

DOŚWIADCZALNY TOR MIKROFALOWY

W powszechnie dostępnych periodykach pojawiały się niekiedy opisy (w tym także w EP) układów pracujących na częstotliwościach 433MHz czy 2,4GHz. W takich układach wykorzystano jednak gotowe moduły, co niewątpliwie jest korzystne z punktu widzenia konstruktora.

Do prób z mikrofalami zniechęca przede wszystkim trudność ze zdobyciem elementów mikrofalowych, jak choćby diod Gunna.

Instytut Technologii Elektronowej, który produkował te diody zarzucił niestety ich produkcję około 10 lat temu.

W naszych realiach tak naprawdę łatwiej o lampy mikrofalowe niż o diody Gunna. Takie lampy znajdują się przede wszystkim w starych zapasach wojskowych.

Choć jest to technika dnia wczorajszego to jest ona w zasięgu naszej ręki.

Opisane urządzenie zostało zaprojektowane jako pomoc naukowa, służąca do demonstracji niektórych zjawisk zachodzących w zakresie mikrofal.

Krótko o mikrofalach

Za mikrofałe przyjęto uważać fale radiowe, których długość jest mniejsza niż 1 m ($\lambda < 1\text{m}$). Odpowiada to częstotliwościom większym od 300MHz (ponad zakresem fal ultrakrótkich). Niekiedy za dolną granicę zakresu mikrofalowego podaje się częstotliwość 1000MHz.

W zakresie większych częstotliwości zakres mikrofal jest ograniczony podczerwienią.

Okazuje się jednak, że górna granica pasma mikrofalowego jest trudna uchwycenia.

Wynika to z dawnego sposobu podziału fal elektromagnetycznych, który uwzględniał sposób ich wytwarzania. Za podczerwień uważano ten zakres fal, które emitują ciała o temperaturze większej od zera bezwzględnego.

Uważano ponadto, że mikrofałe można wytwarzać tylko za pomocą pewnych typów lamp elektronowych. Dopóki generowane przez te przyrządy częstotliwości nie były zbyt duże podział ten był dobry. Ale potem przestał być jednoznaczny gdy okazało się, że można generować bardzo krótkie fale za pomocą specjalnych lamp mikrofalowych. Długość tych fal odpowiadała długości fal podczerwonych.

Zakres mikrofal można podzielić na :

-zakres decymetrowy, $\lambda = 1 \dots 10 \text{ dm}$

-zakres centymetrowy, $\lambda = 1 \dots 10 \text{ cm}$

-zakres milimetrowy, $\lambda = 1 \dots 10 \text{ mm}$

-zakres submilimetrowy, $\lambda < 1 \text{ mm}$.

Dość często spotyka się podział mikrofal na zakresy w kodzie literowym, który powstał w okresie II wojny światowej. Ten podział ujmuje tab.1. Niektóre z tych zakresów są zakresami podstawowymi, inne zaś pomocniczymi. Te drugie oznaczono gwiazdką.

Tab1. podział częstotliwości zakresu mikrofalowego.

pasma	częstotliwość	długość fali λ
P	225-390 MHz	133-77 cm
L	390-1550 MHz	77-19,2 cm
S	1,55-5,2 GHz	19,2-5,75 cm
G *	3,95-5,85 GHz	7,6-5,15 cm
C *	5,85-8,2 GHz	5,15-3,66 cm
X	5,2-10,9 GHz	5,75-2,75 cm
J *	10,9-17,25 GHz	2,75-1,74 cm
K	10,9-36 GHz	2,75-0,83 cm
Q	36-46 GHz	0,83-0,65 cm
V	46-56 GHz	0,65-0,535 cm

Zasięg mikrofal jest w zasadzie ograniczony do zasięgu horyzontalnego. Oznacza to, że dla uzyskania łączności naziemnej anteny nadawcza i odbiorcza powinny się optycznie „widzieć”. Warstwa atmosfery zwana jonosferą słabo pochłania, odbija i ugina mikrofałe. Dzięki temu znalazły one zastosowanie w łączności pozaziemskiej. Ponadto mikrofałe znalazły zastosowanie w radiolokacji (radary) i fizyce (np. spektrometry mikrofalowe). Wszystkim jest chyba znana kuchenka mikrofalowa. Jej działanie opiera się na tym, że woda silnie pochłania mikrofałe i następuje jej grzanie. To tłumienie mikrofal przez wodę może być niekiedy niekorzystne- np. opady deszczu czy mgła ograniczają zasięg fal radarowych.

Względy bezpieczeństwa

Czy nasz generator z klitronem jest bezpieczny? Promieniowanie mikrofalowe może przecież wywierać szkodliwy wpływ na organizmy żywe.

W modelu pracuje klitron 2k25 o maksymalnej mocy wyjściowej 35mW, zaś pole powierzchni wylotu anteny tubowej wynosi 35cm². Zakładając pesymistycznie, że cała moc generowana moc będzie przeniesiona do wylotu anteny tubowej znajdziemy gęstość mocy mikrofalowej przy wylocie tuby równą 1mW/cm². Widzimy więc, że przy samej antenie gęstość mocy mikrofalowej jest dość duża-bezpieczny czas przebywania w takim polu wynosi 20 minut.

W odległości 1 m od anteny gęstość mocy mikrofalowej będzie jednak wynosić zaledwie 0,004 mW/cm² a więc jest to już poziom zupełnie bezpieczny.

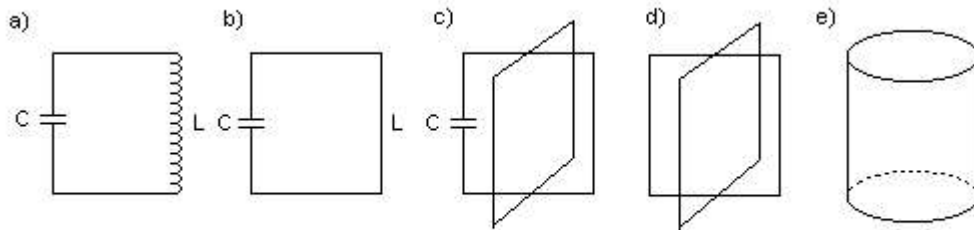
Należy podkreślić, że na promieniowanie mikrofalowe szczególnie wrażliwe oczy. Dlatego też **pod żadnym pozorem niedopuszczalne jest patrzenie w wylot pracującego falowodu. Należy również pamiętać, że lampy z kuchni mikrofalowych –magnetrony są dla naszych celów zupełnie nieprzydatne i niebezpieczne, gdyż generowane przez nie moce liczone są w kilowatach.**

Będziemy używać anten tubowych, które mają właściwości kierunkowe. W związku z tym praktycznie cała wiązka promieniowania mikrofalowego wychodzi z apertury anteny. Generator nie „sieje” więc na wszystkie strony.

Klitrony, jak większość lamp elektronowych wymagają dość wysokich napięć zasilających o wartości setek woltów. Dlatego podczas montażu i wstępnego uruchamiania urządzenia należy zachować szczególną ostrożność. Przed manipulacją przy układzie należy rozładować kondensatory filtrów zasilaczy wysokich napięć poprzez ich zwarcie. Ponadto należy dbać, by stosowane przewody i elementy były przewidziane na odpowiednie napięcia. Jak przy konstrukcji każdego urządzenia elektronicznego wymagana jest staranność montażu.

Wytwarzanie mikrofal

Z racji małej długości fali w zakresie mikrofal nie można stosować obwodów o stałych skupionych. Oznacza to, że obwody złożone ze zwykłych cewek i kondensatorów są tu zupełnie nieodpowiednie. Natomiast nadają się tutaj dobrze elementy takie jak rezonatory wnękowe, falowody prostokątne czy linie współosiowe. Rezonator pełni więc tą sama funkcję co typowy obwód LC. Wymaga to pewnej zmiany myślenia i aby to łatwo zrozumieć radzę spojrzeć na rys.1a.



Rys.1 Kolejne stadia przejścia od obwodu ze stałymi skupionymi do obwodu ze stałymi rozłożonymi (rezonatora cylindrycznego)

Widzimy tam typowy obwód LC. Co jednak zrobić, by obwód LC drgał z większą częstotliwością? Wystarczy zmniejszyć liczbę zwojów cewki. Jednak w końcu okaże się, że dalszej drogi już nie będzie. Cewka ma postać pętli- rys. 1b. Dalsze zmniejszenie indukcyjności można osiągnąć przez dodanie jeszcze jednego zwoju- tak jakby dwie cewki połączyć równolegle- rys.1c. Następnie można pozbyć się kondensatora -rys.1d. Pojemność obwodu stanowi wówczas pojemność rozproszona. Wreszcie przez odpowiedni obrót układu dwóch pętli z rys.1d uzyskujemy rezonator cylindryczny-rys. 1e. Nie jesteśmy już w stanie rozróżnić indukcyjności ani pojemności w tym ostatnim obwodzie. W ten sposób otrzymaliśmy obwód o stałych rozłożonych.

Początkowo próbowano używać do generatorów bardzo wielkich częstotliwości zwykłe lampy. Okazało się jednak, że przy wyższych częstotliwościach jest to zupełnie niemożliwe. Wynika to między innymi z faktu, że elektron potrzebuje pewnego czasu by pokonać odległość między elektrodami lampy, zwanego czasem przelotu. Przy bardzo dużych częstotliwościach czas przelotu stanowi już znaczną część okresu napięcia w.cz i praca generatora jest niemożliwa. W zakresie mniejszych częstotliwości czas przelotu nie ma znaczenia, gdyż stanowi znikomo małą część okresu generowanego sygnału. Aby zmniejszyć czas przelotu należy zmniejszyć odległości między elektrodami lamp albo zwiększyć napięcie między nimi. Niestety wzrastają wtedy pojemności międzyelektrodowe a napięcia nie można ciągle zwiększać. Także indukcyjności doprowadzeń lampy zaczynają mieć znaczenie. Poza tym ze wzrostem częstotliwości rosną straty dielektryczne i promieniowania, co zmniejsza sprawność i maksymalną moc użyteczną uzyskiwaną z lampy. Dlatego zwykłe lampy nie nadawały się do pracy w zakresie poniżej długości fal krótszych od 30cm.

Takie lampy na zakres bardzo wielkich częstotliwości były poza tym bardzo kosztowne. Należało poszukać czegoś innego, aby móc wytwarzać krótsze fale. Powstała więc cała rodzina generacyjnych lamp mikrofalowych. Do ich rozwoju przyczyniła się w dużym stopniu II wojna światowa, ponieważ pojawiło się zapotrzebowanie na radary o dużej zdolności rozdzielczej. Zdolność rozdzielcza radaru jest zaś tym większa, im mniejsza jest długość fali radarowej (czyli większa częstotliwość).

Lampy nadajników radarów musiały więc spełnić dwa ważne kryteria-generować dużą moc przy dużej częstotliwości. Do takich zastosowań idealny okazał się magnetron, stosowany zresztą po dzień dzisiejszy (także w kuchenkach mikrofalowych).

Z kolei lampy generacyjne po stronie odbiorczej (pracujące jako heterodyny) powinny odznaczać się dużą stałością generowanej częstotliwości i łatwym przestrajaniem.

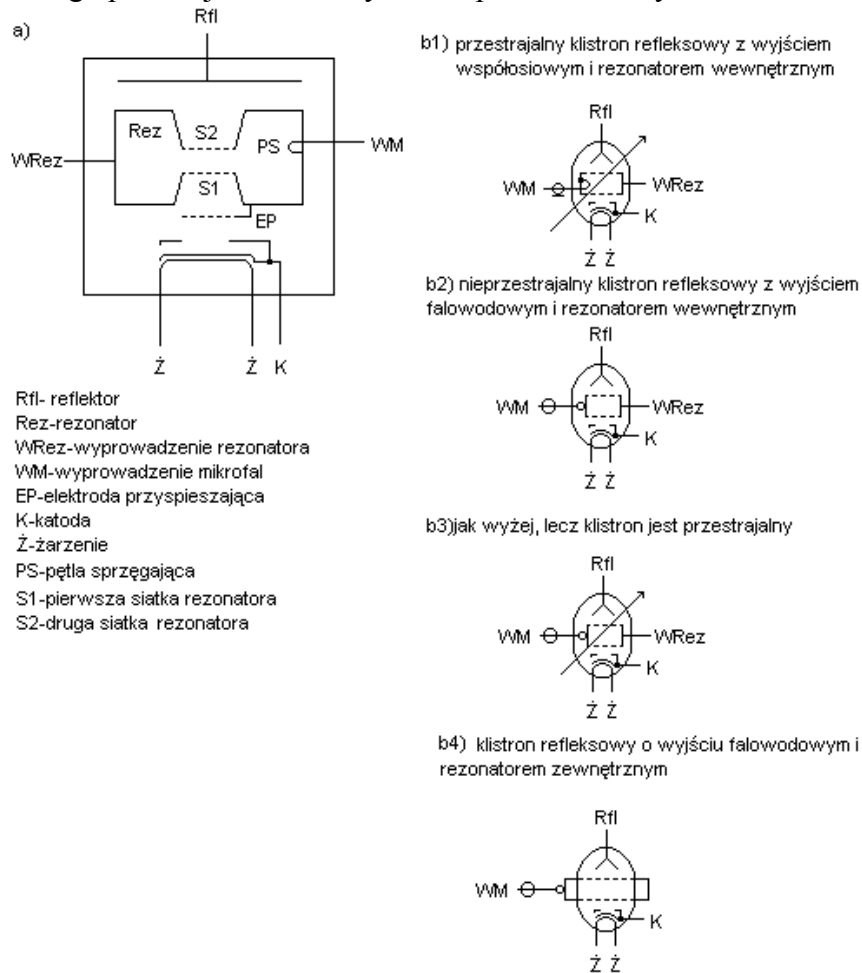
Generowane moce nie muszą być duże.

