

BIBLIOTEKA
POLSKIEGO KRÓTKOFALOWCA

39

KRZYSZTOF DĄBROWSKI
OE1KDA

ŁĄCZNOŚCI ŚWIETLNE

WIEDENŃ 2018



© Krzysztof Dąbrowski OE1KDA
Wiedeń 2018

Opracowanie niniejsze może być rozpowszechniane i kopiowane na zasadach niekomercyjnych w dowolnej postaci (elektronicznej, drukowanej itp.) i na dowolnych nośnikach lub w sieciach komputerowych pod warunkiem nie dokonywania w nim żadnych zmian i nie usuwania nazwiska autora. Na tych samych warunkach dozwolone jest tłumaczenie na języki obce i rozpowszechnianie tych tłumaczeń.

Na rozpowszechnianie na innych zasadach konieczne jest uzyskanie pisemnej zgody autora.

Łączności świetlne

Krzysztof Dąbrowski OE1KDA

Wydanie 1
Wiedeń, wrzesień 2018

Spis treści

Wstęp	6
1. Podstawy	7
1.1. Lasery i diody elektroluminescencyjne	9
1.2. Fotodiody	13
1.3. Stosowane emisje	14
1.4. Propagacja	16
1.5. Technika operatorska	16
2. Nadajniki z bezpośrednią modulacją jasności	17
2.1. Proste nadajniki z diodą elektroluminescencyjną	17
2.2. Nadajnik DJ9TU na diodzie laserowej	18
2.3. Prosty nadajnik F1AVY na diodzie laserowej	21
2.4. Nadajnik K3PGP na pojedynczej diodzie laserowej	22
2.5. Nadajnik K3PGP na dwóch diodach laserowych	23
3. Nadajniki z modulowaną podnośną	24
3.1. Telegraficzna stacja nadawczo-odbiorcza WB9AJZ	24
3.2. Nadajnik foniczny z podnośną modulowaną częstotliwościowo	25
3.3. Nadajnik foniczny z dwoma rodzajami modulacji	27
4. Odbiorniki systemów z bezpośrednią modulacją jasności	29
4.1. Dwustopniowy odbiornik z fotodiodą	29
4.2. Odbiornik DJ9TU	30
4.3. Głowica odbiorcza do pracy nocnej	36
4.4. Głowica odbiorcza do pracy dziennej	37
4.5. Czuły odbiornik do łączności fonicznych	38
5. Odbiorniki systemów z modulowaną podnośną	39
5.1. Odbiornik DL2CH z przełączanym rodzajem modulacji	39
6. Systemy optyczne	42
6.1. Soczewka jako antena	42
6.2. Konstrukcja mechaniczna stacji DJ9TU	45
Dodatek A. Obliczanie wartości oporników szeregowych dla diod świecących	47
Literatura i adresy internetowe	48

Sommaire

Liaisons optiques

Préface	6
1. Les bases	7
1.1. Lasers et diodes DEL	9
1.2. Photodiodes	13
1.3. Les modes opératoires	14
1.4. La propagation	16
1.5. Procédures de trafic	16
2. Émetteurs à modulation de luminosité	17
2.1. Émetteurs simples à DEL	17
2.2. Émetteur de DJ9TU à diode laser	18
2.3. Émetteur simple de F1AVY à diode laser	21
2.4. Émetteur de K3PGP à une diode laser	22
2.5. Émetteur de K3PGP à deux diodes laser	23
3. Émetteurs à sous-porteuse MF	24
3.1. Transceiver CW de WB9AJZ	24
3.2. Émetteur vocal à sous-porteuse MF	25
3.3. Émetteur vocal à modulation de luminosité et sous-porteuse MF	27
4. Récepteurs à modulation de luminosité	29
4.1. Récepteur à deux étages à photodiode	29
4.2. Récepteur de DJ9TU	30
4.3. Étage d'entrée pour liaisons nocturnes	36
4.4. Étage d'entrée pour liaisons diurnes	37
4.5. Récepteur vocal sensible	38
5. Récepteurs à sous-porteuse MF	39
5.1. Récepteur de DL2CH à modulation de luminosité et sous-porteuse MF	39
6. Les systèmes optiques	42
6.1. Lentille comme antenne	42
6.2. Montage du transceiver de DJ9TU	45
Annexe A. Calcul de résistance série pour DEL	47
Les pages WEB	56

Wstęp

W widmie fal elektromagnetycznych powyżej mikrofal znajdują się zakresy promieniowania podczerwonego, pasmo światła widzialnego i zakres ultrafioletu. Podczerwień i światło widzialne są już od dawna używane w komunikacji zarówno profesjonalnej jak i amatorskiej. Obecnie obowiązująca w Polsce „Tabela krajowych przeznaczeń częstotliwości” obejmuje przeznaczenia do 275 GHz, co oznacza, że powyżej 300 GHz czyli dolnej granicy podczerwieni możliwe jest dowolne korzystanie z komunikacji świetlnej zarówno w eksperymentach krótkofalarskich jak i mających inny dowolny charakter. Mogą to być również urządzenia służące do transmisji dowolnych treści (muzyki itp.) w granicach własnego domu czy ogrodu jak i urządzenia zabawkowe dla dzieci i młodzieży. Autor sam zresztą pod koniec szkoły podstawowej skonstruował takie urządzenie oparte na dwóch tranzystorach i żaróweczce wzorując się na opisie z jednego z czasopism młodzieżowych.

Obecne możliwości techniczne są znacznie bardziej zaawansowane. W nadajnikach zamiast żarówek o znacznej bezwładności cieplnej ograniczającej pasmo przenoszenia korzysta się z diod elektroluminescencyjnych, i z fotodiod w odbiornikach, co zapewnia dobre przenoszenie sygnałów mowy i nie tylko. W urządzeniach przeznaczonych do łączności na dalsze dystanse używane są również diody laserowe. Jak zobaczymy dalej niesie to ze sobą nie tylko korzyści, a dodatkowo może być niebezpieczne dla wzroku. Ostrożność i bezwzględne unikanie kierowania światła do oczu są absolutną koniecznością. W przypadku diod elektroluminescencyjnych, zwłaszcza o mniejszej jasności sprawa nie jest tak krytyczna i proste urządzenia o krótkich zasięgach mogą być używane przez dzieci i młodzież. Krótkofalowcy natomiast osiągają zasięgi przekraczające sto lub nawet dwieście kilometrów. Nie jest to sprawą łatwą i wymaga zdobycia doświadczenia w sprawach propagacji fal świetlnych w atmosferze i co najważniejsze – nacelowania na siebie wiązek światła obu stacji. W trakcie celowania krótkofalowcy najczęściej posługują się pomocniczo łącznością w pasmach 2 m lub 70 cm.

Silnie skupione wiązki światła oznaczają, że nacelowanie stacji na siebie jest trudne i czasochłonne już przy znacznie krótszych odległościach.

Najczęściej stosowane są łączności foniczne, ale krótkofalowcy eksperymentują także z emisjami cyfrowymi i telegrafią.

Dzięki silnemu skupieniu wiązek światła możliwe jest umieszczenie obok siebie odbiornika i nadajnika bez oddziaływania na odbiornik własnego nadawanego sygnału jako to ma miejsce w klasycznych zakresach radiowych. Łączności świetlne są więc przeważnie lub nawet wyłącznie prowadzone duplexowo, co ułatwia zresztą optymację kierunku ustawienia stacji w ostaniej fazie przygotowań.

Rolę anten radiowych pełnią w łącznościach świetlnych soczewki lub reflektory. Dla niewielkich odległości mogą to być nawet reflektory od zwykłych latarek ręcznych albo rowerowych albo dowolne soczewki o niewielkich średnicach. Po stronie nadawczej wystarczają też soczewki zintegrowane z diodami świecącymi albo laserowymi. Łączności na dłuższe dystanse wymagają bardziej rozbudowanych systemów optycznych.

Krzysztof Dąbrowski OE1KDA

Wiedeń

5 września 2018

1. Podstawy

W górnej części widma fal elektromagnetycznych wykorzystywanych w łączności leżą zakresy światła widzialnego i podczerwieni. Zakresy te są używane do celów łączności już od ponad stu lat. Dzięki możliwości silnego skupienia wiązki łączność na odległości wielu kilometrów a nawet dziesiątek kilometrów wymaga stosunkowo niewielkich mocy nadawania – od kilkudziesięciu do kilkuset mW.

Łatwa dostępność podzespołów takich jak diody elektroluminescencyjne, diody laserowe i niskoszumne fotodiody ułatwia korzystanie z łączności świetlnych również krótkofalowcom. Uzyskiwane zasięgi zależą w pierwszym rzędzie od widoczności, czyli od warunków meteorologicznych. Przy dobrej widoczności różnice mocy nadawania mają w praktyce mniejsze znaczenie. Doświadczeni i dobrze wyposażeni krótkofalowcy uzyskują zasięgi przekraczające 100, a nawet 200 km, ale na początek wystarczą dystanse od kilkuset metrów do kilku kilometrów.

Dolną granicą zakresu jest fala o długości 1 mm, co odpowiada częstotliwości 0,3 THz (300 GHz).

Podobnie jak dawniej w klasycznych zakresach radiowych podawane są głównie lub prawie wyłącznie długości fali, a nie częstotliwości.

