesy rdzeniowe, magnesy trwałe	pola stacjonarne, metody nie-niszczące
2	2-30	10 ⁴	10-10 ³	magnesy bezrdzeniowe: Bittera, polihelikalne, nadprzewodnikowe	
3	30-50	10 ⁴	10	magnesy hybrydowe	
4	50	10 ⁻¹² -10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	mikrocewka	pola impulsowe, metoda nie-niszcząca
5	50-100	0,1-1	1-10	magnesy bezrdzeniowe (cewki) o wzmocnionej konstrukcji	pola kwasi-stacjonarne, metoda nie-niszcząca
6	10 ² -10 ³	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	1-10	cewki jednozwojowe, elektromagnetyczna kompresja strumienia magnetycznego	pola impulsowe, metody niszczące
7	(1-2,7)·10 ³	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶	1	wybuchowa kompresja strumienia magnetycznego	
8	4·10 ⁴	10 ⁻¹² -10 ⁻¹⁵	10 ⁻⁹	zogniskowany silny impuls lasera piko- lub femtosekundowego	zniszczenie próbki



Rys. 1. Schemat układu do wytwarzania silnych impulsowych pól magnetycznych przez ogniskowanie wiązki mikrofal pokazany w przekroju osiowym; 1 – magnetron, 2 – pętla sprzęgająca, 3 – falowód, 4, 5 – soczewki paraboliczne – odpowiednio: wejściowa i wyjściowa, 6 – zwierciadło paraboliczne, 7 – badana próbka w ognisku zwierciadła, 8 – zasilacz napięcia żarzenia katod, 9 – zasilacz impulsowy napięcia anodowego, 10 – programator, 11, 12 – wiązki mikrofal – odpowiednio: równoległa i zbieżna.

Każdy magnetron jest zaopatrzony w pętlę sprzęgającą 2, wprowadzoną do zamkniętego początku falowodu 3 o kwadratowym przekroju poprzecznym. Zastosowanie falowodów pozwala na sprowadzenie wiązek mikrofal do obszaru o mniejszej powierzchni. Umożliwia to również zwiększenie odległości między magnetronami. Dzięki temu mogą być zastosowane magnetrony o większych rozmiarach i mocach oraz można zapewnić lepsze warunki ich chłodzenia. W początkowej części falowodu 3 jest umieszczona paraboliczna soczewka wejściowa 4, której

ognisko pokrywa się ze środkiem pętli sprzęgającej 2. Końcowe części falowodów są skierowane równolegle do siebie i również tworzą matrycę (rys. 2).

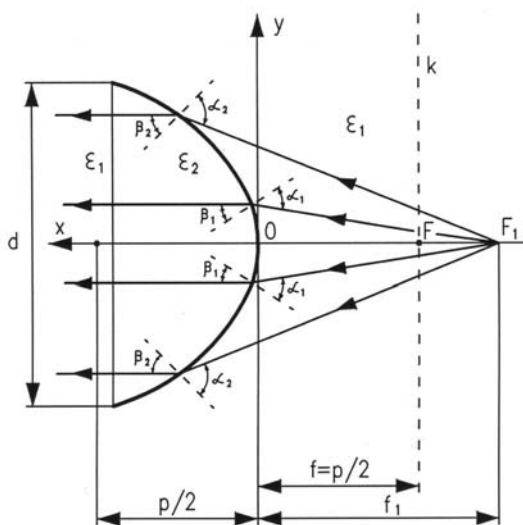


Rys. 2. Sposób rozmieszczenia falowodów o przekroju prostokątnym pokazany w płaszczyźnie prostopadłej do osi zwierciadła parabolicznego; oznaczenia cyfrowe elementów są takie same, jak w opisie rys. 1.