Do typowych generacyjnych lamp mikrofalowych zalicza się wspomniane magnetrony i klustrony.

Te lampy nie zamykają ogromnej rodziny różnorodnych lamp mikrofalowych, do których można zaliczyć także lampy o fali postępującej (zwane także lampami z falą bieżącą), lampy o fali wstecznej czy zwieraki.

Z kolei te lampy można podzielić na jeszcze inne grupy. Na przykład klustrony można podzielić na dwuobwodowe, wieloobwodowe, refleksowe i multirefleksowe. Dalszy rozwój techniki mikrofalowej było możliwe dzięki opracowaniu odpowiednich przyrządów półprzewodnikowych jak np. diod Gunna.

W tym miejscu zajmiemy się dokładniej jednym typem klustronu- klustronem refleksowym, którego przekrój i niektóre symbole pokazano na rys.2.



Rys. 2 Schemat klustronu refleksowego (a) i niektóre jego symbole (b)

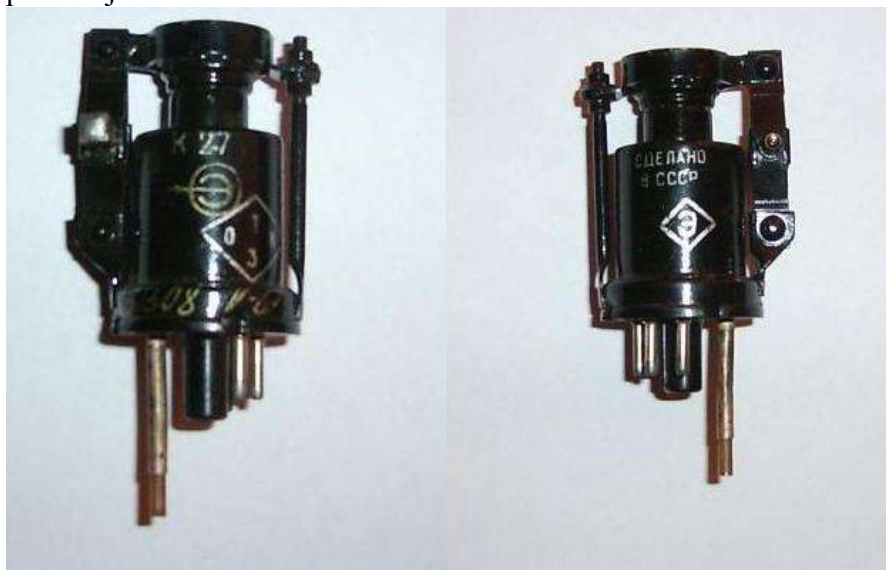
Klustrony refleksowe znalazły zastosowanie jako heterodyny w zakresie fal milimetrych i centymetrych. Należy jednakże nadmienić, że z chwilą wynalezienia przyrządów półprzewodnikowych jak np. diod Gunna, waraktorów ładunkowych czy odpowiednich tranzystorów znaczenie klustronów zaczęło maleć.

Wewnątrz bańki klustronu występuje próżnia. Znajdziemy tam także pośrednio żarzoną katodę K, podobnie jak w zwykłej próżniowej lampie elektronowej. Dalej znajdują się: elektroda ogniskująca EO zwarta z katodą (dla klustronów zakresu milimetrowego ma oddzielne wyprowadzenie), elektroda przyspieszająca EP (połączona zwykle z rezonatorem).

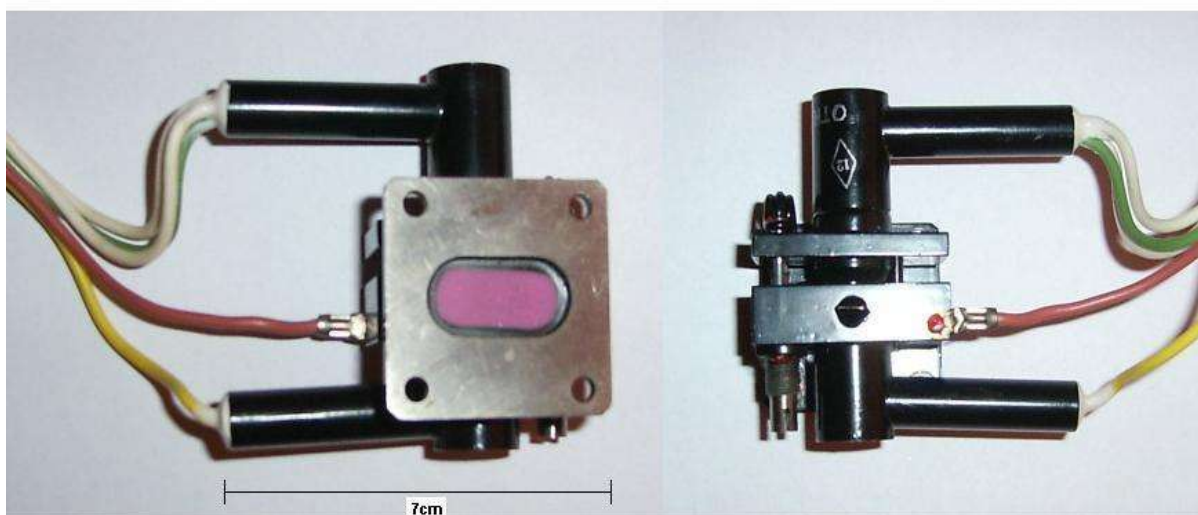
W klustronach pracujących przy wyższych częstotliwościach, a więc w zakresie milimetrym nie ma tej elektrody i jej funkcję przejmuje pierwsza siatka rezonatora Rez. Klustron refleksowy zawiera jeden rezonator wnękowy (Rez). Rezonator może mieć postać toroidu.

Należy zaznaczyć, że niektóre klustrony mają rezonator wewnątrz lampy (np. K-27-fot.1, K-166-fot.2), inne z kolei wymagają rezonatora zewnętrznego (np. k-41-fot.3), nakładanego na lampę. Klustrony mogą mieć możliwość zmiany wymiarów rezonatora np. poprzez pokręcenie

odpowiedniej śrubki (np. K-27, K-166). Mówimy wtedy, że jest możliwe ich mechaniczne przestrajanie.



Fot.1. Wygląd klustronu K-27



Fot.2. Wygląd klustronu refleksowego K-166



fot.3. Klistron K-41

Odprowadzenie energii mikrofalowej z klistronu może być zrealizowane poprzez szczelinę w rezonatorze lub za pomocą pętli sprzęgającej PS umieszczonej w rezonatorze. Mówimy wtedy, że rezonator jest sprzężony magnetycznie z linią przesyłową.

Za drugą siatką rezonatora znajduje się elektroda zwana reflektorem Rfl. Aby klistron zaczął generować należy podać o odpowiedniej wartości napięcie żarzenia, dodatnie napięcie do rezonatora (względem katody) zaś do reflektora napięcie ujemne.

Czy taki opis klistronu jest wystarczający? Zdecydowanie nie, gdyż nie wyjaśnia na jakiej zasadzie następuje w nim generacja mikrofal.

Rozżarzona katoda K emituje elektrony, ogniskowane przez elektrodę EO. Ponieważ elektroda EP jest na potencjale dodatnim względem katody elektrony doznają przyspieszenia. Dlatego obszar między katodą a elektrodą EP jest czasem zwany obszarem przyspieszania. Dopóki przez siatki rezonatora nie przebiegają elektrony dopóty natężenie pola elektrycznego w jego wnętrzu jest równe zeru.

Wyobraźmy sobie, że pierwszy elektron wniknął po minięciu elektrody EP i pierwszej siatki rezonatora do jego wnętrza. Sytuacja ta odpowiada przepływowi prądu przez rezonator, który wskutek tego zostaje pobudzony do drgań. Między siatkami pojawia się więc napięcie zmienne. We wnętrzu rezonatora powstaje zmienne pole elektromagnetyczne, które może działać przyspieszająco lub hamująco na nadlatujące następnie elektrony. W obszarze rezonatora (w jego szczelinie) następuje więc modulacja prędkości elektronów. Zauważmy przy tym, że elektrony przyspieszane pobierają energię z rezonatora, natomiast elektrony hamowane muszą wytracać swoją energię oddając ją rezonatorowi. Elektronów hamowanych i przyspieszanych w jednym okresie napięcia w.cz jest tyle samo, więc w czasie trwania okresu napięcia w.cz rezonator nie zyskuje energii. Elektrony, które miną siatkę drugą rezonatora wchodzi w obszar działania silnego hamującego pola elektrycznego reflektora. Przestrzeń między drugą siatką rezonatora a reflektorem nazywa się obszarem unoszenia lub przestrzenią grupowania.

Pole ma tak duże natężenie, że elektrony nie dolatują do reflektora i są następnie zawracane z powrotem w stronę rezonatora.

Elektrony o większej prędkości dolatują bliżej reflektora i potrzebują więcej czasu by powrócić do szczeliny rezonatora. Z kolei elektrony o mniejszej prędkości powracają do niego

najszybciej. Tak więc jest możliwe by cała grupa elektronów w jednym czasie doleciała do szczeliny rezonatora. Taka zgrana „paczka” tworzy się wokół elektronu przechodzącego przez szczelinę w chwili gdy, pole wielkiej częstotliwości zmienia się z przyspieszającego na hamujące.

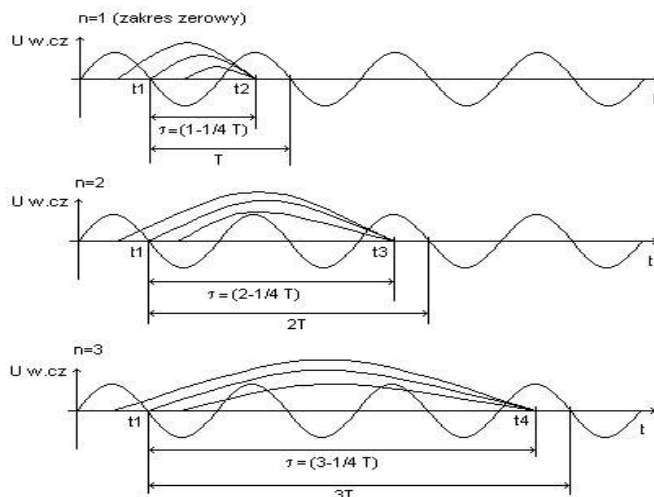
Elektrony zgrupowane oddadzą maksimum energii do rezonatora wtedy, gdy na elektron w środku „paczki” będzie działać możliwie duże pole hamujące występujące między siatkami drugą i pierwszą rezonatora. Z drugiej strony taka „paczka” musi się składać z odpowiednio dużej liczby elektronów, aby energia oddawana przez „paczkę” była w stanie pokryć zawiązką straty występujące w rezonatorze. Tylko wtedy klustron może oddawać moc mikrofalową do obciążenia. Napięcie zmienne w.cz na siatkach rezonatora nie może mieć zbyt dużej wartości, bo nie następowałoby grupowanie elektronów. Dlatego też moc mikrofalowa generowana przez klustrony refleksowe zawiera się od kilku mW do kilku W. Sprawność tych lamp jest niewielka i w praktyce nie przekracza kilku %. Dzieje się tak dlatego, że część mocy dostarczanej przez wiązkę elektronów jest dostarczana do obciążenia lampy. Znaczna część mocy wydziela się w rezonatorze klustronu (jako straty), część zostaje zużyta w procesie modulacji prędkości elektronów.

Dla małych zakresów pracy klustronu napięcia w.cz są większe niż dla zakresów wyższych. Moc strat dla małych zakresów jest duża, bo jest proporcjonalna do kwadratu napięcia w.cz. Może się więc okazać, że moc strat jest większa niż moc dostarczana do rezonatora przez wiązkę. Dlatego zdarza się, że generacja mikrofal przez klustrony rozpoczyna się dopiero przy wyższych zakresach pracy.

Trwałość tych lamp wynosi kilkaset...kilkanaście tysięcy godzin pracy i jest właściwie ograniczona utratą emisji katody (maleje wtedy moc wyjściowa klustronu)

Trochę wykresów...

Jak wykazaliśmy powyżej, rezonator odbiera maksimum energii od grupy elektronów, gdy przelatuje ona przez rezonator przy maksymalnej wartości pola hamującego w.cz. Wynikają stąd pewne optima czasu przelotu grupy elektronów w przestrzeni grupowania.



Rys.3 Określenie czasu przelotu τ elektronów w przestrzeni grupowania przy optymalnych warunkach generacji dla danego zakresu n
 U w.cz - napięcie wielkiej częstotliwości między siatkami rezonatora

Jeśli pole w.cz staje się hamujące dla elektronów powracających od reflektora, to dla lecących w jego stronę pole to staje się hamujące. Dlatego elektrony zgrupowane wokół elektronu, który przeleciał przez rezonator w chwili t_1 (rys.3) powinny do niego powracać w chwili t_2 lub t_3 czy t_4 itd. Oznacza to, że czas przelotu elektronów w przestrzeni grupowania τ powinien być równy jednej z wartości $(1-1/4)T$, $(2-1/4)T$, $(3-1/4)T$ itd. , a więc ogólnie:

$$\tau = \left(n - \frac{1}{4} \right) T,$$

przy czym n jest dowolną liczbą całkowitą, zaś T jest okresem drgań własnych rezonatora. Istnieje więc wiele czasów przelotów w przestrzeni grupowania, przy których klistron generuje drgania przy tej samej częstotliwości.