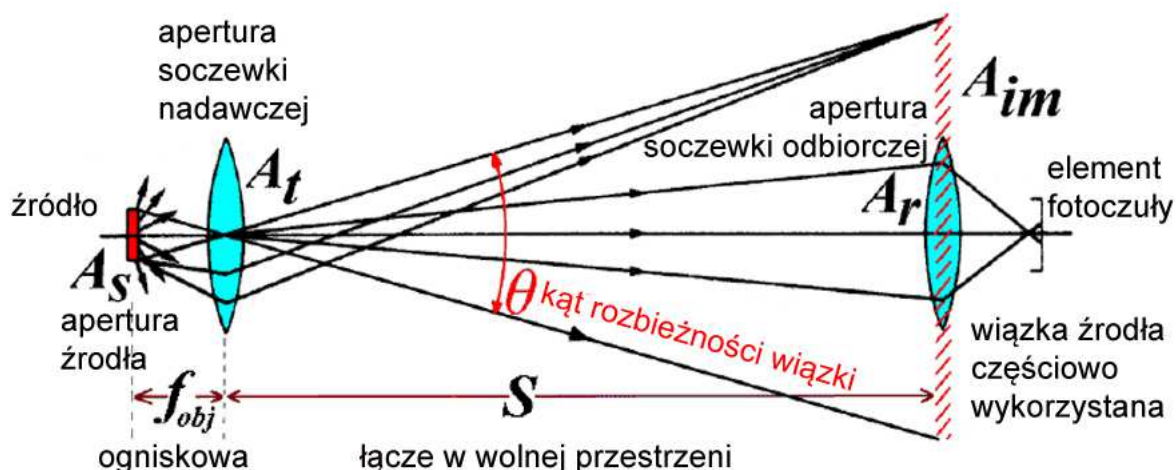
Tabela 1.1
Zakresy częstotliwości

Zakres częstotliwości	Długości fali	Oznaczenie i uwagi
0,3 – 100 THz	1 mm – 3 μ m	Podczerwień C
100 – 214 THz	3 – 1,4 μ m	Podczerwień B
214 – 429 THz	1,4 μ m – 700 nm	Podczerwień A
429 – 750 THz	700 – 400 nm	Światło widzialne, łączności na 660 nm +/- 15 nm
750 – 952 THz	400 – 315 nm	Ultrafiolet A
952 – 1071 THz	315 – 280 nm	Ultrafiolet B
1071 – 1667 THz	280 – 180 nm	Ultrafiolet C



Rys. 1.1. Widmo światła widzialnego i zakresów sąsiednich

Nadajniki łączności świetlnej zawierają źródło promieniowania widzialnego lub podczerwonego skupianego w pożądanym kierunku za pomocą soczewki, systemu soczewek albo reflektorów. Rozróżniane są dwa rodzaje promieniowania: promieniowanie niekoherentne i koherentne. W pierwszym przypadku jako źródło światła wykorzystywane są diody elektroluminescencyjne, a w drugim – diody laserowe. W systemach profesjonalnych używane są również lasery innych typów, ale jest to rozwiązanie zbyt drogie i zbyt skomplikowane jak na warunki amatorskie.



Rys. 1.2. Łącze optyczne w wolnej przestrzeni

W pierwszym przybliżeniu, bez uwzględnienia tłumienia trasy i wpływu fluktuacji (falowania) powietrza moc odbierana wyraża się wzorem:

$$\Phi = \frac{G_T A_T A_R L}{S^2}$$

gdzie G_T jest geometrycznym współczynnikiem korekcyjnym nadawczego układu optycznego zależnym m.in. od stosunku f/D (ogniskowej do średnicy), A_T – powierzchnią (aperturą) optycznego układu nadawczego, A_R – powierzchnią odbiorczego układu optycznego, L – nadawanym strumieniem światła, a S – odległością odbiornika od nadajnika.

Współczynnik G_T o wartościach poniżej jedności oznacza wystąpienie znaczących strat sprawności dla układów optycznych o krótkich ogniskowych i co za tym idzie małych stosunkach f/D . Intensywność odbieranego strumienia szybko maleje w miarę obniżania stosunku f/D ponieważ wzrasta kąt rozbieżności wiązki, a w wyniku tego maleje również wykorzystywana część energii.

Dla zwierciadeł parabolicznych występuje nieco inna sytuacja, ponieważ zwierciadło może w pewnym stopniu otaczać źródło światła i odbijać większą część jego promieniowania aniżeli w przypadku soczewek. Strata sprawności jest więc dla zwierciadeł mniejsza niż dla soczewek o tym samym stosunku f/D . W celu uzyskania jak największych zasięgów konieczne jest stosowanie soczewek o dużych średnicach, zapewniających znaczne zyski antenowe. Zmniejszają one jednocześnie negatywny wpływ fluktuacji powietrza uśredniając go na całą większą powierzchnię. Długie ogniskowe zwiększają wymiary mechaniczne systemu optycznego i dlatego praktycznym kompromisem są stosunki f/D od 1 do 1,5.

Pomimo częstego użycia laserów stosowanie światła niekoherentnego, emitowanego przez diody elektroluminescencyjne daje pewne korzyści w łącznościach na dłuższe dystanse. Częstotliwość emisji wąskopasmowej może w miarę rozgrzewania się diody laserowej dryfować w kierunku zakresów o większym tłumieniu atmosferycznym, natomiast emisja o szerszym paśmie jest w takiej sytuacji tylko w części pasma silniej tłumiona. Podobnie mniejszy jest też wpływ fluktuacji powietrza. Również soczewki i obiektywy dla wąskopasmowych emisji laserowych muszą mieć znacznie niższe tolerancje wykonania, aniżeli dla emisji o szerszym paśmie. Wiązka laserowa niesie też ze sobą większe ryzyko obrażeń oczu u przypadkowych obserwatorów. Wycelowanie na siebie systemów optycznych u obu korespondentów może być również trudniejsze dla bardziej skupionych wiązek światła laserowego.

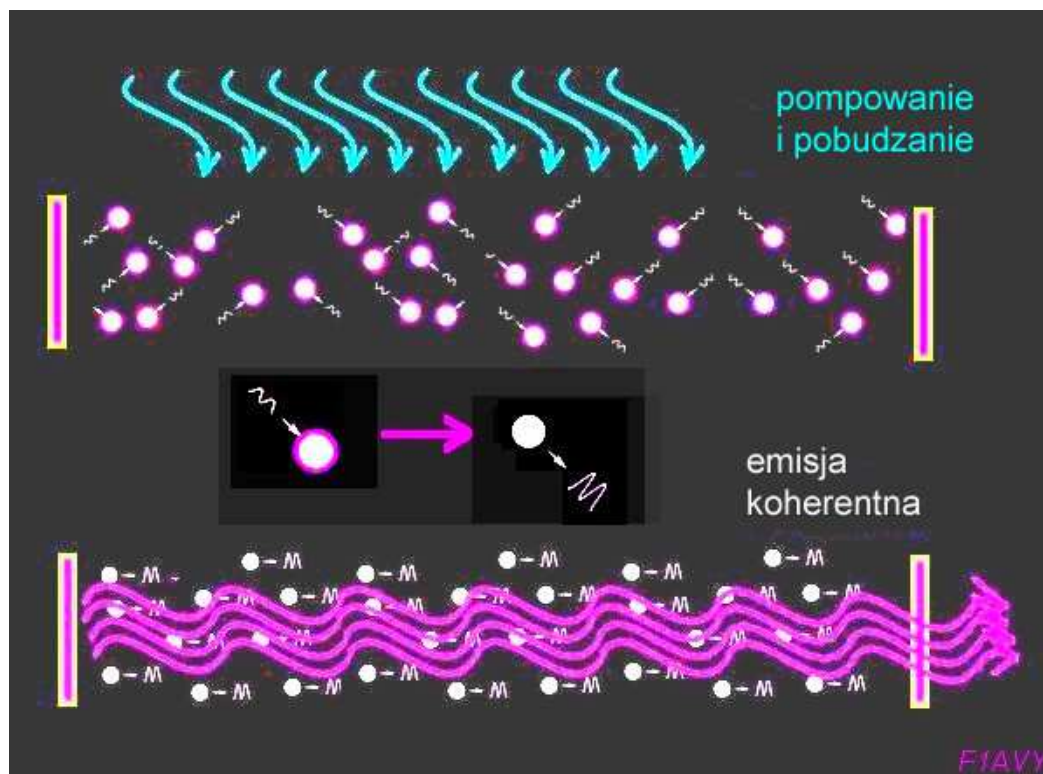
1.1. Lasery i diody elektroluminescencyjne

Lasery emitują światło koherentne tzn. charakteryzujące się dokładnie określoną częstotliwością i fazą podobnie jak w przypadku nadajników radiowych dla klasycznych zakresów fal. Wiązka światła laserowego jest też znacznie silniej skupiona w przestrzeni, aniżeli światło zwykłych diod elektroluminescencyjnych.

Zawarty w przezroczystym rezonatorze optycznym materiał, z którego skonstruowany jest laser (gaz pod niskim ciśnieniem, półprzewodnik, kryształ domieszkowany metalami ziem rzadkich) emituje promieniowanie koherentne w wyniku pobudzenia go do rezonansu za pomocą dostarczonej energii świetlnej lub elektrycznej. Pobudzanie to jest również nazywane pompowaniem.

Energia promieniowana przez laser jest proporcjonalna do energii pobudzenia, co oznacza możliwość jego modulacji przez zmienność pobudzenia, w przypadku diod laserowych – płynącego przez nie prądu (o natężeniu przekraczającym progowe). Częstotliwość sygnału modulującego może dla niektórych typów laserów dochodzić do gigaherców.

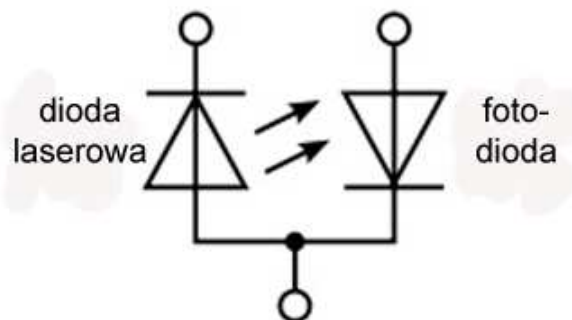
Diody laserowe posiadają przeważnie fotodiode umieszczoną we wspólnej obudowie i przeznaczoną do pomiaru mocy promieniowania. Bywa ona używana w układach stabilizacji punktu pracy i temperatury lasera. Najczęściej oba elementy posiadają jedno wspólne wyprowadzenie i dwa oddzielne po przeciwnej stronie złącza. Spadek napięcia na diodzie laserowej wynosi około 2 V, natomiast na fotodiodzie 0,7 V. Maksymalne napięcie w kierunku zaporowym dla diody laserowej może leżeć nawet poniżej 1 V. Należy chronić diodę laserową przed przypadkowymi impulsami, które mogą zaindukować się w dłuższych przewodach doprowadzających zasilanie i których napięcie może przekroczyć wartości bezpieczne dla lasera. Dlatego też diody laserowe powinny znajdować się jak najbliżej układu sterującego (i zarazem modulatora), aby doprowadzenia mogły być jak najkrótsze.