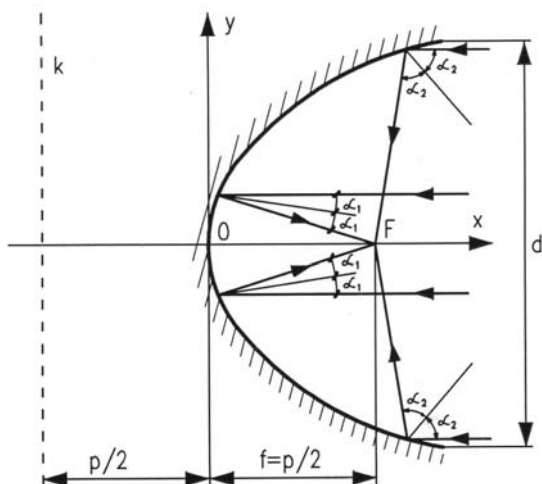
Koniec każdego falowodu został zamknięty paraboliczną soczewką wyjściową 5. Obie soczewki 4, 5 umożliwiają formowanie równoległej wiązki mikrofal. Soczewki są wykonane z dielektryka o dużej przepuszczalności dla mikrofal i dużej przenikalności dielektrycznej ϵ_2 , np. z polietylenu. Za matrycą falowodów jest umieszczone zwierciadło paraboliczne 5, wykonane z blachy miedzianej. Zwierciadło paraboliczne 6 zostało umieszczone współosiowo z matrycą falowodów 3 i w ognisku tego zwierciadła znajduje się próbka 7 badana w polu magnetycznym. Grzejniki katod wszystkich magnetronów są połączone do wspólnego zasilacza napięcia żarzenia 8. Anody magnetronów 1 zostały połączone z oddzielnymi zasilaczami impulsowymi napięcia anodowego 9, które z kolei są połączone z programatorem 10.

Zasada działania układu

Po włączeniu zasilacza napięcia żarzenia 8 i upływie czasu nagrzewania, katody magnetronów 1 osiągają wysoką temperaturę. To powoduje, że z katod zachodzi termemisja elektronów z dostateczną gęstością prądu. Wtedy układ sterujący 10 włącza zasilacz napięcia anodowego 9, które wytwarzają pojedyncze impulsy wysokiego napięcia, przykładowe do anod magnetronów 1. W wyniku tego magnetrony 1 emitują krótkie impulsy mikrofal. W warunkach granicznych czas trwania tych impulsów może być równy połowie okresu fali, na której pracują magnetrony. Dzięki pętli sprzęgającej 2 impulsy mikrofal są wprowadzane do falowodów 3 i przechodzą przez soczewki wejściowe 4. Następnie impulsy poruszają się w falowodach w kierunku soczewek wyjściowych 5. Ponieważ soczewki 4, 5 są wykonane z dielektryka o stałej dielektrycznej ϵ_2 większej, niż stała dielektryczna ośrodka ϵ_1 , to mikrofałe załamują się na powierzchniach soczewek (rys. 3).



Rys. 3. Przejście rozbieżnej wiązki mikrofal przez soczewkę paraboliczną o równaniu przekroju osiowego $y^2 = 2px$; p – parametr paraboli, F – ognisko geometryczne, f – ogniskowa geometryczna, F_1 – ognisko fizyczne, f_1 – ogniskowa fizyczna, d – średnica soczewki, α_1, α_2 – kąty padania wiązek, β_1, β_2 – kąty załamania wiązek, ϵ_1, ϵ_2 – przenikalności elektrycznej materiału odpowiednio ośrodka i materiału soczewki ($\epsilon_2 > \epsilon_1$), k – kierownica paraboli.



Rys. 4. Odbicie równoległej wiązki mikrofal od zwierciadła parabolicznego o równaniu przekroju osiowego $y^2 = 2px$; 0 – wierzchołek zwierciadła, p – parametr paraboli, F – ognisko, f – ogniskowa, d – średnica zwierciadła, α_1 – kąt padania wiązki, α_2 – kąt odbicia wiązki, k – kierownica paraboli.