Czas przelotu jest tym krótszy, im elektryczne pole hamujące wytwarzane przez reflektor jest silniejsze (większe ujemne napięcie na reflektorze) i im większe napięcie stałe przyspieszające na rezonatorze (wyprowadzenie W_{rez}).

W literaturze jednak najczęściej wprowadza się pojęcie kąta przelotu θ , równego iloczynowi pulsacji ω przez czas przelotu τ :

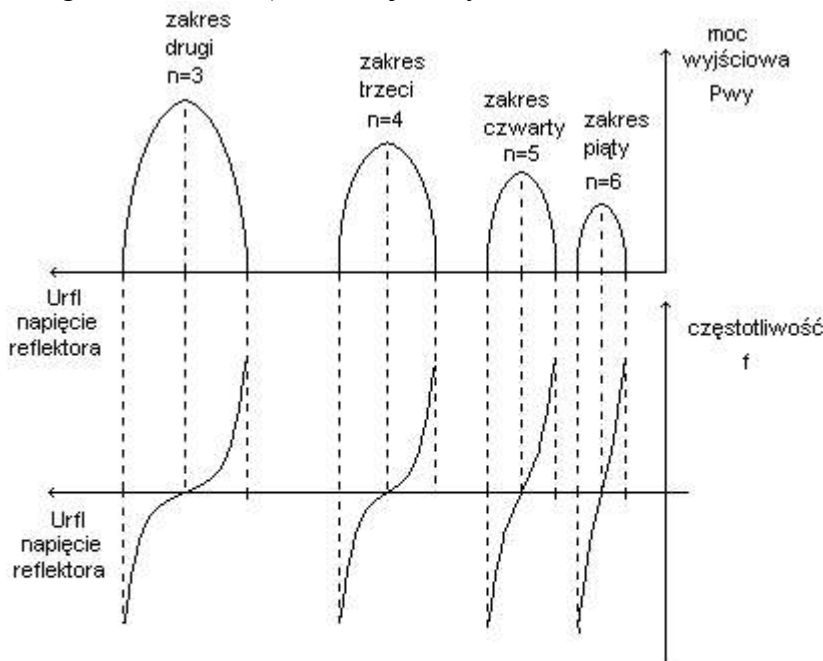
$$\Theta = \omega \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau$$

Kąt przelotu powinien więc przyjmować którąś z wartości:

$$\Theta = \left(n - \frac{1}{4} \right) \omega T = \left(n - \frac{1}{4} \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{1}{f} = 2 \cdot \pi \left(n - \frac{1}{4} \right) [rd]$$

Kąt przelotu zależy oczywiście od napięcia przyspieszającego U_{rez} i napięcia reflektora U_{rf} .

Często mówi się, że klistron generuje np. na zerowym zakresie drgań (zwanym niekiedy obszarem lub strefą drgań). Znaczy to tyle, że liczba $n=1$. Zakres pierwszy odpowiada $n=2$ itd. W przerwach między zakresami drgania nie powstają, ponieważ „paczki” elektronów powracają wtedy, gdy pole w.cz jest dla nich przyspieszające (elektrony nie mogą oddać energii rezonatorowi). Obrazuje to rys.4a.



Rys. 4 Zależność mocy wyjściowej klistronu refleksowego (a) oraz charakterystyki przestrajania elektronowego (b) w funkcji napięcia reflektora U_{rf} przy stałym napięciu przyspieszającym (napięciu stałym zasilającym rezonator)

Zauważmy, że ze wzrostem ujemnego napięcia na reflektorze U_{ref} generowana moc coraz większa, zaś numer zakresu (n) jest coraz mniejszy. Ponadto w każdym zakresie istnieje maksimum mocy oddanej (środek zakresu) przy pewnym napięciu reflektora.

To napięcie nazywa się często optymalnym napięciem danego zakresu.

Podczas zmiany napięcia reflektora w granicach danego zakresu następuje zjawisko przestrajania elektronowego. Dzięki temu bez potrzeby zmiany rozmiarów rezonatora można uzyskiwać zmianę częstotliwości generowanej przez klistron. Zakres przestrajania elektronowego jest określony jako pasmo częstotliwości, przy których klistron generuje moc nie mniejszą od $\frac{1}{2}$ mocy odniesienia. Należy jednak podkreślić, że zakres przestrajania elektronowego jest niewielki. Na przykład dla klistronów pracujących na fali o długości $\lambda=3\text{cm}$ ($f=10\text{GHz}$) wynosi on 20...50MHz.

Ważnym parametrem charakteryzującym klistron jest czułość przestrajania elektronowego S definiowana jako moduł stosunku zmiany częstotliwości do zmiany napięcia reflektora :

$$S = \left| \frac{\Delta f}{\Delta U_{ref}} \right| [\text{MHz/V}]$$

Przebieg przestrajania elektronowego (przestrajanie poprzez zmianę napięcia reflektora) przedstawiono na rys. 4b.

Zauważmy, że im mniejszy numer zakresu tym mniejsza czułość przestrajania elektronowego (mniejsze nachylenie charakterystyki przestrajania). Typowo, dla klistronów pracujących w paśmie 3 cm czułość przestrajania wynosi kilka do kilkunastu MHz/V.

Niestabilność napięć zasilających (zwłaszcza napięcia reflektora) wywołuje niepożądany efekt przestrajania elektronowego.

Jeżeli chcemy stwierdzić, czy klistron generuje, należy w obwód wyprowadzenia rezonatora (Wrez) włączyć miliamperomierz. Podczas dostrajania klistronu (regulując napięcie na reflektorze) można zaobserwować wzrost natężenia prądu zasilającego w obwodzie rezonatora.

Nadajnik

Dlaczego klistron a nie dioda Gunna?

Zdobycie diody Gunna nie jest łatwe. Pojawiają się one bardzo rzadko na aukcjach internetowych. Swego czasu czyniłem próby zakupu tych diod przez zakłady „Rawar”, ale udało mi się nabyć tylko 3 szt. z dawnych zapasów. Znacznie łatwiej o klistron. Można je dość często znaleźć na bazarach i na aukcjach w internecie. Często brak licytujących, gdyż są to lampy raczej mało znane. Cena klistronu waha się z reguły od około 10 do 50 zł, przy czym droższe są klistrony z wyjściem bezpośrednio na falowód prostokątny (jak np. K-166).

Nie wiem, jakimi typami klistronów będzie dysponować Czytelnik, dlatego w tab.2 zebrałem niektóre parametry różnych typów klistronów.

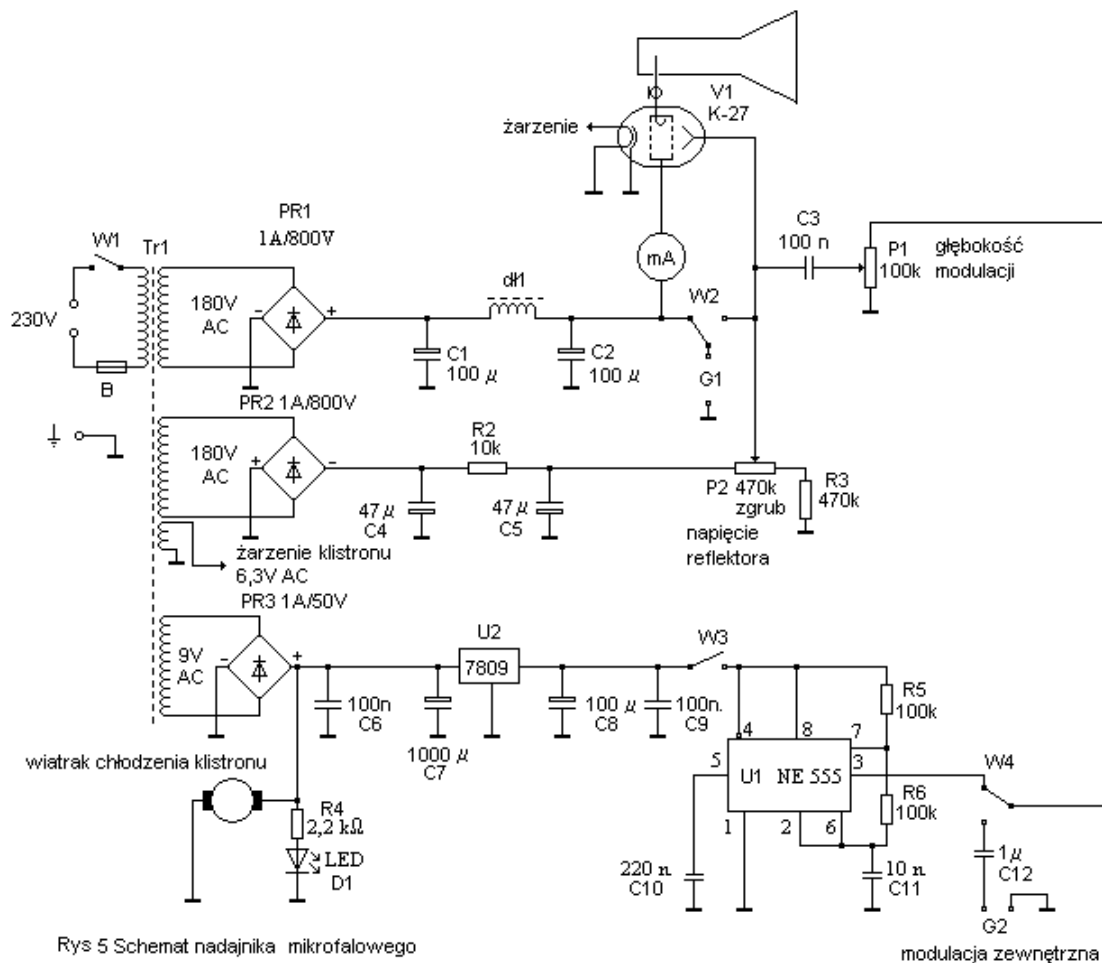
typ klistronu	U_z [V]	I_z [mA]	f_{gen} [GHz]	U_{rez} [V]	U_{ref} [V]	S [MHz/V]	P_{wy} [mW]	I_{rez}	Uwagi
K-12	6,3		2,5...3,6	250	-500...-280	0,25	30...100		
K-15	6,3	600	3,09...7,5	240...270			40		
K-19	6,3	600	9,1...9,5	280...320	-130...-190		10...30		~2k25,723A/B
K-27	6,3	600	8,5...9,7	300	-40...-200	3...3,5	8...20		~2k25,723A/B
K-48	6,3	1200	3,4...4				35		
K-50	6,3	1500		145...155	-80...-300				

K-76	6,3								
K-701	6,3	730	0,6...3,75				30...100		
K-709	6,3	1150	5,7...5,9			-160...-300	40		
K-717	6,3	1100	6,2...6,5			-100...-250	40		
K-20	6,3	450	8,6...9,6	300		-70...-200	5...7	15	W_o
2k25	6,3	600	9,37	300		-130...-190	35	22	$U_{gk}=50V$ $I_r=3\mu A$
2k28A	6,3	650	3,46...3,6	300		-182...-277	140		Z_o
2k48	6,3	575	6,9...10,8	1250		-175...-300	20		=707B
K-26R	6,3	650	3,3...3,6	300		-50...-155	80		$U_{skup}=300$
K-700	6,3	1000	9	305		-20...-400	10		
K-194A	6,3	600	35...36			-100...-300	20		
K-194B	6,3	600	34,5...35			-100...-300	20		
K-187	6,3	1000	17...40				11		
K-147	6,3	700	7,9...13,2	345...360			32		
K-154	6,3	1000	5,6...9,1	345...360			≥ 60		
K-162	6,3	700	6...10,8	330...370			≥ 40		
K-164	6,3		10...10,7				45		
K-177A	6,3	500	16...16,7			-150...-320	20		
K-177B	6,3	500	17			-150...-320			
K-205A	6,3	1000	7,9...8,2	750		-390	750		$I_r=10\mu A$ $m=0,8$
K-205A	6,3	1000	8,1...8,4	750		-390	750		$I_r=10\mu A$ $m=0,8$

Oznaczenia: U_z - napięcie żarzenia, I_z –prąd żarzenia, f gen-generowana częstotliwość, U_{rez} - napięcie zasilania rezonatora, U_{ref} - napięcie zasilania reflektora, S -czułość przestrajania elektronowego, P_{wy} - moc wyjściowa, I_k -prąd katody, I_{rez} - prąd rezonatora, U_{gk} - napięcie katoda-włókno żarzenia, I_r - prąd reflektora

Schemat elektryczny nadajnika przedstawia rys.5.

Jest to bardzo prosty nadajnik, o niedużej stabilności częstotliwości wyjściowej. Nadajnik pracuje z klitronem refleksowym typu 2k25, a więc na częstotliwości około 9,37 GHz.



Rys 5 Schemat nadajnika mikrofalowego

W układzie zasilacza zastosowałem transformator TS40/4539, obecnie produkowany przez firmę Zatra S.A. Jest to transformator przeznaczony do zasilania układów lampowych. Ma on dwa uzwojenia anodowe 200V AC /60mA, jedno żarzeniowe 6,3V AC/2,15A i jedno 9V AC/400mA. Napięcie przyspieszające dla klustronu (o wartości około 275V) jest uzyskiwane wskutek wyprostowania napięcia z pierwszego uzwojenia anodowego w prostowniku PR1, a następnie wygładzone w filtrze z elementami C1, C2 i dł1. Dławkę powinien mieć indukcyjność przynajmniej 2H, przepływający przez niego prąd nie przekracza 40mA. Zamiast dławika można wlotować rezystor 1,2k i obciążalności 5W. Pogorszy to jednak nieco parametry filtru i spowoduje spadek napięcia (zmaleje moc wyjściowa generatora).