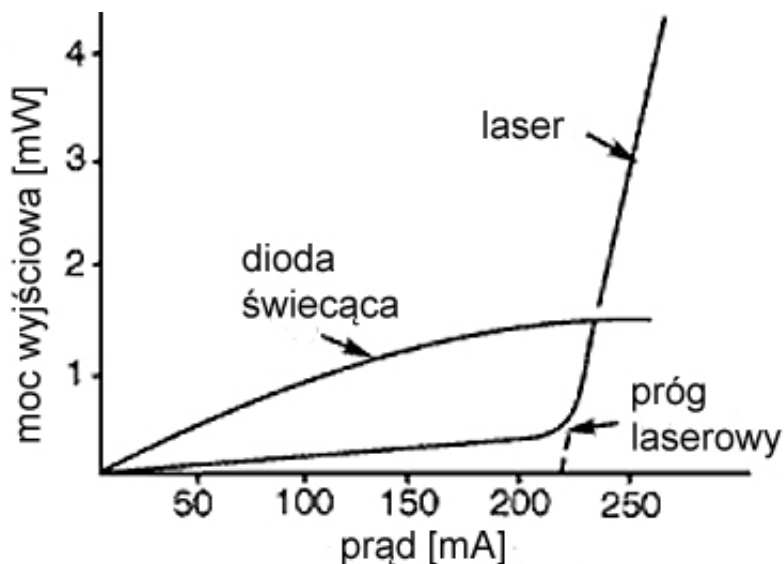
Rys. 1.1.1. Zasada działania lasera



Fot. 1.1.2. Dioda laserowa

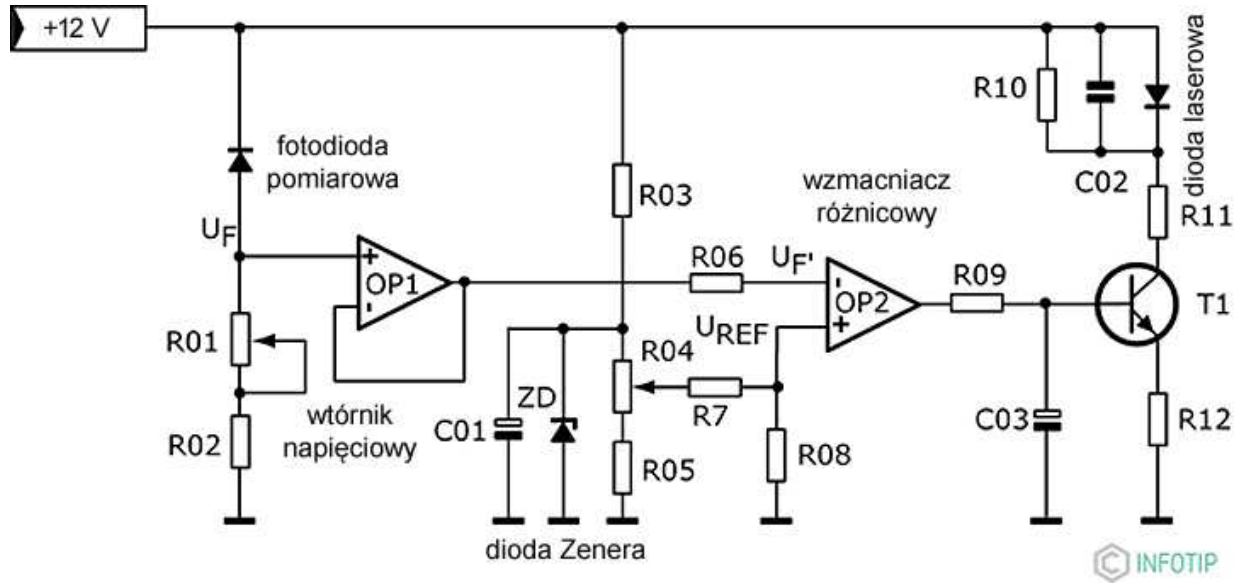


Rys. 1.1.3. Wyprowadzenia typowej diody laserowej

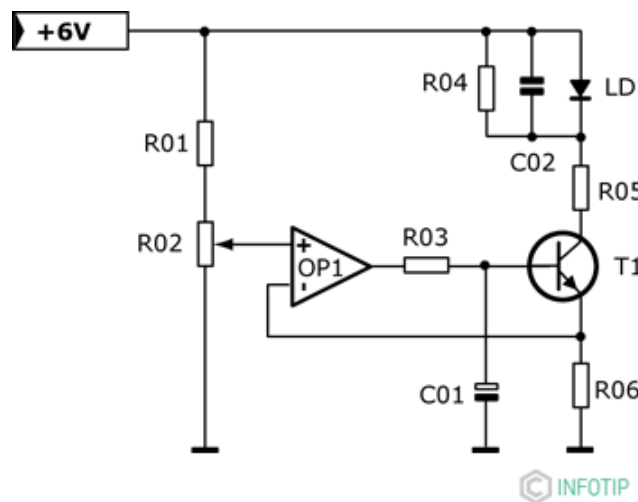


Rys. 1.1.4. Przykładowe charakterystyki diody laserowej i elektroluminescencyjnej. Efekt laserowy występuje dopiero powyżej pewnego progu. W zakresie niższym dioda laserowa pracuje jak zwykła dioda elektroluminescencyjna

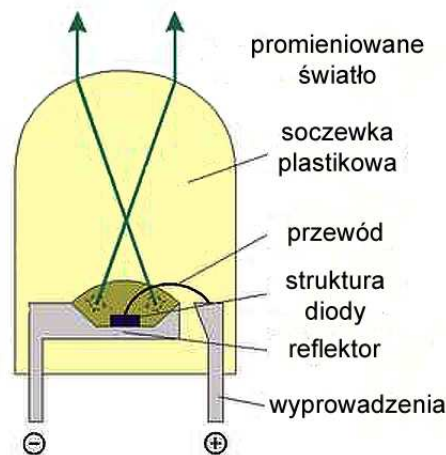
W praktyce występuje kilka rodzajów diod laserowych, od najprostszych nie wyposażonych w fotodiody, przez diody ze wspólnym plusem lub ze wspólnym minusem zasilania dla lasera i fotodiody (są to odpowiednio typy N lub P), aż po diody, w których katoda fotodiody jest połączona z katodą lasera, co wymaga włączenia oporników ograniczających prąd lasera do obwodu jego katody. Są to diody typu M. Diody laserowe większej mocy wymagają na ogół chłodzenia i przyjmuje się, że obniżenie temperatury pracy o 10 stopni Celsjusza przedłuży dwukrotnie jej żywotność. Temperatura pracy diody laserowej wpływa również na długość emitowanej przez niego fali, przykładowo dla laserów GaAlAs zależność ta wynosi w przybliżeniu $0,25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Zmiana ta jest monotoniczna tylko w wąskim zakresie, a w ogólności objawia się w postaci skoków długości fali.



Rys. 1.1.5. Zasada pracy układu stabilizacji promieniowanej mocy dla diody laserowej z wykorzystaniem wbudowanej diody pomiarowej. Potencjometr R04 służy do ustawienia maksymalnej dopuszczalnej mocy, a R01 – do regulacji mocy roboczej. Napięcie odniesienia dla wzmacniacza różnicowego jest stabilizowane przez diodę Zenera



Rys. 1.1.6. Regulacja prądu diody laserowej stosowana w uproszczonych rozwiązaniach. Do tego celu służy potencjometr R02



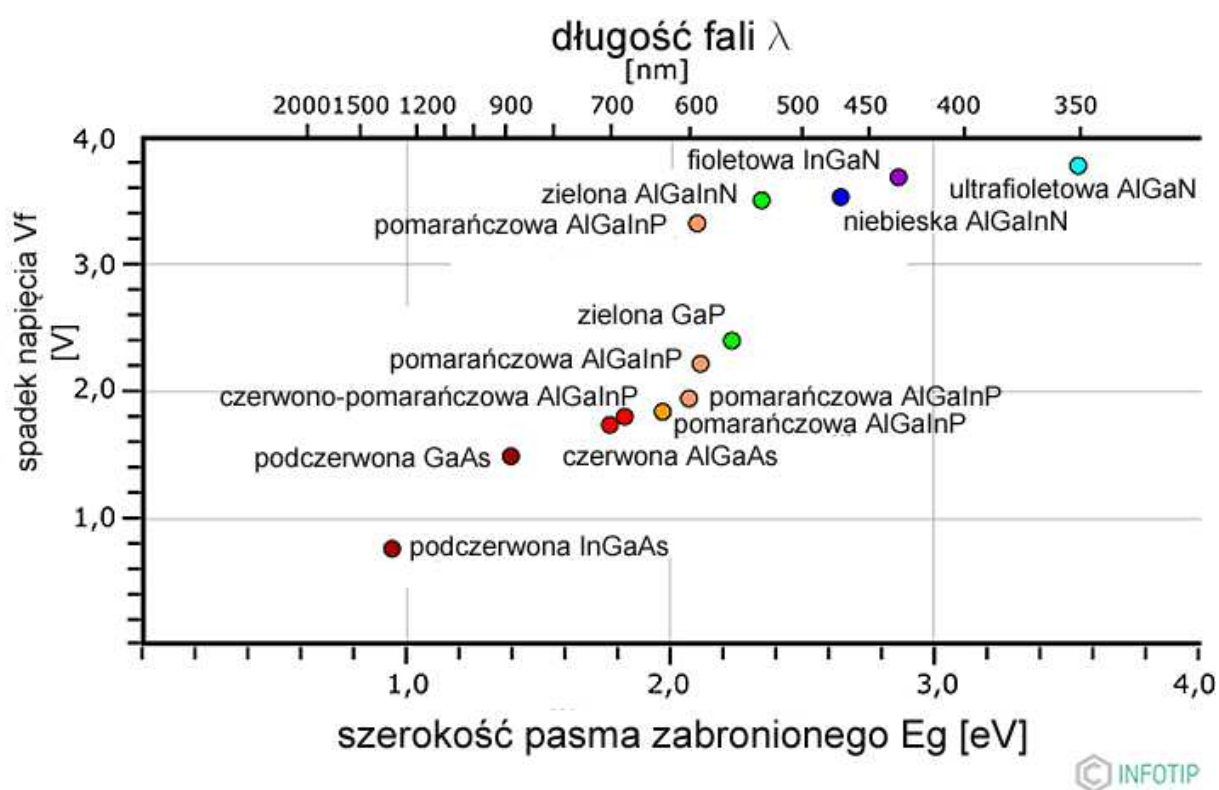
Rys. 1.1.7. Konstrukcja i wyprowadzenia diody świecącej

Tabela 1.2

Przykładowe parametry podczerwonej diody laserowej

Moc maksymalna przy pracy ciągłej 200 mW, maksymalne napięcie wsteczne 2 V, zakres temperatur pracy -10 – +50 °C, zakres temperatur magazynowania -40 – +75 °C, obudowa TO-18.