W tych warunkach soczewki mają własności skupujące. Soczewki wejściowe 4 formują impulsy mikrofal w postaci równoległych wiązek, prowadzonych następnie przez falowody 3, z kolei soczewki wyjściowe 5 kompensują ugięcie mikrofal na wyjściu z falowodów 3 i też formują wiązki równoległe 11, które padają na zwierciadło paraboliczne 6. Wiązki równoległe 11 odbijają się od zwierciadła 6 w sposób pokazany na rys. 4.

Po odbiciu wiązki równoległe zostają przekształcone we wiązki zbieżne 12. Wspólny punkt zbieżności tych wiązek znajduje się w ognisku zwierciadła parabolicznego 5, gdzie została umieszczona badana próbka 7. Zastosowanie soczewek parabolicznych powoduje, że nawet szeroka wiązka rozbieżna zostaje przekształcona we wiązki równoległe, ponieważ soczewki paraboliczne, w odróżnieniu od soczewek sferycznych, nie wykazują aberracji. Również zwierciadło paraboliczne, w odróżnieniu od zwierciadła sferycznego, nie wykazuje aberracji. Dlatego zastosowanie zwierciadła parabolicznego pozwala na dokładne skupienie wszystkich wiązek mikrofal 12 na badanej próbce 7. Ogniskowa f , to jest odległość ogniska zwierciadła parabolicznego F od jego wierzchołka 0 , wyraża się wzorem

(1)

$$f = \frac{p}{2}$$

w którym p oznacza parametr w równaniu paraboli, będącej przekrojem osiowym zwierciadła. Równanie tej paraboli jest następujące

(2)

$$y^2 = 2px$$

W przypadku soczewki parabolicznej ogniskowa wyraża się wzorem

(3)

$$f = \frac{p}{2(n-1)}$$

gdzie n oznacza współczynnik załamania mikrofal przy przejściu z materiału soczewki ϵ_2 do ośrodka ϵ_1 , w którym ta soczewka została umieszczona. Współczynnik n jest równy stosunkowi przenikalności elektrycznej materiału soczewki ϵ_2 do przenikalności elektrycznej ośrodka ϵ_1 , stąd:

(4)

$$n = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

Wzór (1) na ogniskową f wynika z ogólnie znanych, podstawowych właściwości paraboli, natomiast wzór (2) otrzymuje się korzystając ze wzoru (1) i znanego wzoru na ogniskową soczewek stosowanych w optyce. Ponieważ drogi impulsów mikrofal wysłanych przez różne magnetrony 1 do próbki 7 są różne, to żeby wszystkie impulsy spotkały się jednocześnie na próbce 7, należy je wysłać w pewnych odstępach czasu. Te odstępy zależą od położenia, w którym jest zamontowany magnetron wysyłający impuls. Dlatego zasilacze impulsowe 9 muszą przykładać napięcia anodowe do magnetronów 1 w odpowiednich odstępach czasu Δt , które są zostały wcześniej ustalone i są zadawane przez programator 10. Te odstępy wyrażają się wzorem $\Delta t = l/c$, gdzie $c = 3 \cdot 10^8$ m/s oznacza prędkość światła w próżni. W praktycznym rozwiązaniu rozmiary układu l będą wynosiły kilka metrów. Wtedy szacunkowe odstępy czasu Δt obliczone z podanego wzoru są rzędu 10 ns.