Między rezonator klustronu a dodatnią okładzinę kondensatora C2 jest włączony miliamperomierz. Jest on bardzo pomocny przy strojeniu klustronu, ale można go oczywiście pominąć. Napięcie ujemne dla reflektora jest uzyskiwane z drugiego uzwojenia anodowego. To napięcie jest prostowane w prostowniku PR2 a następnie wygładzane za pomocą elementów C4, C5 i R2.

Potencjometrem P2 można regulować wartość ujemnego napięcia na reflektorze klustronu a tym samym częstotliwość, zakres drgań i moc wyjściową. Rezystor R3 może być pominięty (zwarty)-wówczas można uzyskać więcej zakresów drgań klustronu.

Napięcie żarzenia klustronu jest uzyskiwane bezpośrednio z transformatora. Nie zastosowano żadnej stabilizacji napięcia reflektora ani rezonatora, wskutek czego następuje przestrajanie klustronu przy wahaniami napięcia sieci. Aby temu zaradzić należałoby zastosować stabilizację napięć zasilających.

Ponieważ zależało mi na tym, by z pomocą opisywanego toru można było wykonać szereg prostych, ale interesujących doświadczeń (zostaną opisane nieco później) generator zawiera

dodatkowe elementy. Przełącznik W2, który do gniazdka G1 doprowadza napięcie zasilające rezonator bądź reflektor. Do tego gniazdka można dołączyć woltomierz, który umożliwia kontrolę wspomnianych napięć. Ponadto zastosowano prosty generator przebiegu prostokątnego z popularnym układem U1 typu NE555. Uzyskiwany przebieg m.cz służy do modulacji sygnału mikrofalowego.

Elementy R5, R6, C11 wyznaczają wartość generowanej częstotliwości. Jej wartość można obliczyć ze wzoru:

$$f[Hz] = \frac{1440000}{C_{11}[nF] \cdot (2R_6 + R_5)[k\Omega]}$$

W modelu ta częstotliwość wynosi około 480 Hz. Włączenie generatora m.cz odbywa się za pomocą włącznika W3. Przewidziano wybór sygnału modulującego z generatora bądź z zewnętrznego źródła za pomocą włącznika W4. Zewnętrzny sygnał modulujący może być podany do gniazdka G2. Potencjometr P1 służy do regulacji głębokości modulacji (reguluje składową zmienną doprowadzaną do reflektora klustronu).

Napięcie zasilające generator m.cz jest uzyskiwane z uzwojenia 9V po wyprostowaniu (za pomocą prostownika PR3) i wygładzeniu (układ U2).

Napięcie ze wspomnianego uzwojenia zasila ponadto kontrolkę włączenia układu D1 i wiatrak chłodzenia klustronu. Ten wiatrak nie jest niezbędny w przypadku użycia klustronu 2k25, jednak ułatwia oddawanie ciepła z lampy do otoczenia. Migająca dioda D1 jest wskaźnikiem włączenia urządzenia.

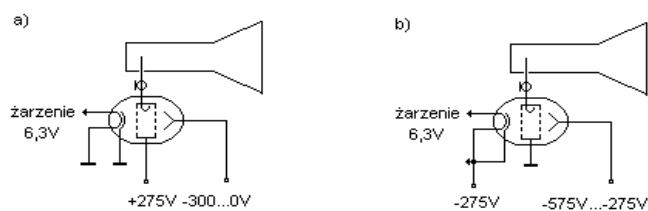
Antena tubowa

Omówimy teraz sposób i wskazówki wykonania anteny tubowej nadajnika.

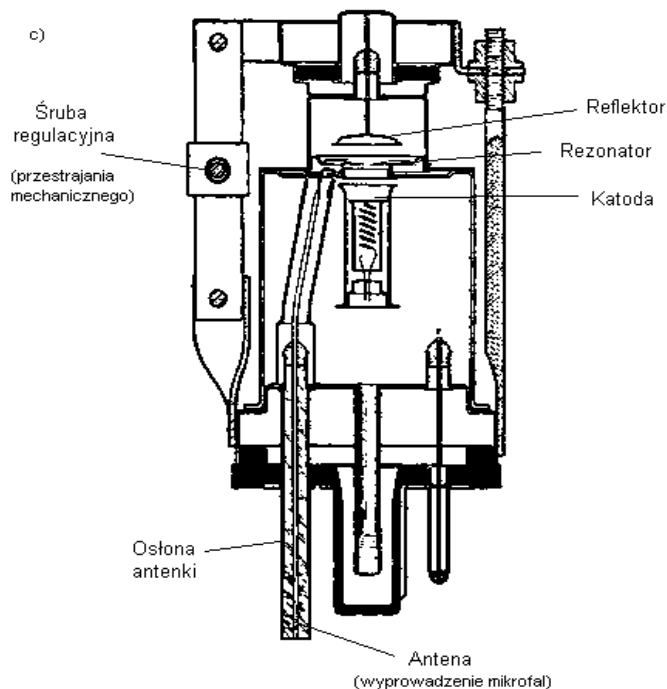
Klustron 2K25 (podobnie jak K-19 i K-27) ma budowę jak na rys.6c. Wyprowadzenie mikrofal z lampy stanowi mała antena.

W celu sprzęgnięcia klustronu z falowodem prostokątnym (a co za tym idzie- z anteną tubową) należy antenkę klustronu zanurzyć w falowodzie (pojemnościowe sprzężenie klustron-falowód). Należy zaznaczyć, że właściwe włączenie klustronu nastąpiłoby gdyby osłona antenki miała elektryczne połączenie z falowodem. W naszym przypadku te zasady zostaną powalcone- nie będzie to możliwe do spełnienia. Gdyby postąpić według tej zasady oznaczałoby to, że antenie tubowej udzielałby się potencjał +275V względem masy, gdyż osłona antenki (i cała metalowa osłona lampy) jest połączona z wyprowadzeniem rezonatora. Jest to niedopuszczalne i dlatego na osłonę antenki należy nałożyć koszulkę izolacyjną. Postąpienie zgodnie z zasadami byłoby możliwe, gdyby zasilanie układu zrealizować na innej zasadzie. W naszym układzie potencjał masy ma katoda klustronu i jedna z końcówek żarzenia. Dzięki temu między uzwojeniem żarzenia transformatora TS40/4539 a masą nie występuje duża różnica potencjałów, podobnie jak między wyprowadzeniem żarzenia i katodą klustronu.

Gdyby wyprowadzenie rezonatora połączyć z masą to katoda klustronu powinna być na potencjale minus 275V, zaś reflektor mógłby uzyskiwać nawet minus 575V. Ponieważ jednak napięcie katoda-wyprowadzenie żarzenia klustronu nie może być duże (nie powinno przekraczać kilkudziesięciu V) oznacza to, uzwojenie żarzenia powinno być praktycznie na potencjale katody, a więc minus 275V względem masy (rys. 6b). Transformator TS40/4539 nie jest jednak zasadniczo przeznaczony do pracy przy wysokim potencjale na uzwojeniu żarzenia (groźba przebicia!) i w związku z tym trzeba było się zdecydować na nieprawidłowy, ale możliwy do łatwej realizacji sposób. Trzeba dodać, że klustrony z wyjściem bezpośrednio na falowód, jak K-702BR nie mogą być w ten sposób włączone. Należy więc w takim przypadku zamówić odpowiedni transformator, w którym będzie dopuszczalne występowanie dużego napięcia uzwojenie żarzenia-masa. Tak więc mimo dogodnego wyprowadzenia drgań z takiego klustronu jego włączenie może sprawiać sporo trudności.



Rys.6 Uproszczony schemat zasilania klustronu w układzie z rys. 5 (a) oraz w układzie z uziemionym wyprowadzeniem rezonatora (b). Przekrój klustronu 2K25 (c)

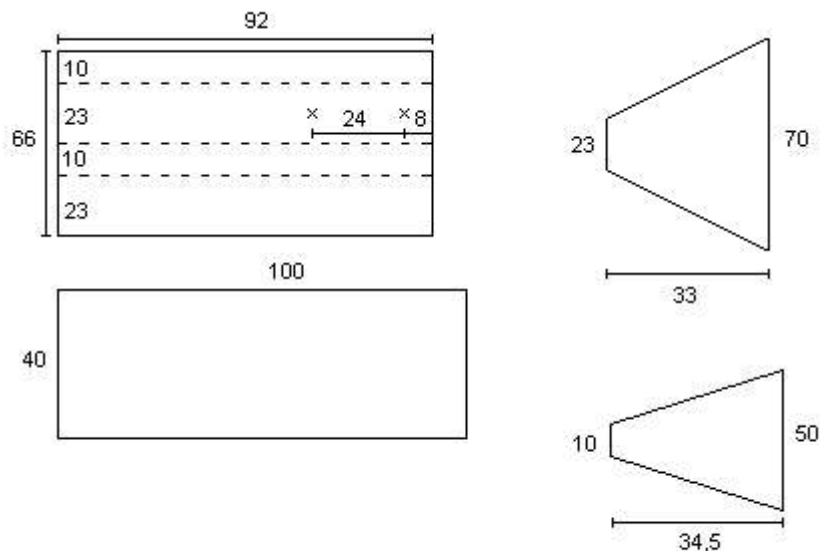


Klustrony typu 2K25, K-19 i K-27 mają cokół typu „oktal”. Aby jednak lampa weszła w podstawkę należy w niej wykonać parę zmian. Do przeróbek nadają się tylko podstawki typu „oktal” wykonane z ebonitu lub plastikowe. Po delikatnym odgięciu blaszek stykowych o numerach 3,4,5,6 należy je wyjąć z podstawki. Numery blaszek są z reguły wytłoczone na podstawie. Po tym zabiegu dziurę po blaszce o numerze 4 trzeba rozwiertić wiertłem o średnicy $\Phi=5\text{mm}$. Czynność tę należy wykonywać ostrożnie, aby nie połamać ebonitu, z którego jest wykonana podstawka.

Po tym zabiegu klustron powinien bez problemu „wejść” w podstawkę.

Na wystającą metalową część osłony anteny należy nałożyć izolacyjną koszulkę, najlepiej z rurki termokurczliwej.

Następnie trzeba sporządzić falowód i tubę anteny). W tym celu trzeba wyciąć z blachy miedzianej lub mosiężnej o grubości minimum 0,5mm (zalecane 1,3 mm) (nie może być zbyt cienka, bo będzie się zbyt łatwo giąć) prostokąt o wymiarach 66x 92 mm , prostokąt o wymiarach 100x40 mm , dwa trapezy o wymiarach : krótsza podstawa 23mm, dłuższa podstawa 70 mm, wysokość trapezu 33mm oraz dwa trapezy o wymiarach : krótsza podstawa 10mm, dłuższa podstawa 50mm, wysokość 34,5mm –rys. 7.



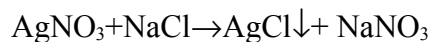
rys.7. elementy anetny tubowej nadajnika

Następnie te blachy należy posrebrzyć, celem zwiększenia przewodności powierzchni metalu (prądy w.cz o dużej częstotliwości nie wnikają głęboko w metal-zjawisko naskórkowości). Bez srebrzenia blach urządzenie też będzie pracować, jednak srebrzenie zapewnia zmniejszenie strat i dlatego warto je przeprowadzić, mimo, że odcinki falowodu są krótkie. Mosiądz ma bowiem konduktywność około $1,6...1,8 \cdot 10^7 [\Omega \cdot m]^{-1}$ zaś czyste srebro około $6,3 \cdot 10^7 [\Omega \cdot m]^{-1}$.

Istnieje kilka metod srebrzenia. Można na przykład srebrzony przedmiot nacierać pastą zawierającą chlorek srebra. Takie srebrzenie daje jednak bardzo cienką powłokę i dlatego do naszych celów najlepiej nadaje się srebrzenie elektrolityczne. W galwanizerniach stosuje się najczęściej kąpiele cyjankowe. W domowych warunkach jest to nie do przyjęcia, choćby z tego względu, że cyjanki są silnie działającymi truciznami. Można jednak użyć kąpiel zawierającą jodkowy kompleks srebra.

Kąpiel przyrządzamy w następujący sposób:

2,2 g azotanu (V) srebra $AgNO_3$ należy rozpuścić w 20 ml wody destylowanej. W innym naczyniu należy rozpuścić 1,5g chlorku sodu $NaCl$ (soli kuchennej) w 20 ml wody. Po zmieszaniu roztworów następuje strącenie chlorku srebra $AgCl$:



Tą czynność należy przeprowadzać w przyciemnionym pomieszczeniu, gdyż chlorek srebra jest światłoczuły-łatwo rozkłada się na świetle.

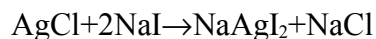
Należy dodać, że przypadkowe zachłapanie ubrania roztworem soli srebra spowoduje powstanie ciemnych plam, dlatego należy założyć odzież roboczą.

Mając jednocześnie świadomość, że dość duża ilość osób nie ma wagi w domu podam inny sposób przyrządzenia chlorku srebra.

Pół łyżeczki azotanu srebra (może to być kilka pałeczek lapisu nabytego w aptece) należy rozpuścić w niewielkiej ilości wody. W innym naczyniu rozpuścić 2 łyżeczki soli kuchennej. Do roztworu azotanu srebra (mieszać) należy dodawać porcjami roztwór chlorku sodu aż do momentu gdy przestanie się strącać osad.

Strącony osad chlorku srebra należy odsączyć (najlepiej na lejku z bibułą filtracyjną) i kilkakrotnie przemyć wodą destylowaną. Polega to na kilkakrotnym polaniu wodą sącząca (bibuły) z osadem AgCl.