Parametr	Oznaczn.	Min.	Typ.	Maks.	Jednostki	Uwagi
Długość fali w środku pasma	I	805	808	811	nm	P = 200 mW
Prąd progowy	I _{pr}	–	55	75	mA	
Prąd roboczy	I _r	–	260	280	mA	P = 200 mW
Napięcie	U _r	–	1,7	1,9	V	
Nachylenie charakterystyki	h	0,8	1,0	–	mW/mA	P = 150 – 200 mW



Rys. 1.1.6. Kolory świecenia diod elektroluminescencyjnych i spadki napięcia na nich w zależności od szerokości pasma zabronionego użytego materiału

W odróżnieniu od diod laserowych diody elektroluminescencyjne emitują światło niekoherentne o szerokościach widma 50 – 100 nm, mocach rzędu miliwatów, a maksymalne częstotliwości modulujące są w zależności od typu ograniczone do 100 MHz. Wiązki światła mają też znacznie szerszy kąt rozwarcia. Oprócz diod podczerwonych produkowane są diody świecące na czerwono, pomarańczowo, żółto, zielono, niebiesko i biało. Kolor świecenia zależy od rodzaju materiału i jego domieszkowania, a konkretnie od szerokości jego pasma zabronionego (rys. 1.1.6). Ich obudowy są wykonane albo z plastiku w odpowiednim kolorze (filtrującego w pewnym stopniu promieniowanie emitowane przez diodę) albo z przezroczystego. W diodach emitujących światło białe obudowy są wewnątrz pokryte warstwą fluorescencyjną pobudzaną do świecenia przez ultrafioletowe promieniowanie diody właściwej. Inną możliwością jest umieszczenie we wspólnej obudowie kilku diod o kolorach uzupełniających się do światła białego.

1.2. Fotodiody

W najprostszym przypadku fotodiody, tak jak zwykle diody składają się z obszarów o domieszkowaniu p i n, na styku których powstaje klasyczne złącze p-n. Są one wyposażone w okienko umożliwiające dopływ światła (widzialnego lub podczerwieni) do obszaru złącza. Światło to powoduje powstanie wewnątrz niego par dziura-elektron. Przyłożone do złącza napięcie (polaryzujące je w kierunku zaporowym) powoduje odpływanie dziur do ujemnego, a elektronów do dodatniego bieguna zasilania.

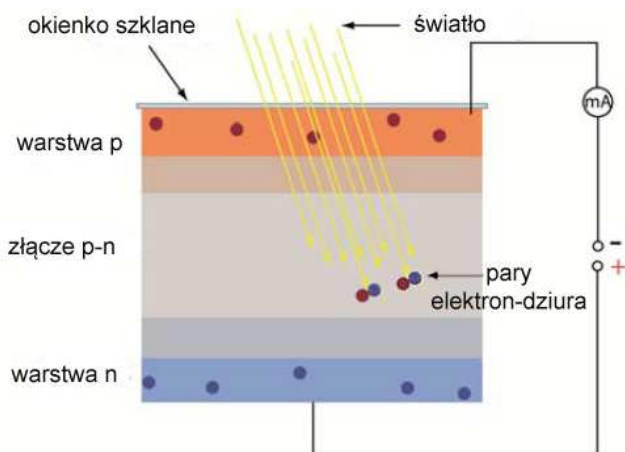
Fotodiody są wykonywane z materiałów półprzewodnikowych takich jak krzem i german lub z ich związków z grup III lub IV układu okresowego, takich arsenek galowo-indowy (InGaAs), arsenek galu (GaAs) itp. Fotodiody krzemowe mają przeważnie strukturę „pin”, w której pomiędzy obszarami o domieszkowaniu „p” i obszarami o domieszkowaniu „n” znajduje się warstwa nie domieszkowana – „i”. Dzięki temu uzyskuje się zwiększenie dopuszczalnego napięcia wstecznego i zmniejszenie pojemności własnej złącza, co zapewnia wzrost szerokości przenozonego pasma. Typowe częstotliwości graniczne dla fotodiod zwykłych leżą w pobliżu 10 MHz, a dla fotodiod PIN – przekraczają 1 GHz.

Ze względu na znaczną szerokość pasma zabronionego (odstępu między pasmami walencyjnym i przewodzenia) fotodiody krzemowe charakteryzują się stosunkowo niskimi szumami własnymi w porównaniu z fotodiodami wykonanymi z innych materiałów. Fotodiody wykonane z materiałów o węższych pasmach zabronionych wymagają chłodzenia dla obniżenia poziomu szumów.

Tabela 1.3

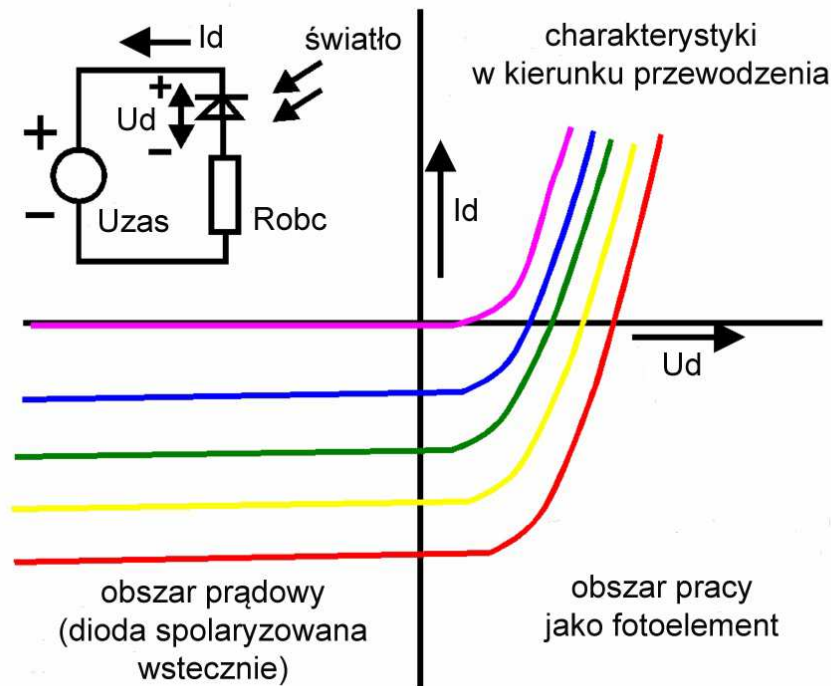
Zakresy czułości niektórych fotodiod

Material	Zakres [nm]
Krzem	190 – 110
German	400 – 1700
Arsenek galowo-indowy	800 – 2600
Tellurek kadmu	5000 – 20000

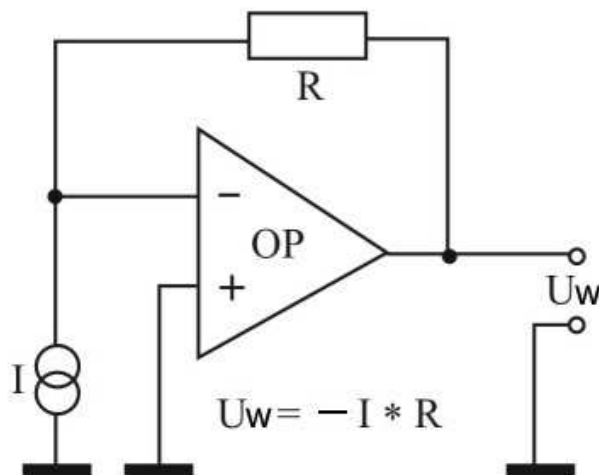


Rys. 1.2.1. Zasada działania fotodiody

Na charakterystykach fotodiod rozróżniane są trzy obszary pracy (rys. 1.2.2). Pierwszym z nich jest obszar źródła prądowego leżący w trzeciej ćwiartce układu współrzędnych. Charakteryzuje się on liniową zależnością prądu od oświetlenia diody w szerokim zakresie oświetlenia i jest stosunkowo najczęściej wykorzystywany. Dioda jest w tym przypadku obciążona niską lub zerową opornością, np. wejściem przetwornika prąd-napięcie. Drugim z nich jest obszar pracy fotoelementu leżący w czwartej ćwiartce. Dioda pracuje wówczas jako fotoelement – jest źródłem napięcia i powinna być obciążona dużą opornością np. opornością wejściową tranzystora polowego. Obszar charakterystyk dla polaryzacji w kierunku przewodzenia, leżący w pierwszej ćwiartce, nie jest wykorzystywany w pracy fotodiody.



Rys. 1.2.2. Charakterystyki fotodiody



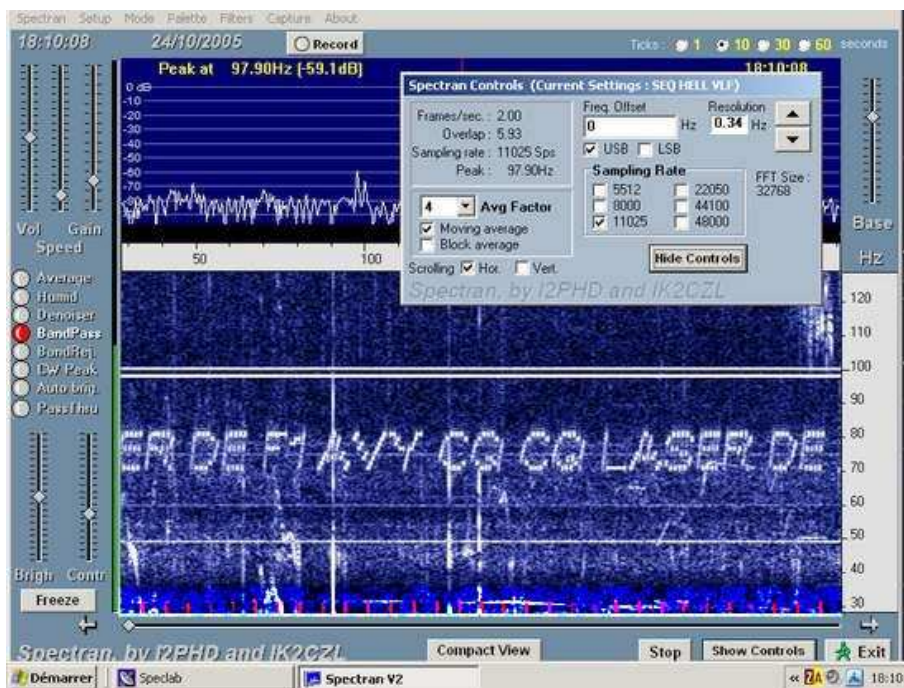
Rys. 1.2.3. Zasada pracy przetwornika prąd-napięcie

Innymi często stosowanymi elementami są fototranzystory. Obszarem światłoczułym jest w nich spolaryzowane zaporowo złącze baza-kolektor. Jest to więc element stanowiący połączenie fotodiody ze wzmacniaczem tranzystorowym. Większość typów fototranzystorów posiada jedynie wyprowadzenie kolektora i emitera, ale niektóre posiadają również wyprowadzenie bazy co pozwala na stabilizację ich punktów pracy. Wadą fototranzystorów jest stosunkowo niska częstotliwość graniczna. Jest ona wyższa dla tranzystorów o wyprowadzonej bazie, gdyż przez nią możliwy jest szybszy odpływ ładunków z obszaru złącza.