Obliczenia parametrów pola

Zgodnie z podanym wcześniej założeniem, do wytwarzania impulsów pola magnetycznego będą zastosowane mikrofałe. Powszechnie przyjmowany zakres częstotliwości mikrofal $f = 1-300$ GHz. Temu zakresowi f odpowiadają długości fal $\lambda = 30-0,1$ cm oraz okresy drgań $T = 1$ ns-3,3 ps. Długości fali λ wyznacza minimalne rozmiary przekroju poprzecznego falowodu, w którym ta fala może się rozchodzić. Do dalszych obliczeń zostanie przyjęta długość mikrofal $\lambda = 2$ cm. Tej długości odpowiada półokres $T/2 = 33,5$ ps. Obliczenia zostaną wykonane dla dwóch przypadków impulsowych źródeł mikrofal. W pierwszym przypadku źródłem każdej wiązki mikrofal będzie magnetron impulsowy o mocy maksymalnej $P_1 = 0,5$ MW. Jest to wartość zawarta w zakresie mocy magnetronów używanych w radarach meteorologicznych, które wynoszą 0,1-1 MW [16, 17]. W drugim przypadku będzie użyty wirnikator o mocy maksymalnej $P_1 = 1$ GW [18, 19]. Indukcja pola magnetycznego B wytwarzanego przez falę elektromagnetyczną o natężeniu I (powierzchniowej gęstości mocy, mierzonej w W/m^2) wyraża się wzorem

(5)

$$B = \sqrt{\frac{\mu_0 I}{c}}$$

w którym $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$ (Vs)/(Am) oznacza przenikalność magnetyczną próżni. W przypadku fali elektromagnetycznej z polem magnetycznym jest związane pole elektryczne, którego natężenie wyraża się wzorem

(6)

$$E = cB$$

Po zogniskowaniu n impulsów moc wynosi P_f i wyraża się wzorem

(7)

$$P_f = \eta n P_1$$

w którym η oznacza współczynnik sprawności układu. Do obliczeń przyjęto $\eta = 0,8$. Współczynnik η zależy m.in. od współczynników odbicia mikrofal od powierzchni falowodów 3 i zwierciadła parabolicznego 6 oraz od współczynnika pochłaniania mikrofal w materiale soczewek 4, 5. Natężenie impulsu mikrofal zogniskowanego w obszarze o rozmiarach d_f oblicza się ze wzoru

(8)

$$I_f = \frac{P_f}{d_f^2}$$

Tabela 2. Parametry pola elektrycznego i magnetycznego wytwarzanego w projektowanym układzie

	Źródło mikrofal			
	magnetron impulsowy $P_1 = 500$ kW		wirnikator $P_1 = 1$ GW	
Parametry pola				
Rozmiary obszaru d_f [mm]	Indukcja magnetyczna B_f [T]	Natężenie pola elektrycznego E_f [GV/m]	Indukcja magnetyczna B_f [T]	Natężenie pola elektrycznego E_f [GV/m]
10	0,22	0,066	9,64	2,89
5	0,43	0,13	19,3	5,78
1	2,15	0,65	96,7	29,0
0,1	21,5	6,45	967	290

wytwarzanego pola magnetycznego B wzrasta wraz ze wzrostem mocy źródła mikrofal P_1 , ilości źródeł n oraz zmniejszeniem rozmiarów d_f obszaru w otoczeniu ogniska F zwierciadła parabolicznego 6. Stąd praktyczny wniosek, że w celu badania próbek w silniejszych polach, należy

Zgodnie ze wzorami (5) i (6) dla indukcji pola magnetycznego B_f oraz natężenia pola elektrycznego E_f zogniskowanego impulsu mikrofal można napisać wzory

(9)

$$B_f = \sqrt{\frac{\mu_0 I_f}{c}}$$

(10)

$$E_f = cB_f$$

P_f ze wzoru (7) zostaje podstawione do wzoru (8) a następnie I_f podstawia się do wzoru (9). Po tym ze wzorów (9) i (10) otrzymuje się końcowe wzory

(11)

$$B_f = \frac{1}{d_f} \sqrt{\frac{\mu_0}{c}} \sqrt{n \eta P_1}$$

(12)

$$E_f = \frac{1}{d_f} \sqrt{\mu_0 c} \sqrt{n \eta P_1}$$

Wzory (11) i (12) zastosowano do obliczenia wartości B_f oraz E_f dla kilku wartości d_f . Do obliczeń wykorzystano przyjęte wcześniej wartości P_1 , η , oraz $n = 100$. Otrzymane wyniki są podane w tabliczy 2.