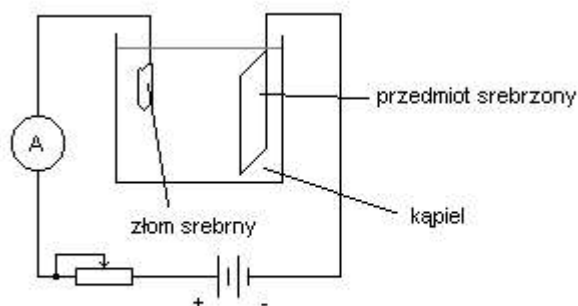
W innym naczyniu należy przygotować stężony roztwór jodku sodu lub jodku potasu. Przemyty osad AgCl przenieść do zlewki lub słoika i mieszając dodawać stopniowo roztwór jodku sodu aż do rozpuszczenia osadu w myśl równania:



Jeśli osad nie będzie się rozpuszczał dowodzi to niechybnie zbyt małego stężenia jodku sodu. Należy wówczas dosypać nieco stałego jodku sodu.

Gdyby roztworu do kąpielii srebrzącej było za mało należy sporządzić kolejną porcję chlorku srebra i dodać jodku sodu.

Srebrzoną blachę należy odtłuścić, przecierając dokładnie szmatką nasyconą acetonem. Korzystne jest również zanurzenie jej na 2 sekundy w 50% roztworze kwasu azotowego (V) (nie dłużej)! i umycie jej szybko w wodzie. Czynność zanurzania w kwasie najlepiej przeprowadzać na świeżym powietrzu, gdyż wydzielające się tlenki azotu są trujące. Ponadto przypominamy, że kwas azotowy jest substancją żrącą. Tak przygotowaną blachę należy umieścić w roztworze z kąpielią srebrzącą, łącząc jeden jej koniec z ujemnym biegunem baterii zasilającej (blacha stanowi katodę). Baterią może być np. płaska bateria 4,5V lub np. akumulator 12V). W szereg z przewodem podłączonym do bieguna dodatniego dobrze jest dołączyć potencjometr drutowy 330Ω i miliamperomierz (zakres do 500mA). Na końcu przewodu dodatniego należy zawiesić kawałek złomu srebrnego (rozpuszcza się w trakcie trwania elektrolizy, uzupełniając ubywające z roztworu srebro). Odległość między elektrodami powinna wynosić kilka cm. Gęstość prądu elektrolizy powinna wynosić 5...25mA/cm². Znaczy to, że przy srebrzeniu blachy np. 40x40 mm=16cm² prąd elektrolizy powinien wynosić 80...400 mA. Dobre wyniki uzyskuje się przy mniejszej gęstości prądu-otrzymuje się ładną, dobrze przylegającą powłokę. Elektroliza powinna trwać około 2-10 minut, przy czym im mniejsza gęstość prądu, tym dłużej powinna trwać elektroliza. Po tej czynności srebrzoną blaszkę można odwrócić i posrebrzyć jej drugą stronę. Nie jest to jednak konieczne, gdyż tylko wewnętrzna strona anteny musi być srebrzona. Następnie blaszkę należy opłukać w wodzie i wypolerować. Można do tego użyć pasty do zębów lub pasty sporządzonej z wapna i wody. Wypolerowaną blaszkę należy opłukać i wysuszyć.



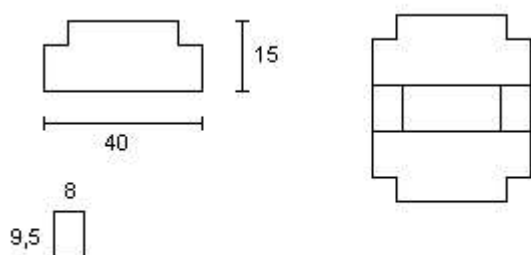
Rys.8 Zestaw do elektrolitycznego srebrzenia blaszek

Po posrebrzeniu wszystkich blaszek należy wywiercić w miejscach zaznaczonych krzyżykami otwory wiertłem $\Phi=5\text{mm}$ a następnie zagiąć po linii przerywanej tak ,by otrzymać odcinek falowodu. Brzeg łączenia należy zlutować. Do otworu bliżej końca falowodu należy dolutować nakrętkę o gwincie wewnętrznym 3mm, zaś sam koniec falowodu zaślepić kawałkiem blachy wyciętej z prostokąta 100x40mm. Do drugiego otworu wkłada się antenkę

klistronu. Mocowanie lampy realizuje się poprzez przylutowanie wyprowadzeń podstawki 7 i 8 bezpośrednio do ściany falowodu.

Następnie należy przymocować tubę anteny. Można to zrealizować lutując bezpośrednio blaszki –trapezy do ujęcia falowodu, lecz lepiej jest zrealizować połączenie śrubowe tuby z falowodem. Umożliwi to dołączenie do generatora innych elementów mikrofalowych, jak odcinki falowodów, cyrkulator itd.

W tym celu z pozostałej blachy prostokąta 100x40mm należy wyciąć blaszki o kształcie z rys.9 i złożyć z nich dwa profile z tego rysunku. Następnie jeden trzeba dolutować do ujęcia falowodu i drugi do tuby anteny. Na rogach należy przykręcić śruby $\Phi=4\text{mm}$, które mocują tubę i falowód. Dla wygody mocowania na rogach można przylutować podkładki.



Rys. 9 blaszki mocujące falowodu i zeskładany z nich profil

Antena o wymiarach podanych wcześniej dobrze pracuje na częstotliwości 8,2...12,5GHz. Jeżeli jednak w układzie będzie pracował klistron o innej częstotliwości roboczej trzeba zastosować falowód i tubę o innych wymiarach. Graniczna długość fali (najdłuższa fala przenoszona przez falowód) jest równa dwóm szerokościom falowodu $\lambda=2a$. Z kolei graniczną częstotliwość łatwo znaleźć ze wzoru: $f=c/\lambda$, gdzie c jest prędkością światła, w przybliżeniu 300000 km/s.

W przypadku fal krótszych pasmo przenoszenia falowodu jest ograniczone tym, że mogą w nim rozchodzić się fale wyższych rzędów niż rodzaj podstawowy (jest to rodzaj H10).

Podane wcześniej wymiary falowodu (szerokość wewnętrzna $a=23$ mm i wysokość $b=10$ mm) wymiarami upodabniają go do falowodu R-100.

W tab. 3 zebrano wybrane parametry niektórych falowodów.

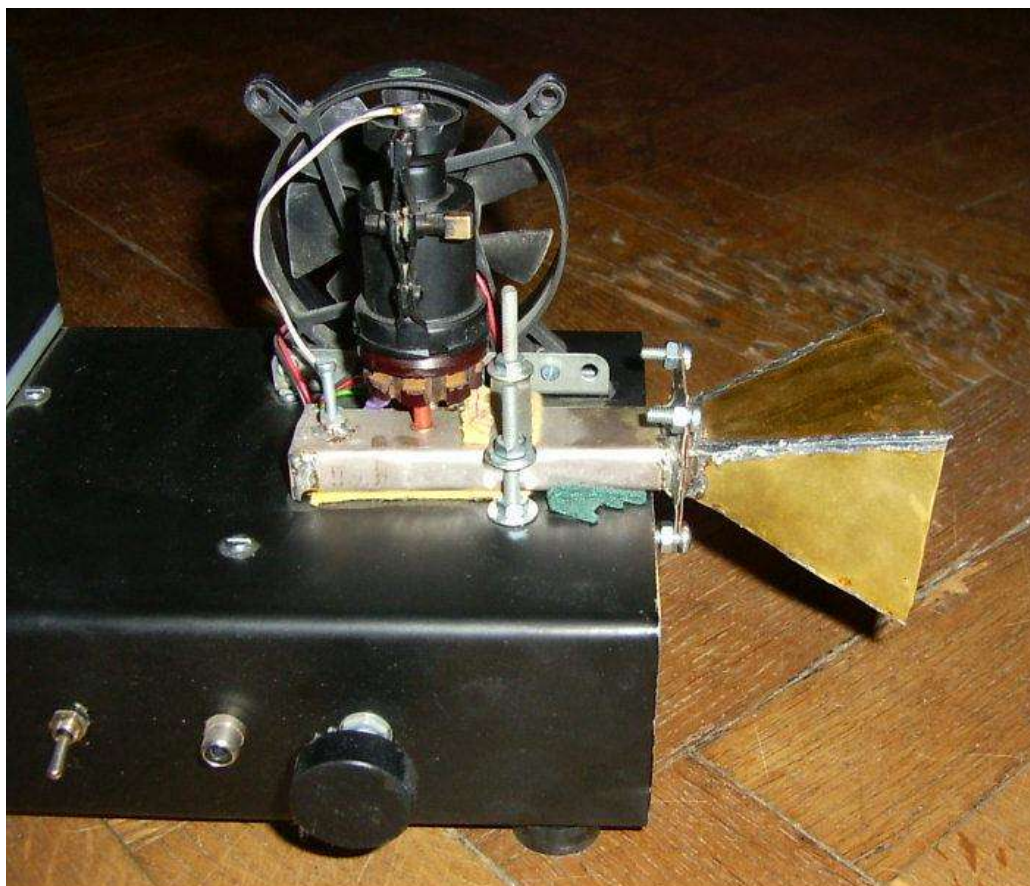
Tab.3 Wybrane parametry niektórych typów falowodów prostokątnych.

Oznaczenie falowodu		Zakres częstotliwości	Szerokość a	Wysokość b	Promień krzywizny na rogach	Tłumienność
IEC	ASA	[GHz]	[mm]	[mm]	[mm]	[dB/m]
R-84	WR112	6,58...10	28,50	12,624	0,8	0,0794
R-100	WR90	8,2...12,5	22,86	10,16	0,8	0,110
R-120	WR75	9,84...15	19,05	9,50	0,8	0,133
R-140	WR62	11,9...18	15,799	7,899	0,4	0,176

Trzeba dodać, że amatorsko wykonane stykowe łączenie falowodów (opisane złącze skręcane śrubami) z pewnością nie będzie przylegać idealnie, a to oznacza wzrost strat. Jednak z racji tego, że takich łączeń nie będzie dużo nie stanowi to istotnego problemu. Na fot.4 znajduje się klistron, falowód i antena tubowa nadajnika.

Warto rozważyć możliwość dołączania głowicy nadawczej do nadajnika. W praktyce może być to wygodniejsze niż umieszczenie całości w jednej obudowie.

Klistron należy nakryć metalową siatką, zapobiegającą ewentualnemu porażeniu (wysokie napięcie na obudowie klistronu).



Fot.4. Klustron i falowód z przykręconą anteną tubową nadajnika

Podane wcześniej wymiary tuby zapewnią zysk anteny około 14dB.

W tab. 4 podano wymiary tuby anteny dla zysku 16, 18, 20, 22 i 24 dB.

Dane te dotyczą sytuacji, gdy krótsza podstawa trapezu I ma 10mm, zaś krótsza podstawa trapezu II ma 23 mm (tuba dla wcześniej dokładnie opisanego falowodu).

Zysk anteny [dB]	Wysokość trapezu I [mm]	Wysokość trapezu II [mm]	Długość dłuższej podstawy trapezu I [mm]	Długość dłuższej podstawy trapezu II [mm]
16	58,9	56,5	63,6	85,8
18	98,2	95,1	80,0	108,1
20	161,8	158,2	100,8	136,0
22	264,3	260,3	126,9	171,3
24	429,1	424,7	159,7	215,6

Uruchomienie nadajnika

Po zmontowaniu układu można przystąpić do jego wstępnego uruchomienia.

Do gniazda G1 (rys.5) można dołączyć woltomierz (cyfrowy lub z zerem pośrodku skali, gdyż podczas przełączania W2 następuje zmiana znaku napięcia). W3 (generator akustyczny) należy wyłączyć. W lewym położeniu przełącznika W2 woltomierz powinien wskazać napięcie około 275V, natomiast w położeniu prawym od około 0...-300V, w zależności od ustawienia potencjometru P2. W przypadku wlutowania rezystora R3 zakres regulacji jest oczywiście mniejszy (około -150...-300V).

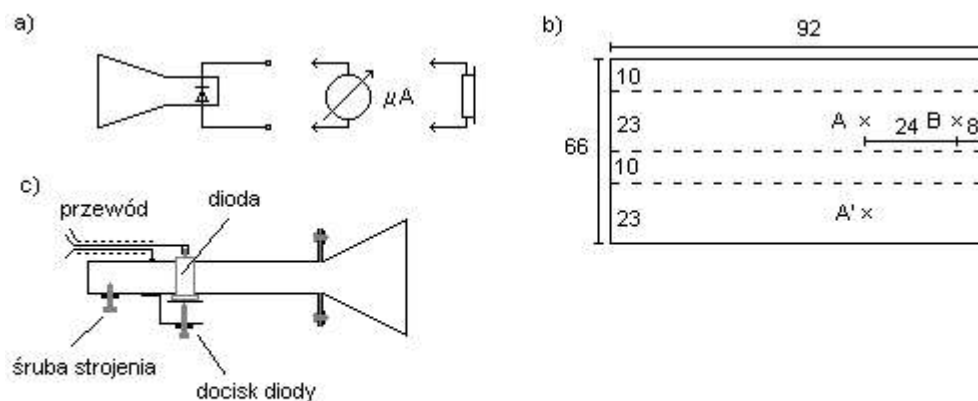
Regulując powoli potencjometrem należy obserwować wskazanie miliamperomierza. Jeśli takiego przyrządu nie wmontowano, należy na czas prób włączyć taki przyrząd o zakresie 50mA w obwód doprowadzenia zasilania rezonatora. Podczas regulacji w pewnych położeniach potencjometru P2 powinno występować kilka uwypukleń natężenia prądu. Świadczą one o powstawaniu drgań w klistronie. Należy wybrać takie położenie, by przy możliwie dużym ujemnym napięciu reflektora (W2 w prawym położeniu) występowało takie uwypuklenie. Mamy wówczas pewność, że generowana przez klistron moc jest największa (por. rys.4).