1.3. Stosowane emisje

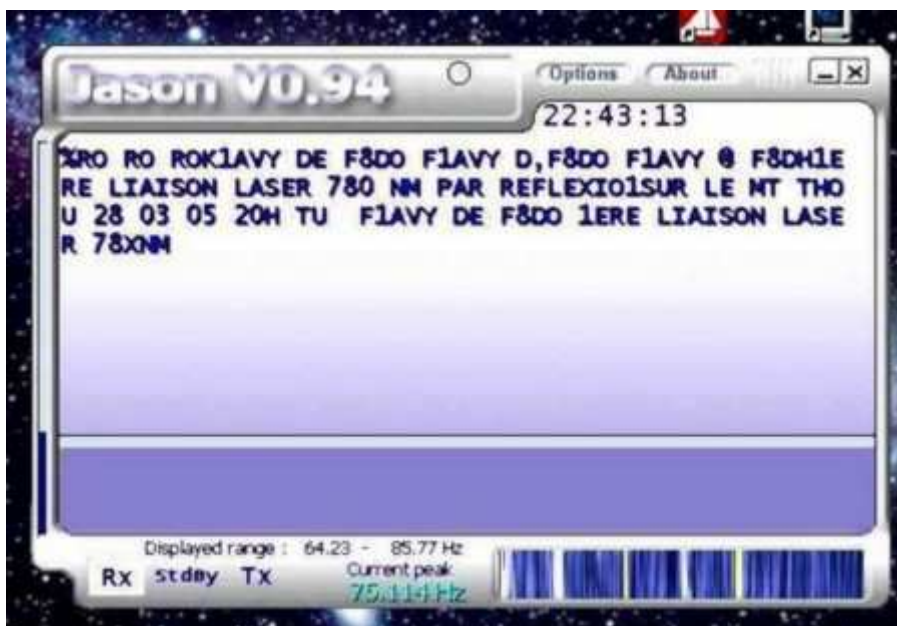
W łącznościach świetlnych najczęściej stosowana jest fonia AM przez bezpośrednią modulację jasności albo FM przy modulacji podnośnej, ale nic nie stoi na przeszkodzie w użyciu telegrafii modulowanej lub emisji cyfrowych. Częstotliwość podnośnej dla telegrafii modulowanej wynosi przeważnie 625 Hz, a dla emisji cyfrowych leży ona w pobliżu 800 Hz. Pasma fonii jest przeważnie ograniczone do zakresu

350 Hz – 2,7 kHz, ale nie jest to sprawa krytyczna. Typowe częstotliwości podnośnych dla modulacji FM leżą w zakresie 32 – 38 kHz, ale również i te wartości nie są krytyczne. Stosowany jest indeks modulacji 1 dla słabych sygnałów lub trochę wyższy dla silniejszych.



Fot. 1.3.1. Odbiór emisji cyfrowej – dalekopisu Hella

Na ilustracji 1.2.1. przedstawiony jest przykład odbioru emisji Hella przy użyciu programu „Spectran” autorstwa I2PHD. Sygnał nadawany przy użyciu lasera o mocy 5 mW z soczewką 5 mm na fali 780 nm był dobrze odbieralny w odległości 15 km. Po stronie nadawczej stosowano program „Hellschreiber” autorstwa IZ8BLY. Krótkofalowcy eksperymentują również z emisją PSK na podnośnych o częstotliwościach rzędu 800 Hz, telegrafią tonowaną, systemem „Jason” i innymi. Do ciekawszych eksperymentów należały próby z modulacją nadajnika laserowego za pomocą dwóch podnośnych, z których jedna była zmodulowana częstotliwościowo, a druga sygnałem SSB. Pierwsza z podnośnych miała częstotliwość 25, a druga – 67 kHz.

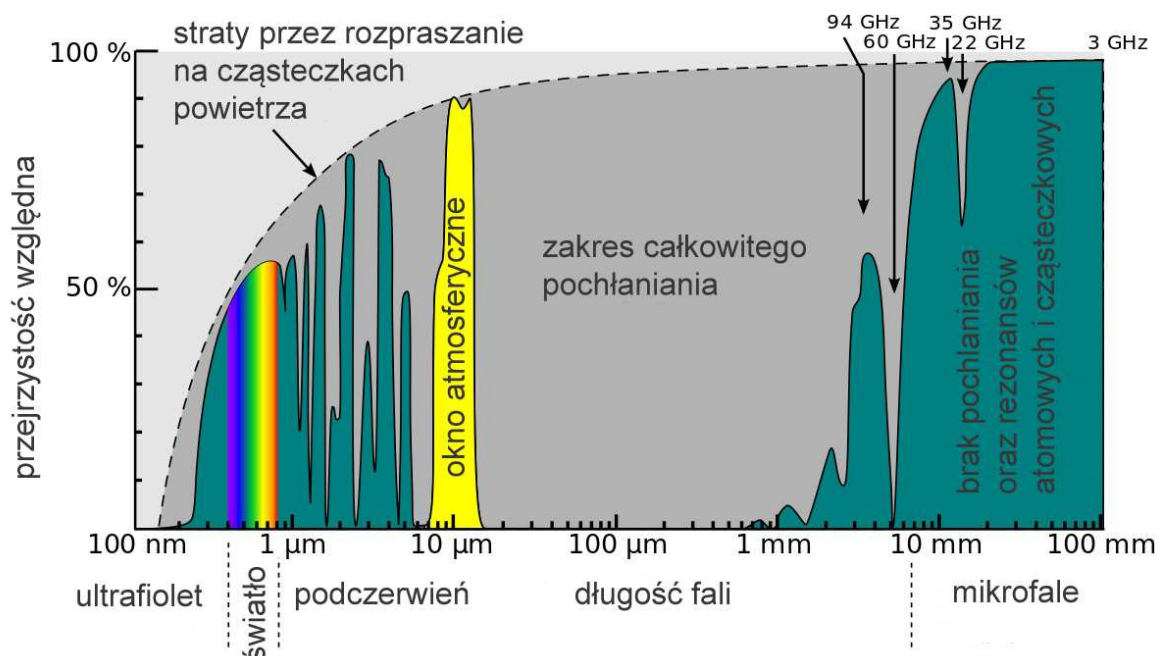


Fot. 1.3.2. Łączność w systemie Jason

1.4. Propagacja

Najczęściej stosowana jest łączność bezpośrednia, ale eksperymentalnie krótkofalowcy korzystają też z odbicia sygnałów świetlnych od chmur i z rozproszenia troposferycznego. W pierwszym przypadku najlepsze wyniki uzyskiwano przy skierowaniu promieni w górę, co jest związane z mniejszą odległością od chmur. Przy braku zachmurzenia możliwe jest natomiast wykorzystanie rozpraszania troposferycznego. Strumień światła musi być wówczas promieniowany w kierunku tuż powyżej horyzontu. Światło przebywa wówczas dłuższą drogę w atmosferze i dzięki temu jest silniej rozpraszane. W rozpraszaniu uczestniczą cząsteczki pyłów, para wodna, ewentualne unoszące się kryształki lodu i inne zanieczyszczenia zawarte w atmosferze.

Przy małych mocach laserów (5 mW i poniżej) sygnały odbite od chmur lub odebrane dzięki rozproszeniu są przeważnie na tyle słabe, że jedynie emisje cyfrowe mogą dzięki obróbce komputerowej zdać egzamin w tych sytuacjach. Należy też zadbać o uzyskanie możliwie największej czułości odbiornika. O ile światło widzialne jest stosunkowo dobrze przepuszczane przez atmosferę ziemską, o tyle w zakresie podczerwieni daje się zaobserwować szereg podzakresów o mniej lub bardziej silnym tłumieniu, przedzielonych podzakresami o lepszej przepuszczalności.



Rys. 1.4.1. Tłumienie i rozpraszanie światła na trasach atmosferycznych

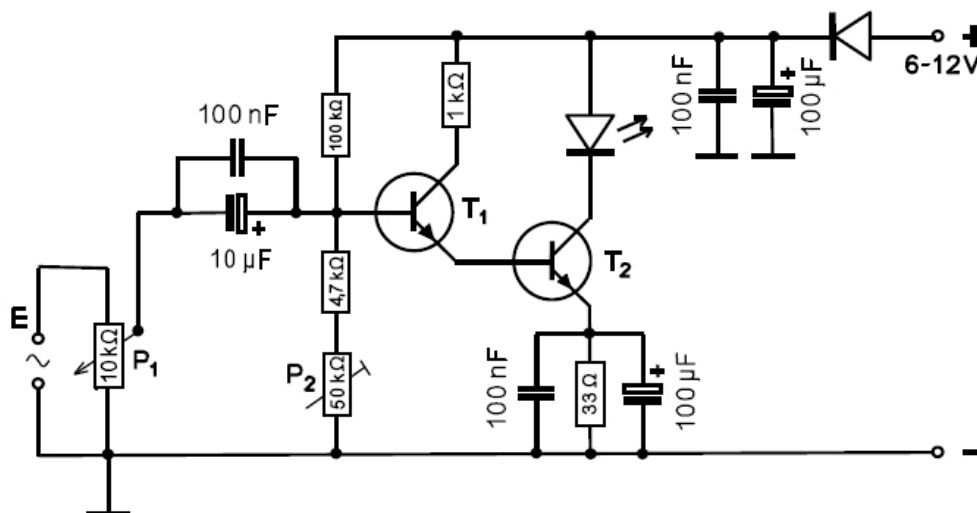
1.5. Technika operatorska

Dzięki możliwości umieszczenia nadajnika i odbiornika obok siebie łączności optyczne są prowadzone dwukrotnie.

2. Nadajniki z bezpośrednią modulacją jasności

Modulacja taka odpowiada modulacji amplitudy nadawanego sygnału. Układy nadawcze i odbiorcze są stosunkowo proste w realizacji i nie wymagają szerokiego pasma przenoszenia fotoelementów, co sprzyja ich popularności.