Dyskusja wyników i wnioski

Istnieją minimalne rozmiary przekroju poprzecznego falowodu, w którym może rozchodzić się fala elektromagnetyczna o danej długości λ . Dla falowodu o przekroju kwadratowym długość boku tego kwadratu a powinna spełniać warunek $a = \lambda$. Ten warunek wyznacza minimalne rozmiary matrycy falowodów. W rozpatrywanym układzie dla $\lambda = 2$ cm i $n = 100$ falowodów, których końcowe odcinki są ułożone obok siebie regularnie na powierzchni kwadratu, otrzymuje się długość boku tego kwadratu $b = 20$ cm. Dla górnej granicy długości mikrofal $\lambda = 30$ cm, odpowiadającej również dłuższemu czasowi impulsu pola, bok analogicznego kwadratu będzie miał długość 3 m. W praktyce długości te będą o kilka cm większe, ponieważ należy dodać grubość ścian falowodów. Rozmiar matrycy falowodów b wyznacza też minimalną średnicę d zwierciadła parabolicznego 6, która powinna spełniać warunek $d = b \sqrt{2}$. W praktyce średnica d powinna być większa od minimalnej w celu uniknięcia efektów brzegowych w wyniku dyfrakcji mikrofal na krawędzi zwierciadła. Podsumowując należy założyć, że dla najdłuższych mikrofal rozmiary układu będą wynosiły kilka metrów.

zwiększyć moc źródeł mikrofal lub ich ilość i badać próbki o mniejszych rozmiarach. Próbki badane w najsilniejszych polach powinny być umieszczane w ognisku F zwierciadła parabolicznego 6 lub w jego pobliżu. W tym obszarze niejednorodności pola są jednak największe. Rozwiązaniem

tego problemu jest używanie do badań próbek o mniejszych rozmiarach. Otrzymane wyniki reprezentują zakres indukcji magnetycznej od 9,64 T w obszarze o rozmiarach 10 mm do 967 T w obszarze o rozmiarach 0,1 mm. Teoretycznie w ognisku F zwierciadła parabolicznego 6 indukcja pola magnetycznego powinna osiągać nieskończoną wartość. Oczywiście w praktyce jest to niemożliwe, m.in. z powodu niedokładności wykonania zwierciadła i niedokładności ogniskowania wiązek. Ponieważ wytwarzane pole magnetyczne jest impulsowe, to zgodnie z równaniami Maxwella, z tym polem jest związane impulsowe pole elektryczne. Obliczone i podane w tablicy 2 wartości indukcji magnetycznej B_f i natężenia związanego z nim pola elektrycznego E_f są to wartości maksymalne dla maksymalnych wartości mocy w impulsie źródła mikrofal.

Najważniejsza zaleta układu polega na wytwarzaniu pól magnetycznych w szerokim zakresie indukcji B i rozmiarów obszaru d_f , zajmowanego przez to pole w sposób nieniszczący, nawet dla indukcji sięgających kilkuset T. Oba parametry pola mogą być łatwo i precyzyjnie kontrolowane, np. przez zmianę ilości włączonych magnetronów 1, kształtu impulsu napięcia anodowego lub położenia badanej próbki 7 względem ogniska F zwierciadła parabolicznego 6. Układ pozwala również na badanie wielu próbek jednocześnie w polach o różnych wartościach indukcji B , przez umieszczenie tych próbek w różnych położeniach względem ogniska F. Można też poddawać te same próbki działaniu wielu impulsów pola wytwarzanych kolejno i mających różne parametry. W układzie mogą być też zastosowane magnetrony przestrajalne. Jest to jeden ze sposobów zmiany długości mikrofal λ i czasu trwania impulsów pola. Wyniki przeprowadzonych obliczeń i analiz sugerują wykonalność rozpatrywanego układu przy użyciu dostępnych obecnie środków technicznych. Dlatego metoda wytwarzania silnych pól magnetycznych przez ogniskowanie impulsowych wiązek mikrofal może okazać się komplementarna lub nawet konkurencyjna w stosunku do innych metod, takich jak: mikrocewka, kompresja strumienia magnetycznego lub zastosowanie długofalowych zakresów promieniowania synchrotronowego [1, 12, 20].