Można jeszcze ewentualnie sprawdzić, czy przy włączonym W3 na nóżce 3 układu NE555 występuje przebieg prostokątny.

Odbiornik

Najprostszy układ odbiorczy stanowi antena tubowa z diodą odbiorczą, obciążoną mikroamperomierzem lub słuchawkami- rys.10a. Nie jest to więc nic innego jak odbiornik detektorowy, tyle, że na zakres mikrofal. Taki odbiornik umożliwi ostateczne sprawdzenie nadajnika a także wykonanie szeregu eksperymentów. Na rys. 10 b podano rozmiary falowodu. Do jego wykonania należy użyć blachy identycznej jak do budowy anteny nadajnika.

Tuby anteny odbiorczej i jej mocowania nie będę opisywał- jest to analogiczne jak w antenie nadajnika; przy konstrukcji będzie pomocny rys.10c.



Rys. 10 Najprostszy odbiornik fali radarowej (a), wymiary falowodu głowicy odbiorczej (b) oraz szkic całej anteny odbiorczej (c)

W punkcie oznaczonym literą A i A' należy wywiercić otwory o średnicy zależnej od zastosowanej krystalicznej diody odbiorczej. Należy się spodziewać, że najłatwiej będzie zdobyć diodę 1N23C lub rosyjskie diody D405B (Д405Б), D406A (Д406А).

Na fot. 5 znajduje się kilka typów diod odbiorczych.



fot.5. Krystaliczne diody odbiorcze (mieszające). Od lewej: 1N23C, D405B, D406A, BADB14B

Do naszych celów najodpowiedniejsze są diody o dużych wymiarach, gdyż łatwo jest je zamocować w taki sposób, by czułość głowicy odbiorczej była duża. Z kolei diody mniejsze jest trudniej zamocować. Utrudnia to dodatkowo fakt, że diod nie należy lutować, gdyż grozi to ich przegrzaniem i w następstwie zniszczeniem, w najlepszym zaś przypadku utratą czułości. Pod względem czułości dla częstotliwości rzędu 10GHz rewelacyjne okazały się diody rosyjskie D405B. Należy dodać, że można spotkać diody 1N23CR i D405BR. Diody te mają zamienioną polaryzację.

Wróćmy do opisu wykonania głowicy odbiorczej.

Pod diody 1N23C lub D405B należy wywiercić otwór A i A' o średnicy 6,5mm; dla diody D406A wystarczy otwór 5mm. Otwór nie powinien być za duży; dioda nie powinna wchodzić weń z dużym luzem.

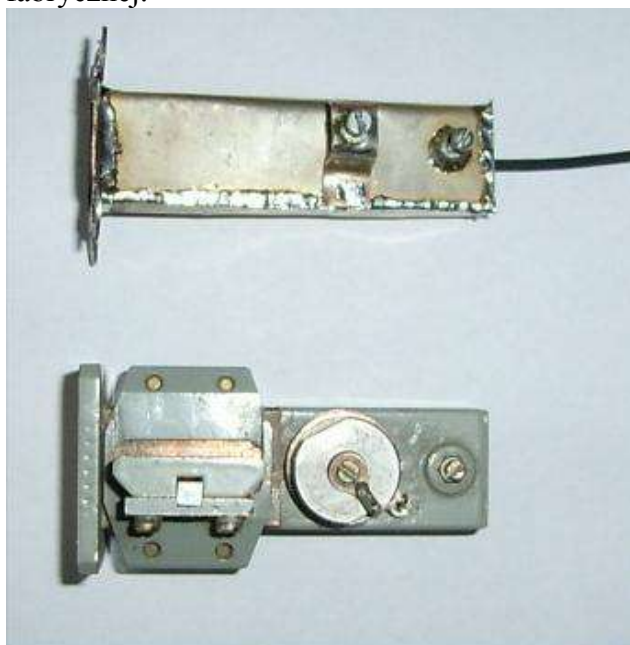
Otwór oznaczony literą B na rys.10 powinien mieć średnicę 4mm. Po wywierceniu otworów można blachę posrebrzyć, po czym wygiąć z niej falowód i brzeg zlutować.

Dobre wyniki daje mocowanie diody polegające na jej dociśnięciu do falowodu. W tym celu należy wyciąć z blachy mosiężnej o grubości 0,6mm pasek blachy o długości około 3 cm i szerokości 1 cm. Przy jednym z jego końców należy wywiercić otwór o średnicy 4 mm i dolutować w tym miejscu nakrętkę pod śrubę 3 mm. Wkręcana w ten otwór śruba będzie dociskać diodę do falowodu. Pasek blachy należy wygiąć wg kształtu z rys. 10c i przylutować do ściany falowodu. Niektóre diody, jak D405 mają stopkę wykonaną z tworzywa sztucznego. W takim przypadku wskazane jest podłożenie między śrubę dociskającą a diodę niewielkiej blaszki z blachy mosiężnej. Zapobiegnie to uszkodzeniu obudowy diody przez śrubę.

Do otworu falowodu oznaczonego literą B (rys.10) należy przylutować nakrętkę pod śrubę 3 mm. Wkręcanie i wykręcanie śruby w ten otwór umożliwi dostrojenie głowicy na maksimum czułości.

Odprowadzenie sygnału z diody odbiorczej najlepiej wykonać przewodem ekranowanym.

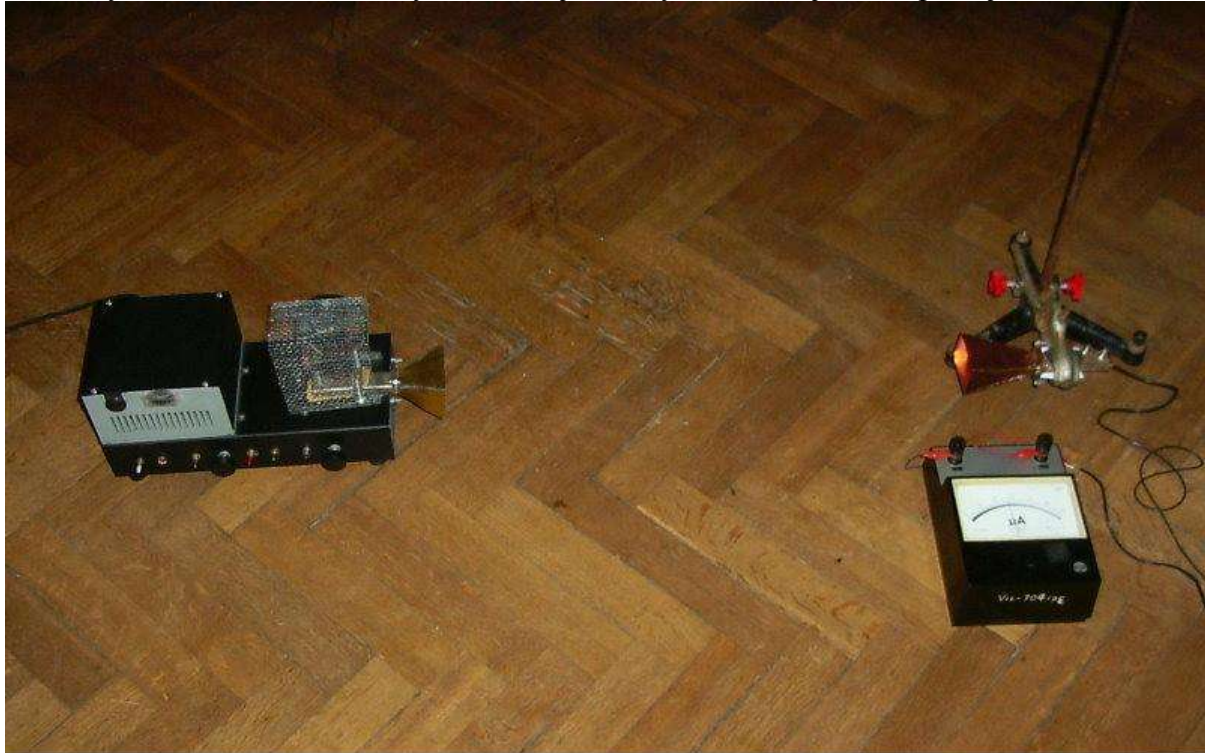
Na fot.5 zamieszczono zdjęcie wykonanej przez autora głowicy odbiorczej oraz głowicy fabrycznej.



fot.6. Wygląd głowicy odbiorczej wykonanej przez autora i głowicy fabrycznej

Uruchomienie odbiornika

Do głowicy odbiorczej należy przykręcić antenę tubową, zaś diodę odbiorczą obciążyć mikroamperomierzem o zakresie 0...100...500 μ A. Naprzeciw anteny odbiornika, w odległości około 1 m ustawić antenę nadajnika. Włączyć nadajnik i wyregulować go tak, by generował największą moc (sposób regulacji opisano wcześniej). Wskazówka mikroamperomierza powinna się wówczas wychylić. Następnie pokręcając lekko potencjometrem P2 należy sprawdzić, czy da się uzyskać jeszcze większe wychylenie miernika. Gdy już takie wychylenie uzyskamy można jeszcze pokręcać śrubami w głowicy nadajnika i odbiornika na maksimum wskazań mikroamperomierza. Na tym strojenie kończy się. Jeśli miernik się nie wychyla świadczy to o uszkodzeniu diody odbiorczej lub o tym, że nadajnik nie pracuje.



fot.7. Kontrola pracy nadajnika i odbiornika

Eksperymenty

W tym miejscu opiszemy parę eksperymentów, które można przeprowadzić za pomocą opisywanego toru.

Tłumienie mikrofal przez metalową siatkę

Kto ma kuchenkę mikrofalową ten wie, że za jej szybą znajduje się siateczka o bardzo rzadkich oczkach. Siatka ta chroni użytkownika kuchenki przed szkodliwym wpływem promieniowania mikrofalowego. Można o tym się łatwo przekonać wykonując następujący eksperyment. Należy zaopatrzyć się w dwa rodzaje siatki metalowej- o oczkach rzadszych i gęstszych. Siatkę taką można bez trudu nabyć w sklepie z artykułami metalowymi. Ustawiamy odbiornik i nadajnik naprzeciw siebie możliwie najdalej, jednak w taki sposób by mikroamperomierz odbiornika wskazał równo 100 μ A. (Dzięki dużej odległości nadajnik-odbiornik maleją przekłamania wskazań miernika, związane z tworzeniem się rezonatora między siatką i antenami).

Następnie w połowie odległości odbiornik-nadajnik umieszczamy badaną siatkę. Z miernika można będzie wtedy odczytać bezpośrednio jaka część mocy dociera do odbiornika. Na

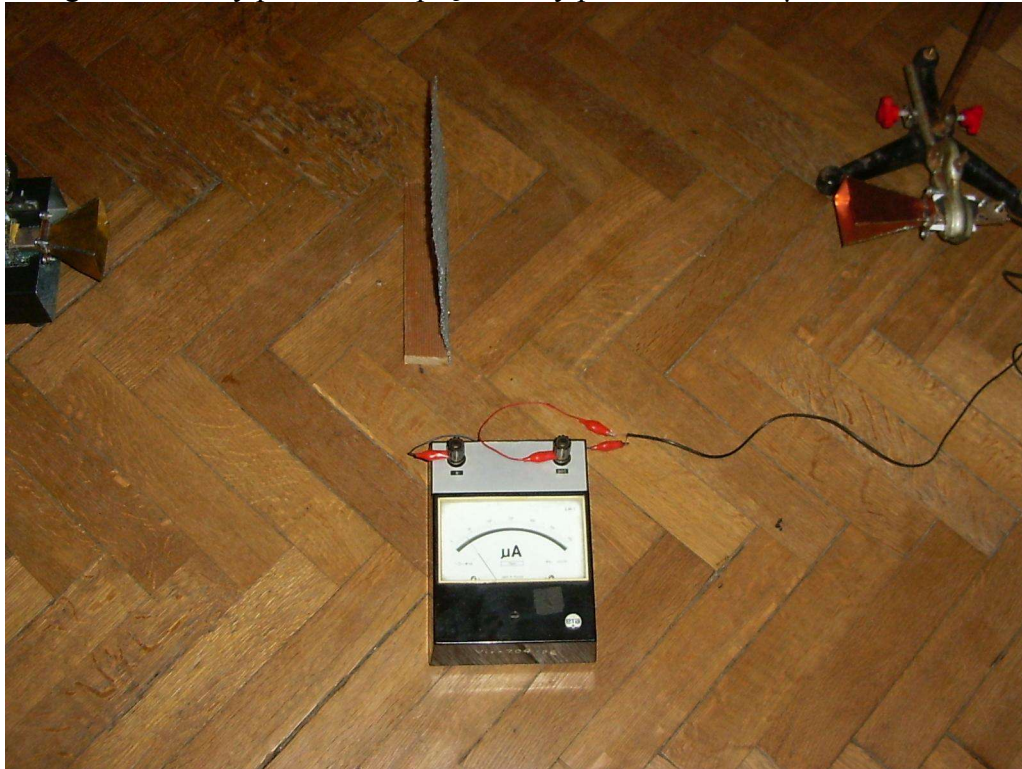
przykład dla siatki o oczkach 5mm i częstotliwości 9,37GHz miernik wskazuje 25 μ A, czyli 25% mocy, która docierała przed umieszczeniem siatki dochodzi do odbiornika.

Tłumienie wprowadzane przez siatkę można wyrazić w decybelach jako:

$$\beta = 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{25}{100} = -6dB$$

We wzorze zamiast mocy wstawiono prądy wskazywane przez mikroamperomierz. Wolno tak uczynić, gdyż w początkowym zakresie charakterystyka diody ma charakter kwadratowy- mikroamperomierz wskazuje więc moc w jednostkach względnych.