2.1. Proste nadajniki z diodą elektroluminescencyjną



Rys. 2.1.1. Schemat ideowy nadajnika

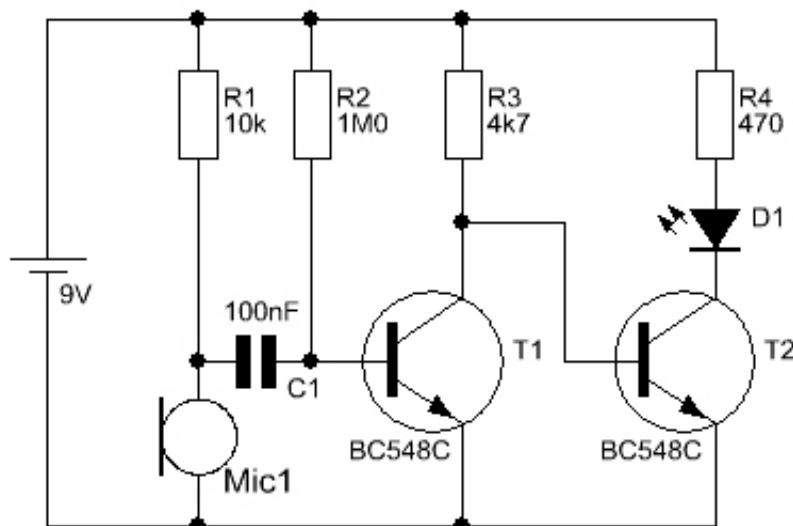
W dwutranzystorowym nadajniku świetlnym zastosowano diodę koloru czerwonego o podwyższonej jasności (rzędu 3000 mcd). W układzie Darlingtona jako tranzystor T1 pracuje BC547C lub zbliżony, a jako T2 – tranzystor mocy BC237 lub zbliżony. Dioda D1 typu 1N4148 chroni układ przed skutkami odwrotnego podłączenia napięcia zasilania. Potencjometr P1 służy do regulacji stopnia wymodulowania jasności diody nadawczej, a P2 – do ustawienia jasności spoczynkowej diody przy braku modulacji. Do wejścia E podłączane jest dowolne źródło sygnału m.cz.: mikrofon, odtwarzacz CD, odtwarzacz DVD itp. zależnie od tego czy łączności mają mieć charakter eksperymentów krótkofalarskich czy też transmisji ściśle użytkowych.



Fot. 2.1.2. Konstrukcja nadajnika z wykorzystaniem reflektora od latarki. Od frontu widoczne jest gniazdko diodowe (DIN) dla sygnałów m.cz. i gniazdko bananowe do podłączenia zasilania



Fot. 2.1.3. Płytką nadajnika we wnętrzu obudowy. Po prawej stronie znajduje się gniazdko do podłączenia diody nadawczej

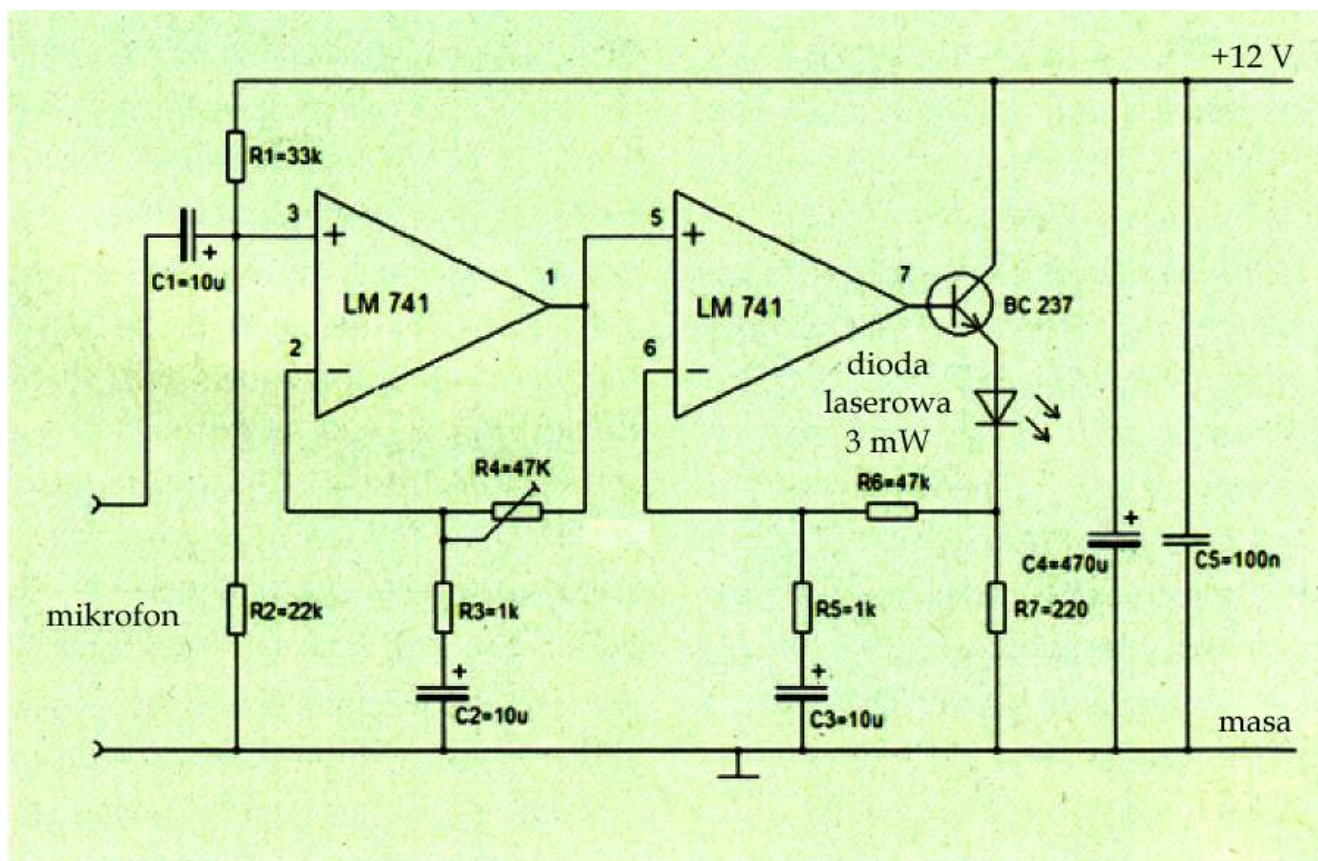


Rys. 2.1.4. Schemat ideowy dwutranzystorowego mikrofonu (prostego nadajnika) świetlnego

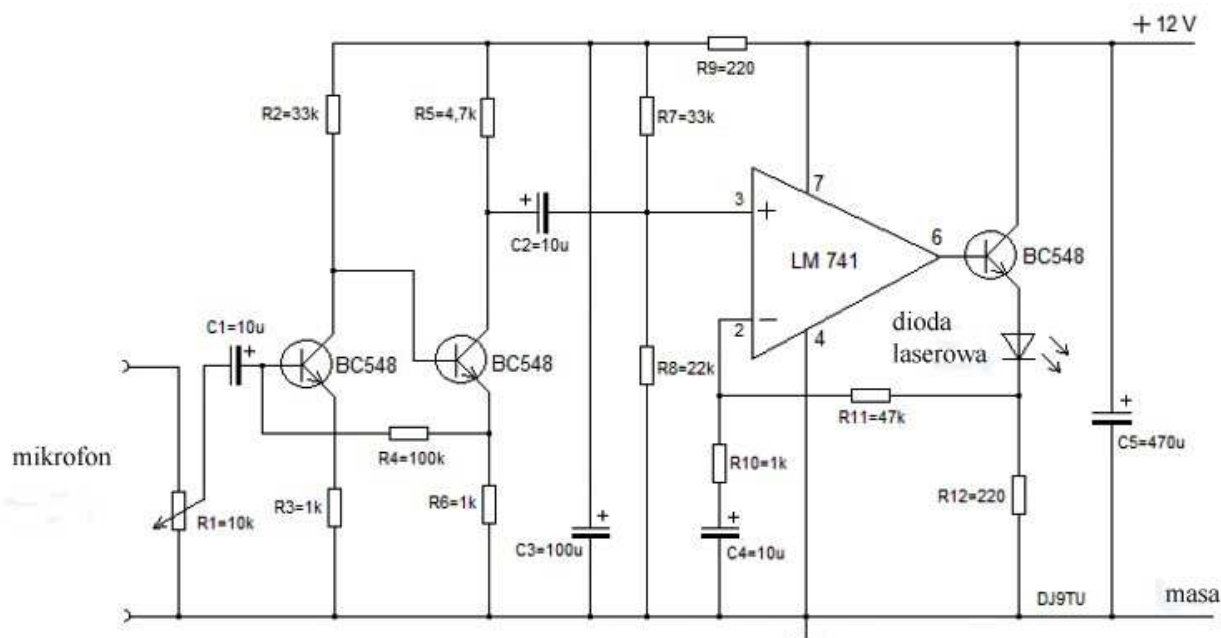
2.2. Nadajnik DJ9TU na diodzie laserowej

W nadajniku zastosowano diodę laserową o mocy 3 mW. Jej jasność jest modulowana sygnałem m.cz. Zaletą takich rozwiązań jest prostota układu, ale jednocześnie wadą jest wrażliwość na zakłócenia powodowane przez wpływ deszczu i falowania rozgrzanego powietrza. Jasność świecenia diod elektroluminescencyjnych i laserowych jest proporcjonalna do płynącego przez nie prądu, co wymaga ich sterowania przez źródło prądowe. W układzie nadajnika (modulatora jasności) pracują dwa wzmacniacze operacyjne typu LM741 i tranzystor krzemowy typu BC237. Zamiast LM741 można zastosować podwójny wzmacniacz operacyjny OPA2227.