Autor: dr hab. inż. Stanisław Bednarek, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: stanislaw.bednarek@fis.uni.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Kane B. E., Dzurak A.S., Facer G.R., Clark R. G., Starrett R.P., Skougarevsky A., Lumpkin N.E., Measurement instrumentation for electrical transport experiments in extreme pulsed magnetic fields generated by flux compression, *Review of Scientific Instruments*, 69 (1997), nr 10, 3843-3860
- [2] Nojiri H., Takamasu T., Todo S., Uchida K. Haryama T. Katori H.A., Goto T., Miura N., Generation of 500 T fields by

- electromagnetic flux compression and their application to cyclotron resonance, *Physica B*, 201 (1994), 579-583
- [3] Yingchao H., Hongmei L., Jinghui Q., Radio Frequencies Explosive Magnetic Flux Compression Generator and Its Military Applications, *Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information Technology* 51 (2012), 740-746, doi: 10.7763/IPCST.2012.V51.124
- [4] Bitter F., Ultrastrong magnetic fields, *Scientific American*, 213 (1965), nr 1, 65-73
- [5] Karasik V.R., Fizika i technika silnych magnitnych poliej, Izdatelstvo Nauka, Moskva (1964), c. 47
- [6] Byszewski P., Szymborski K. Ekstremalne pola magnetyczne, *Problemy*, 334 (1974), nr 1, 15-20
- [7] Sacharov A. D., Vzryvomagnitnyje gienieratory, *Uspiechy Fiziceskich Nauk*, 88 (1966), nr 4, 725-732
- [8] Novac B. M., Hook N. D., Smith R., Magnetic flux-compression driven by exploding single-turn coil, *Proceedings of IEEE International Power Modular and High Voltage Conference* (2010), 129-132, doi: 10.1109/IPMHCV.2010.5958311
- [9] Nakamura D., Ikeda A., Sawabe H., Matsuda Y. H., Takeyama S., Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux compression, *Review of Scientific Instruments*, 89 (2018), nr 9, 95, 106-95114
- [10] Bednarek S., Project of the system for non-destructive production of high magnetic fields by explosive method, *Physica B*, 293 (2000) 67-74
- [11] Corbet B.L., Price J.L., Corda A.J., Agassi Y.D., Sessions W.D., Flux compression generator, *United States Patent*, 8723390 (2014)
- [12] Mackay K., Bonfim M., Givord D., Fontaine A., 50 T pulsed magnetic fields in microcoil, *Journal of Applied Physics*, 87 (2000), nr 4, 1996-2002
- [13] Back C.H., Siegmann H.C., Ultrashort magnetic field pulses and elementary process of magnetization reversal, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 200 (1999) 774-785
- [14] Siegmann H.C., Garwin E.L., Prescott C.Y., Heidmenn J., Mauri D., Weller D., Allenspech R., Weber W., Magnetism with picosecond field pulses, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 151 (1995), L8-L12 (Letter to the Editor)
- [15] Siegmann H.C., Magnetism in the picosecond time scale with electron accelerators, *Europhysics News*, 31 (2000), nr 6, 24-25
- [16] Belous A., Handbook of Microwave and Radar Engineering, Springer, Berlin (2021), p. 368
- [17] Szturc J., Teledetekcja satelitarna i radarowa w meteorologii i hydrologii, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała (2004), s. 43
- [18] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves, Taylor & Francis, New York (2007), p.437
- [19] Platt R., Low-frequency multigigawatt microwave pulses generated by a virtual cathode oscillator, *Applied Physics Letters*, 54 91989), 1215
- Seroczyńska B., Wojas W.L., Zastosowanie elektromagnetycznego promieniowania do badania elektronowej struktury ciał stałych: promieniowanie synchrotronowe, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, 50 (2009), nr 2, 73-77