Uwaga: Nie należy przekraczać prądu diody ponad 100...150 μ A.



fol.8. Pomiar tłumienia fali radarowej przez siatkę metalową

Pomiar długości fali

Czy można sprawdzić, że klistron generuje rzeczywiście na częstotliwości około 9,4 GHz? Częstotliwości wprawdzie nie zmierzemy, bez trudu jednak da się zmierzyć długość fali. Potrzebne będą dwie drewniane lub pilśniowe płyty. W tym eksperymencie łatwiej będzie posłużyć się słuchawkami niż mikroamperomierzem. Można także głośniczką odbiorczą podłączyć do głośnika za pośrednictwem dowolnego wzmacniacza m.cz. Nadajnik i odbiornik odsunąć na 2-3m (przynajmniej 50...60 długości mierzonej fali).

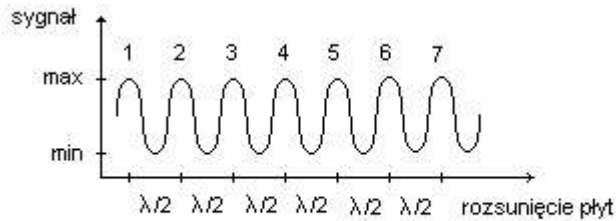
W nadajniku należy włączyć generator m.cz (włączony włącznik W3, W4 w górnej pozycji, P1 w skrajnej prawej pozycji). W słuchawkach powinien być słyszalny ciągły ton generatora fali prostokątnej. Kręcąc potencjometrami P2 i P4 można ustawić optymalne warunki modulacji-najgłośniejszy sygnał w słuchawkach.

Między nadajnik i odbiornik wkładamy dwie drewniane płyty. Jedna płyta powinna pozostawać nieruchoma, drugą natomiast od niej oddalamy. W słuchawkach można usłyszeć wówczas zmianę poziomu głośności sygnału- dokładnie co pół długości fali sygnał jest najgłośniejszy lub najcichszy. Mierzając zatem zmianę położenia płyty ruchomej między dwoma sąsiednimi maksimumami (lub minimumami) sygnału w słuchawce możemy łatwo znaleźć długość fali generowanej przez nadajnik. W praktyce lepiej jednak postąpić inaczej. Najpierw znajdujemy położenie płyty ruchomej, w którym dźwięk w słuchawce jest najgłośniejszy (najcichszy). Następnie płytę powoli odsuwamy, licząc ilość maksimumów (minimumów) sygnału.

Po zliczeniu np. 50 maksimum (minimum) płytę zatrzymujemy w takim położeniu, w którym występuje owo maksimum (minimum) i mierzymy, np. centymetrem krawieckim odległość między pierwszym i ostatnim maksimum (minimum).

Jak widać z rys. 11, stwierdzając 7 maksimum płytę odsuwamy na odległość $6 \cdot \lambda/2$.

Uogólniając- stwierdzając n maksimum płytę odsuwamy na odległość $(n-1)\lambda/2$.



Rys.11. Rysunek poglądowy do pomiaru długości fali

Dla przykładu- przy 50 maksimum płytę rozsuwamy na odległość $(50-1)\lambda/2$, czyli $24,5\lambda$. Mierzając centymetrem krawieckim tę odległość autor stwierdził, że płyty zostały rozsunięte na 78,1 cm. Po rozwiązaniu równania $24,5\lambda=78,1$ uzyskamy w przybliżeniu $\lambda=3,2$ cm, czyli 32 mm. Tyle zatem wynosi długość fali wysyłanej przez klistron nadajnika. Możemy oszacować, jakiej częstotliwości odpowiada ta długość fali stosując znany wzór:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{300}{\lambda[mm]} [GHz] = \frac{300}{32} = 9,37 GHz$$

f- częstotliwość

c- prędkość światła

Pomiar długości fali odbywa się tu w gruncie rzeczy w układzie będącym interferometrem Fabry-Perota. Płyty drewniane stanowią swego rodzaju zwierciadła półprzepuszczalne. W obszarze między tymi zwierciadłami tworzy się rezonator wnękowy, w którym następuje kolejne dostrajanie do rezonansu rozstrajanie (maksima i minima sygnału w słuchawkach). Oprócz opisanego powyżej układu jest często stosowany układ interferometru Michelsona. Opis takiego interferometru wykracza jednak daleko poza ramy niniejszego opracowania.

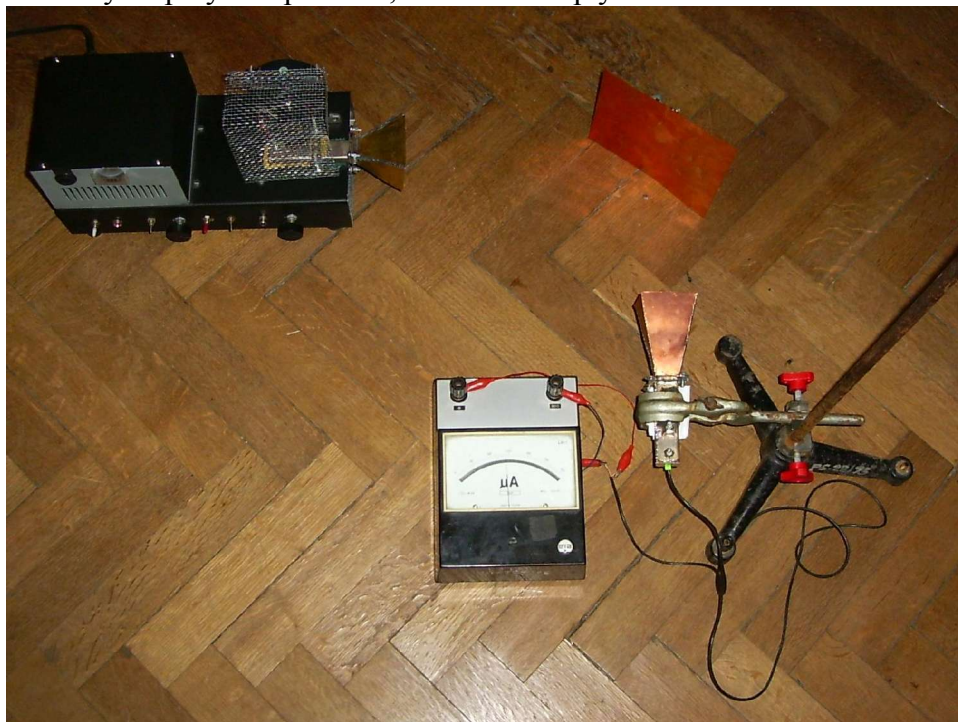


fot.9. Zestaw do pomiaru długości fali

Analogia między promieniami świetlnymi a mikrofalami

Przy pomiarze długości fali skorzystaliśmy z interferometru- układu znanego z optyki geometrycznej. Ujawniło się tu więc podobieństwo mikrofal z falami świetlnymi. Takich podobieństw jest więcej.

Możemy na przykład pokazać, że metalowa płyta stanowi dla mikrofal zwierciadło-fot.10.



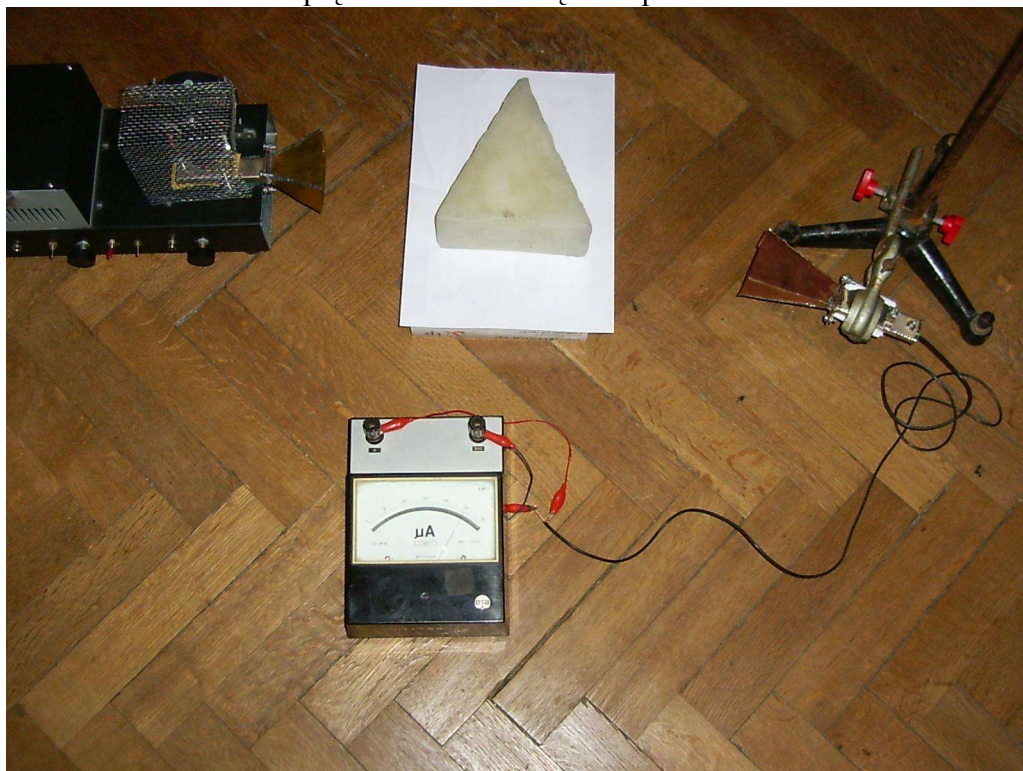
Fot.10. Arkusz blachy jako zwierciadło dla mikrofal

Zjawisko załamania mikrofal można z łatwością pokazać dysponując pryzmatem. Pryzmat taki nie powinien być jednak wykonany ze szkła, lecz ze stearyny. W tym celu należy stopić odpowiednią ilość świec i tak otrzymaną stearynę wlać do foremki z desek. Po ostygnięciu stearyny otrzymamy wspomniany pryzmat. Widocznym efektem zjawiska załamania jest to, że największe wychylenie mikroamperomierza uzyskuje się gdy antena odbiorcza jest umieszczona pod pewnym kątem w stosunku do anteny nadajnika-fot.11. Korzystając z zasad optyki geometrycznej można wyznaczyć wartość współczynnika załamania stearyny dla fali generowanej przez nadajnik. Zainteresowany Czytelnik znajdzie stosowny opis w podręczniku fizyki.

Dysponując dwoma pryzmatami można zademonstrować zjawisko tunelowe w zakresie mikrofal. Pryzmaty powinny być wówczas identyczne, o kątach 30,60 i 90 stopni. Anteny powinny znajdować się naprzeciw siebie. Złożone razem pryzmaty tworzą wtedy prostokąt. Rozsuwając je można obserwować zmianę wskazań mikroamperomierza (wykładnicze malenie wskazań przy odsuwaniu pryzmatów). Świadczy to o przechodzeniu mikrofal przez pasmo „zabronione”- warstwę powietrza między pryzmatami.

Często na lekcjach fizyki omawia się zjawisko dyfrakcji promieni świetlnych. Do demonstracji tego zjawiska stosuje się najczęściej laser i szczelinę lub siatkę dyfrakcyjną. O ile wykonanie siatki dyfrakcyjnej dla promieni świetlnych jest w warunkach domowych a nawet szkolnych praktycznie niemożliwe to wykonanie takiej siatki dla mikrofal jest bardzo łatwe. W tym celu wystarczy zaopatrzyć się w kawałek listewki i garść dużych gwoździ. W równych odstępach, co 3 cm (odległość porównywalna z długością fali) w listewkę wbijamy gwoździe-fot.12. Potrzebne jeszcze będą dwa kawałki blachy miedzianej, które pozwolą uformować wąską wiązkę promieniowania mikrofalowego. Przesuwając antenę odbiorczą w górę i w dół, wzdłuż listwy „siatki dyfrakcyjnej” można zaobserwować charakterystyczny dla

zjawiska dyfrakcji rozkład natężenia pola w zależności od położenia anteny. W praktyce można zaobserwować pięć maksimów natężenia pola.



Fot. 11. Załamanie mikrofal w pryzmacie stearynowym



fot. 12. Zestaw do pokazu zjawiska dyfrakcji

Doświadczeń, które można przeprowadzić za pomocą opisywanego toru można wymieniać jeszcze bardzo dużo. Na lekcjach fizyki omawia się doświadczenie Lauego z dyfrakcją promieni rentgenowskich na kryształach. Eksperyment ten można przeprowadzić za pomocą

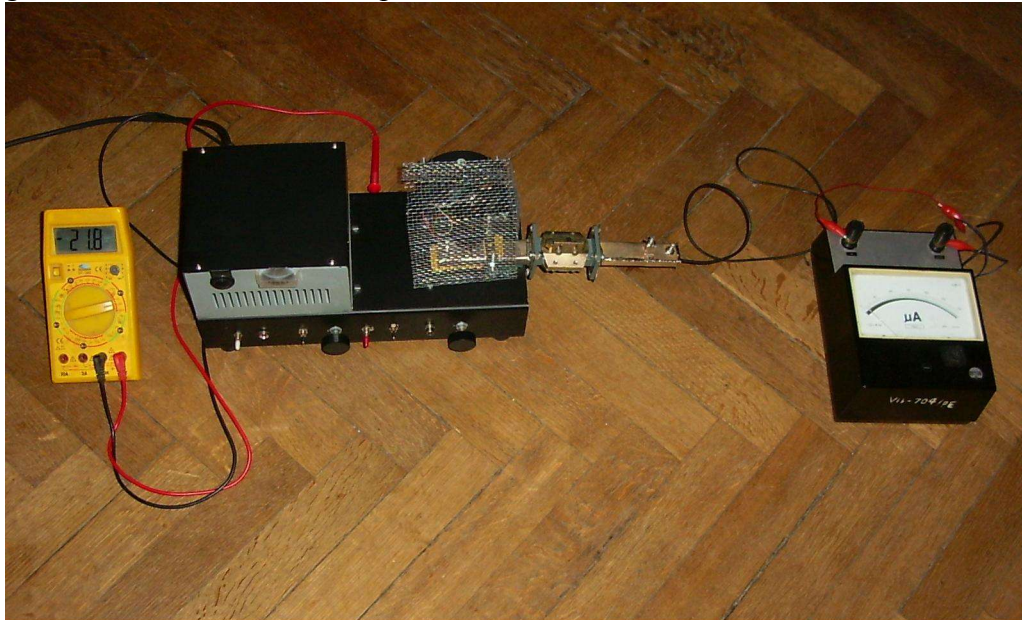
naszego toru- zademonstrować dyfrakcję mikrofal na „kryształach” mającym postać sześciianu stearynowego z zatopionymi w nim w równych odstępach kulkach metalowych. Dysponując cyrkulatorem można zbudować prosty model radaru drogowego. Trudność polega na tym, że takiego cyrkulatora raczej nie da się zrobić w warunkach domowych. Być może kiedyś opis takiego modelu znajdzie się na łamach EP.