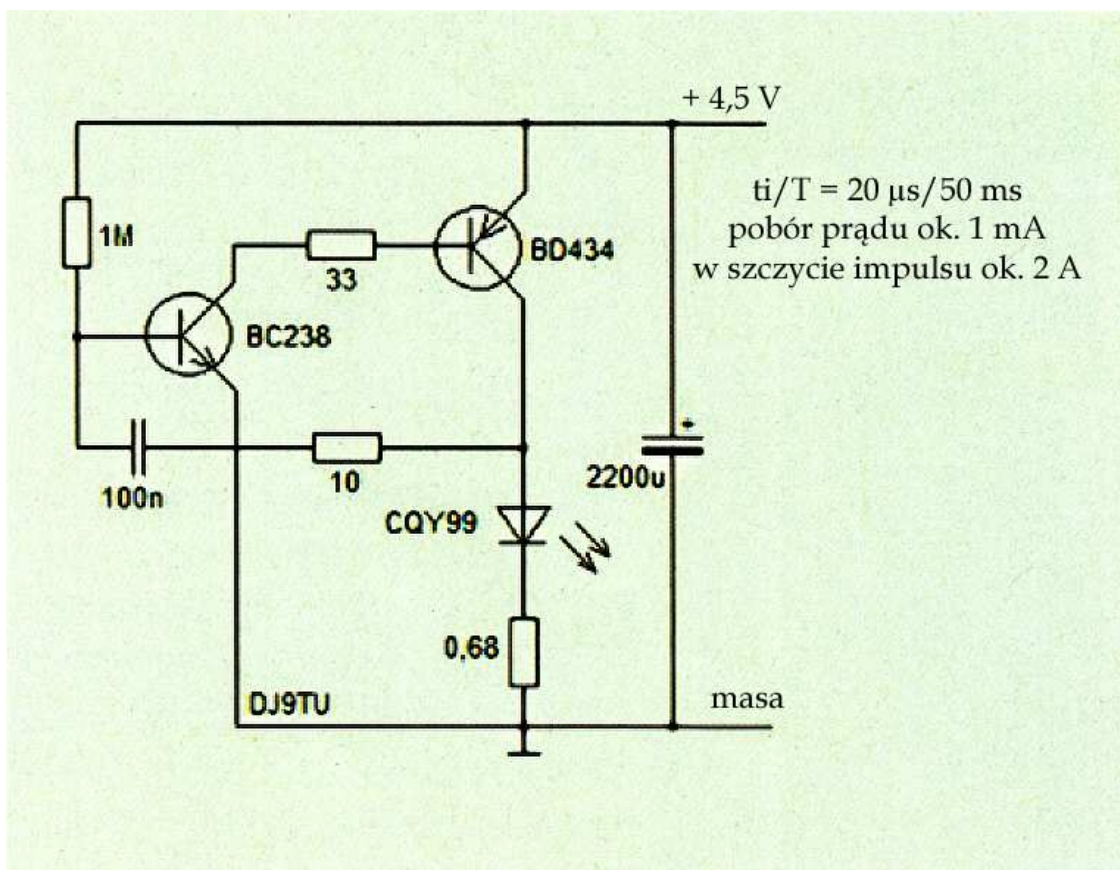
Dla osiągnięcia dalszych zasięgów konieczne jest zastosowanie soczewek skupiających światło zarówno w nadajniku jak i w odbiorniku. Silne skupienie wiązki świetlnej wymaga precyzyjnego nakierowania soczewek po obu stronach łącza. Pomocny w tym zadaniu może być przedstawiony na ilustracji 2.2.2 generator impulsów odciążający operatora od konieczności dłuższego mówienia do mikrofonu. Układy elektroniczne można wykonać na uniwersalnych płytkach drukowanych.



Rys. 2.2.1. Schemat ideowy nadajnika na diodzie laserowej i dwóch wzmacniaczach operacyjnych. Potencjometr R4 służy do regulacji wzmacnienia pierwszego stopnia



Rys. 2.2.2. Schemat nadajnika ze wzmacniaczem tranzystorowym i regulacją głębokości modulacji na wejściu



Rys. 2.2.3. Nadajnik impulsów do nakierowywania soczewek. Długość impulsów wynosi 20 μ s, a ich częstotliwość powtarzania 20 Hz. Dioda CQY99 świeci w zakresie podczerwieni



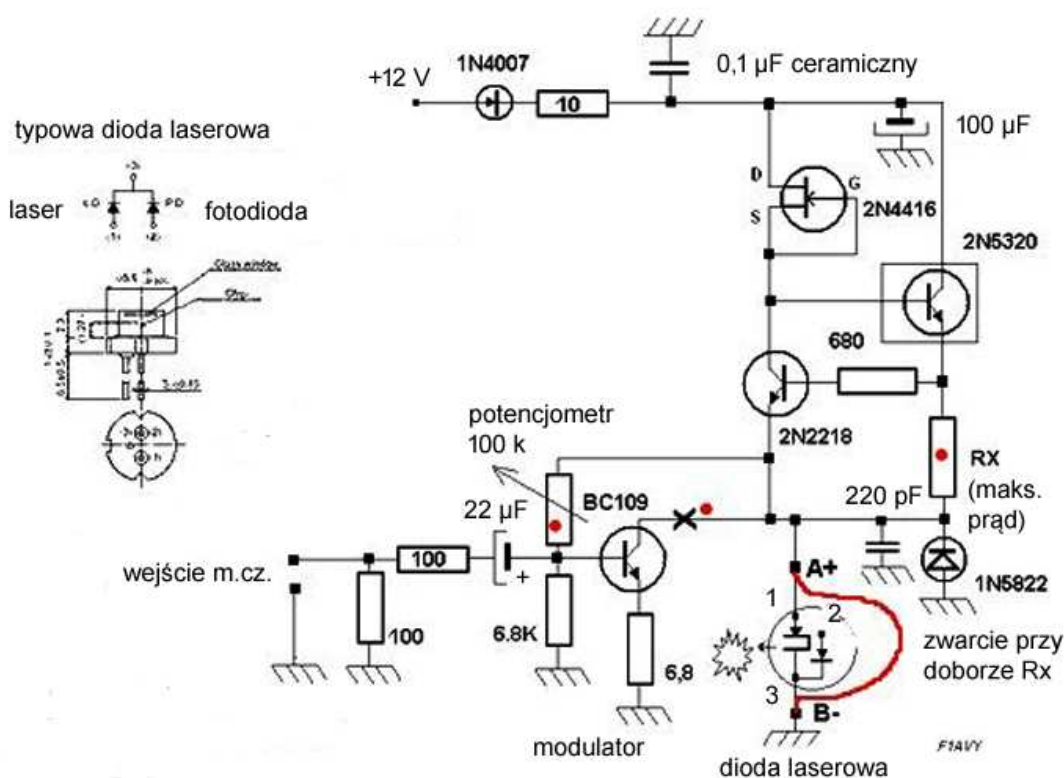
Fot. 2.2.4. Widok ogólny konstrukcji

Nadajnik i odbiornik toru powinny być umieszczone na dobrym, stabilnym statywie. Bardzo pomocna w znajdowaniu właściwego ustawienia jest lunetka umocowana na obudowie stacji nadawczo-odbiorczej. Rozwiązanie pochodzi z nr 5/2016 „CQDL”.

2.3. Prosty nadajnik F1AVY na diodzie laserowej

W nadajniku wykorzystano diodę pracującą na fali 780 nm w zakresie podczerwieni. Diody tego rodzaju są przystosowane do pracy ciągłej i są używane m.in. w drukarkach laserowych. Po przekroczeniu dopuszczalnego prądu lub temperatury ulegają one jednak zniszczeniu, dlatego też konieczne jest dokładne zapoznanie się z danymi katalogowymi. Dla utrzymania punktu pracy w dopuszczalnych granicach wiele typów jest wyposażonych w dodatkową fotodiodę przeznaczoną do pracy w układzie jego stabilizacji. Moce promieniowane przez diody leżą przeważnie w zakresie 1 – 5 mW. Dla łączności w trudnych warunkach (opadów atmosferycznych) lub na dalsze odległości konieczne są jednak większe moce nadajników.

Schemat z rys. 2.3.1 zawiera układy zabezpieczające laser przed zniszczeniem. Poprzez dobór opornika Rx układ źródła prądowego można łatwo dostosować do parametrów diod laserowych różnych typów. Należy dobrać jego wartość tak, aby przez diodę płynął prąd o wartości około 90 % dopuszczalnego maksimum. Przy oporności 20 Ω prąd maksymalny płynący przez diodę laserową jest ograniczony do około 55 mA. W układzie modulatora pracuje tranzystor BC109. Potencjometr w obwodzie polaryzacji bazy tranzystora należy ustawić tak, aby przy braku modulacji laser promieniował w przybliżeniu 50 % mocy maksymalnej. Do pomiaru mocy można użyć fotodiody BPW34 dostarczającej w przybliżeniu prądu 1 mA przy mocy promieniowania 5 mW (dane dla fali 650 nm).



Rys. 2.3.1. Schemat ideowy nadajnika. Opornik Rx jest dobierany po odłączeniu kolektora BC109 od reszty układu i przy zwarceniu diody laserowej, jak to zaznaczono na schemacie kolorem czerwonym (między punktami A i B). Potencjometr 100 k Ω jest ustawiany tak, aby uzyskać w przybliżeniu 50 % mocy lasera przy braku modulacji (należy usunąć przewód zwierający diodę laserową)

Uwaga:

Nawet przy mocach nie przekraczających 5 mW światło lasera może spowodować uszkodzenie oka. Nigdy nie należy kierować promienia lasera do oka, również promień odbity może być niebezpieczny.

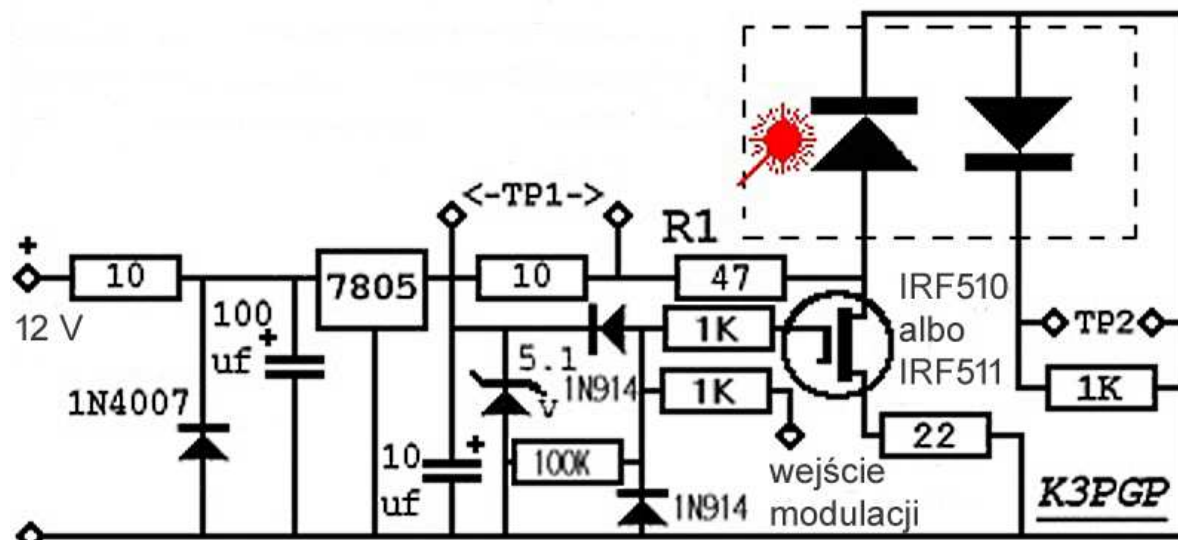
2.4. Nadajnik K3PGP na pojedynczej diodzie laserowej

W układzie sterowania diodą laserową opracowanym przez K3PGP punkt pomiarowy TP1 służy do pomiaru prądu płynącego przez laser, przy czym napięciu 1 V odpowiada prąd 100 mA, a punkt pomiarowy TP2 – do pomiaru prądu pomocniczej fotodiody, czyli pośrednio mocy promieniowanej przez laser. Napięcie 1 V odpowiada tutaj prądowi 1 mA. Rzeczywisty stosunek prądu fotodiody do mocy promieniowania jest zależny od typu diody laserowej. Pomiarów napięcia w obydwu punktach należy dokonywać za pomocą woltomierza bateryjnego aby uniknąć niepożądanego zwarcia punktu do masy.