W nadajniku przewidziano gniazdko modulacji zewnętrznej. Można do niego doprowadzić sygnał np. z karty dźwiękowej komputera. Dołączając do głowicy odbiorczej czuły wzmacniacz m.cz. można odbierać nadawany sygnał z odległości kilkudziesięciu metrów.

Jeszcze o klistronie

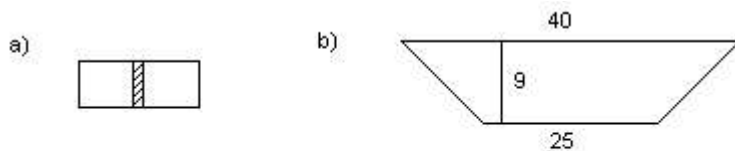
Na rys.4 przedstawiono zależność mocy wyjściowej klistronu od napięcia reflektora przy stałym napięciu na rezonatorze ($P_{wy}=f(U_{refl})$ przy $U_{rez}=\text{const.}$). Taką charakterystykę możemy bez trudu wyznaczyć metodą „punkt po punkcie” lub metodą oscyloskopową. Opisanie dalej metody z wykorzystaniem zbudowanego toru umożliwia wyznaczenie mocy jedynie w jednostkach względnych, ale chyba warto przybliżyć całą sprawę.

W metodzie „punkt po punkcie” jest potrzebny generator z badanym klistronem, tłumik, głowica odbiorcza i mikroamperomierz- fot.13.



fot.13. Układ wyznaczania zależności $P_{wy}=f(U_{refl})$ metodą „punkt po punkcie”

Tłumik jest odcinkiem falowodu z umieszczoną wewnątrz płytką z materiału dielektrycznego, powodującego duże straty energii mikrofalowej. Taki tłumik można łatwo wykonać. W tym celu należy sporządzić odcinek falowodu o długości około 6,5 cm (opis przy wykonaniu głowicy nadawczej i odbiorczej) i umieścić w środku falowodu płytkę dielektryczną. Dobre wyniki daje tu użycie laminatu szklanego. Na końcach falowodu należy oczywiście wykonać złącze-mocowanie, podobnie jak to czyniliśmy przy konstrukcji nadajnika i odbiornika. Tak uzyskany tłumik nie będzie miał możliwości regulacji tłumienia, jednak jego wykonanie jest bardzo łatwe. Pomoże przy tym rys.12. Chcąc wykonać tłumik regulowany należałoby w falowodzie wykonać nacięcie i w jakiś sposób regulować zanurzenie płetwy płytki dielektrycznej w falowodzie.



Rys.12. Sposób umieszczenia płytki dielektrycznej w falowodzie tłumika (a) i kształt płytki dielektrycznej (b)

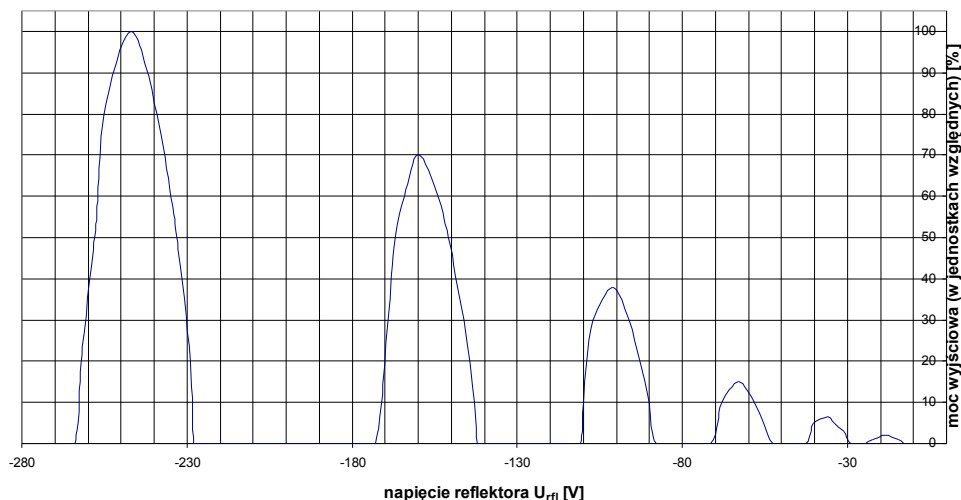
Jeśli tłumikiem nie dysponujemy, wówczas do głowicy nadawczej i odbiorczej przykręcamy anteny tubowe.

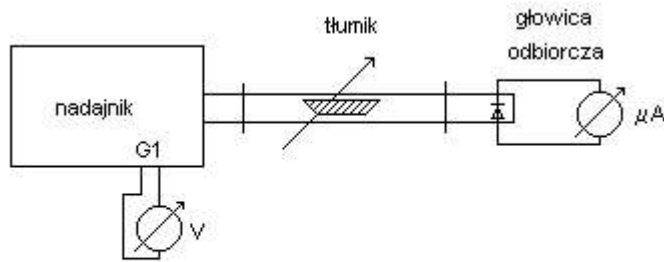
Po włączeniu nadajnika i nagraniu klistronu należy zmierzyć napięcie przyspieszające na rezonatorze, poprzez odpowiednie ustawienie przełącznika W2 w nadajniku i włączenie woltomierza do gniazdka G1. Wygodnie jest używać tu woltomierza cyfrowego (po przełączeniu przełącznika W2 następuje zmiana napięcia mierzonego i jego znaku.) Następnie przełącznik W2 należy ustawić w położeniu umożliwiającym mierzenie napięcia na reflektorze. Kręcąc potencjometrem P2 można w pewnych jego położeniach uzyskać generację mikrofal. Następuje wtedy wychylenie wskazówki mikroamperomierza. Należy ustalić takie najbardziej ujemne napięcie reflektora, przy którym płynie największy prąd przez mikroamperomierz. Ponieważ charakterystyka diody odbiorczej jest w jej początku kwadratowa, więc prąd wskazywany przez mikroamperomierz jest proporcjonalny do mocy. Aby dioda pracowała na kwadratowym odcinku charakterystyki należy pilnować, by przez diodę nie płynął prąd większy niż $100 \mu\text{A}$ przy maksymalnej mocy generowanej przez klistron (por. akapit poświęcony uruchomieniu generatora). Jeśli prąd jest większy niż $100 \mu\text{A}$ należy zmniejszyć ilość energii mikrofalowej docierającej do głowicy odbiorczej za pomocą tłumika. Jeśli tłumienie wnoszone przez pojedynczy tłumik jest zbyt małe-należy wówczas włączyć dwa tłumiki szeregowo.

Jeśli nie mamy tłumika i stosujemy anteny tubowe wówczas ilość energii docierającej do odbiornika regulujemy oddaleniem anten. Przyjmujemy, że maksymalny prąd (wygodnie ustawić $100 \mu\text{A}$) odpowiada 100% mocy wyjściowej. Następnie należy potencjometrem P2 sprowadzić napięcie reflektora do 0V. Zmieniając stopniowo (0,5-1V) i notując napięcie reflektora należy odczytywać i notować prąd. Między zakresami pracy krok napięcia może być większy.

Nanosząc na prostokątny układ współrzędnych otrzymane wartości uzyskujemy wykres zależności $P_{wy}=f(U_{rfl})$. Na rys.13 pokazano przebieg tej charakterystyki dla klistronu pracującego w modelu.

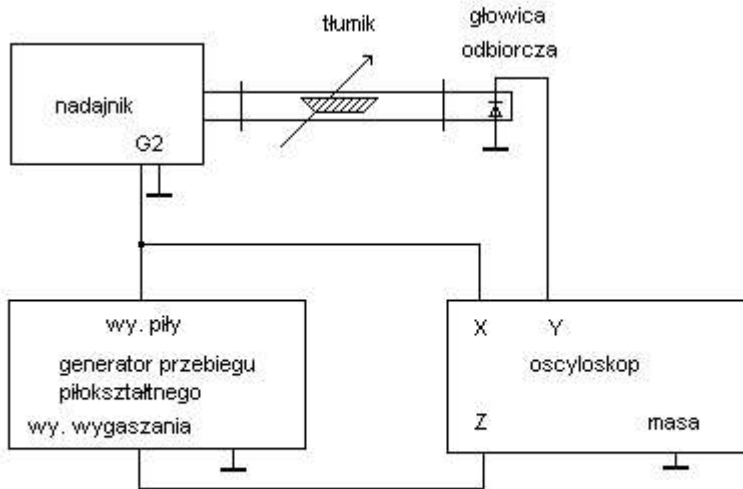
Rys.13.Zależność mocy wyjściowej klistronu 2k25 od napięcia reflektora U_{rfl} ; napięcie rezonatora $U_{rez}=275\text{V}$





Rys.14. Schemat układu do zdejmowania charakterystyki mocy klustronu w funkcji napięcia reflektora metodą "punkt po punkcie"

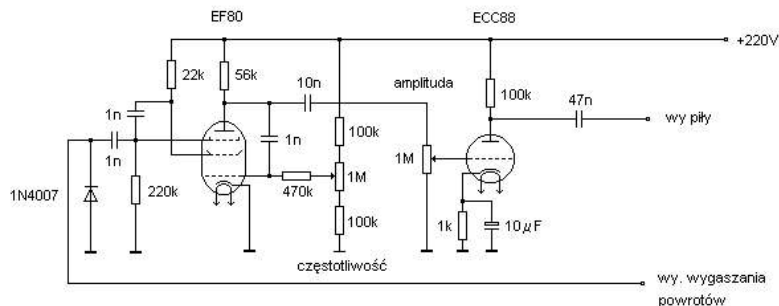
Przebieg zależności $P_{wy}=f(U_{rf1})$ można także zaobserwować na oscyloskopie. W takim przypadku należy dysponować generatorem przebiegu piłokształtnego- rys.15.



Rys.15. Schemat układu do oscyloskopowego zdejmowania charakterystyki $P_{wy}=f(U_{rf1})$ klustronu

Aby na ekranie oscyloskopu uwidocznić kilka zakresów drgań wymagane napięcie piłokształtne musi mieć amplitudę przynajmniej kilkudziesięciu V.

Generator dostarczający takich napięć z łatwością można zbudować przy użyciu lamp elektronowych. Na rys.16 przedstawiono schemat elektryczny dwulampowego generatora. Pentoda EF80 pracuje w układzie generatora tranzystronowego, zapewniającego dobrą liniowość napięcia piłokształtnego przy dużej prostocie układu. Z anody lampy EF80 jest pobierany przebieg piłokształtny, wzmacniany następnie w triodzie ECC88 (wykorzystana jest połowa tej lampy). Krótkie impulsy wygaszające plamkę na ekranie oscyloskopu (doprowadza się je do wejścia Z oscyloskopu) podczas powrotów można uzyskać z obwodu siatki trzeciej. Generator może być zasilany z zasilacza nadajnika (może być zamontowany w jednej obudowie z nadajnikiem) lub z oddzielnego transformatora.



Rys.16. Schemat generatora przebiegu piłokształtnego

Regulując amplitudę napięcia generatora oraz regulując potencjometrami P1 i P2 można obserwować wybrany zakres lub zakresy drgań klustronu- na fot. 14 widać 3 zakresy drgań klustronu 2k25.



fot. 14. Układ do oscyloskopowego zdjęmowania charakterystyki $P_{wy}=f(U_{rf})$ klustronu

Bibliografia

- M. i M Gurewicze- Przyrządy elektronowe, wydawnictwo MON 1962
J.Hennel- Lampy mikrofalowe WNT 1976,s.130-141
S.Stuchły, A.Kraszewski, L.Sokołowski- Pomiary elektronowych lamp mikrofalowych WNT 1965, s.237-248 i 311-320
Pod kier. J.Hennela- Lampy elektronowe- materiały pomocnicze do ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów III roku Wydziału Łączności, wydawnictwa PW 1963, s.85-95
R. Litwin i M.Suski- Technika mikrofalowa WNT 1972, s. 19-22, 390-406, 639
B. Galwas- Miernictwo mikrofalowe, WkiŁ 1985
K. Michel i T.Sapiński-symbole graficzne w elektrotechnice, elektronice i automatyce, WSiP 1977, s.90-91
W.F. Własow- Lampy elektronowe, PWT 1954

Aleksander Zawada
aleksander.zawada@ep.com.pl