Jako tranzystora modulującego konstruktor użył polowego tranzystora mocy IRF510 lub IRF511, co pozwala na korzystanie z diod laserowych o mocach od 5 do 500 mW. Tranzystory te zapewniają dobrą liniowość modulacji. Moc lasera można dodatkowo regulować przez podawanie dodatniego napięcia stałego na bramkę tranzystora. Dla modulacji amplitudy należy przy braku modulacji ustawić połowę mocy lasera opierając się na pomiarach prądu fotodiody. Ponieważ efekt laserowy występuje powyżej pewnej granicznej wartości prądu nie można ustawić po prostu połowy maksymalnego prądu lasera. Musiałaby to być w przybliżeniu połowa różnicy między wartością progową i maksymalną.

Układ jest zasilany napięciem 12 V i posiada wejście dla modulacji. Dioda 1N4007 służy do zabezpieczenia przed skutkami odwrotnego podłączenia napięcia zasilania. Prąd płynący przez diodę laserową jest ustalany za pomocą opornika R1. Dla diod o mocy 5 mW jego wartość leży przeważnie w granicach 39 – 47 Ω , a dla diod 30 mW wynosi 22 Ω . W trakcie uruchamiania układu zaleca się użycie na początek opornika o większej wartości i po dokonaniu pomiaru prądu odpowiednie zmniejszenie go. W trakcie uruchamiania powinno się podnosić powoli napięcie zasilania od zera do nominalnego obserwując w pierwszym punkcie pomiarowym prąd płynący przez diodę laserową.

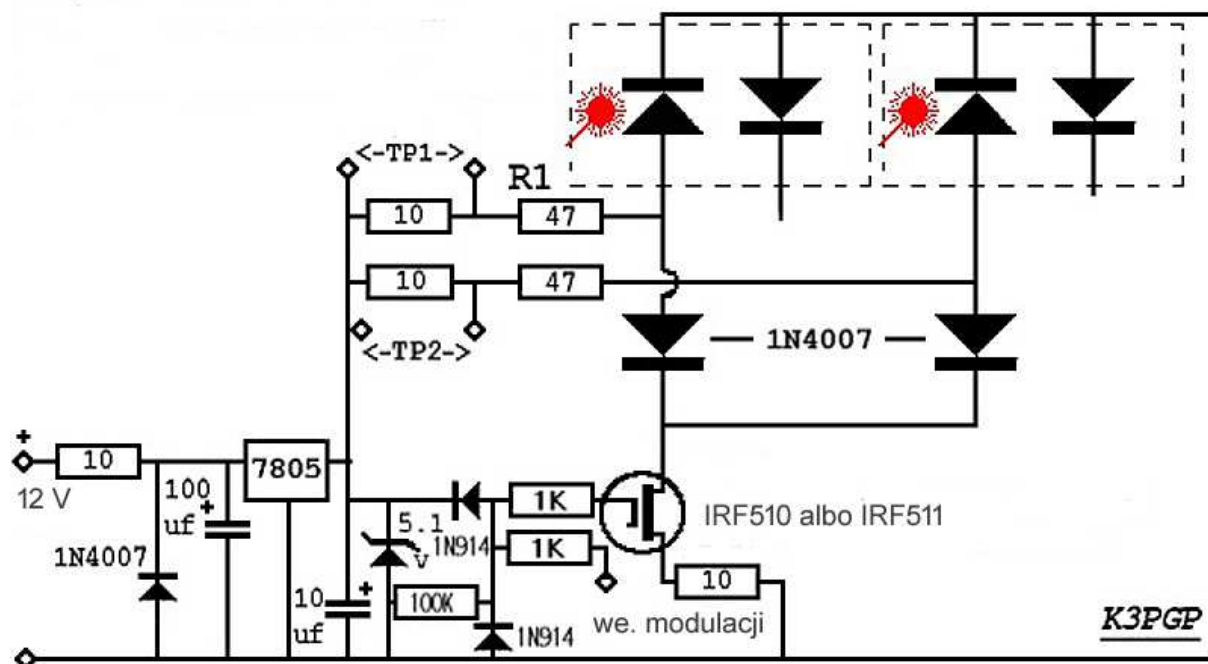
Dioda Zenera 5,1 V na wyjściu stabilizatora stanowi dodatkowe zabezpieczenie na wypadek jego uszkodzenia, a diody 1N914 wraz opornikami zabezpieczają laser na wypadek zwarcia bramki i drenu tranzystora. W układzie użyto oporników o mocy strat 0,5 W.



Rys. 2.4.1. Schemat ideowy

2.5. Nadajnik K3PGP na dwóch diodach laserowych

Ze względu na rozrzut parametrów niemożliwe jest bezpośrednie równoległe łączenie diod laserowych. Każda z nich powinna mieć własny układ ustalający płynący przez nią prąd. Nadajnik, zasadniczo identyczny jak poprzedni, posiada dwa punkty pomiarowe do kontroli prądu płynącego przez każdą z diod. 1 V napięcia w każdym z nich odpowiada 100 mA prądu diody laserowej. Większy sumaryczny prąd diod laserowych wymaga zmniejszenia wartości opornika w źródle tranzystora modulującego (z $22\ \Omega$ do $10\ \Omega$). Układ można też uzupełnić o dwa punkty pomiaru mocy promieniowanej jak w rozwiązaniu poprzednim. W układzie użyto oporników o mocy strat 0,5 W.



Rys. 2.5.1. Schemat ideowy nadajnika na dwóch diodach laserowych. Oporniki R1 ustalają prądy diod. Diody pomiarowe można wykorzystać identycznie jak w rozwiązaniu poprzednim

3. Nadajniki z modulowaną podnośną

Użycie modulowanej podnośnej pozwala na łatwiejsze ograniczenie wylwu zakłóceń powodowanych przez inne źródła światła i na korzystanie z dowolnych rodzajów modulacji: FM, cyfrowych, impulsowych itp. Jednocześnie pasmo zajmowane przez modulowaną podnośną jest szersze od sygnału modulującego (sygnału w paśmie podstawowym). Oznacza to zmniejszenie czułości toru transmisyjnego zależne od rodzaju modulacji i stosunku szerokości pasm obu sygnałów.

Modulacja podnośnej stawia też wyższe wymagania odnośnie częstotliwości granicznej fotodetektorów, a dodatkowo sygnały takie są bardziej wrażliwe na niekorzystne zjawiska występujące na trasie transmisji.

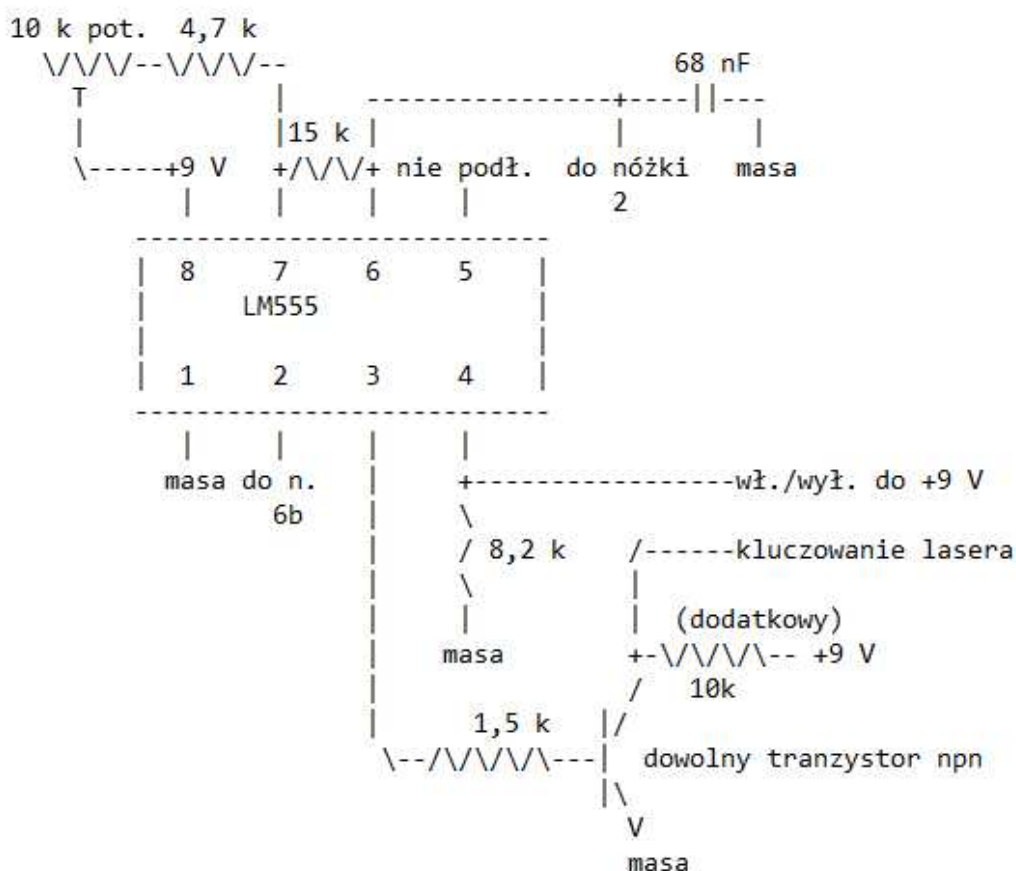
Praktycznym rozwiązaniem okazuje się zastosowanie układów przełączanych pozwalających na korzystanie z modulowanej podnośnej po przekroczeniu pewnego poziomu przez sygnał odbierany.

3.1. Telegraficzna stacja nadawczo-odbiorcza WB9AJZ

W nadajniku można użyć dowolnego wskaźnika laserowego o mocy 1 – 5 mW. Konstruktor użył wskaźnika pracującego na fali 670 nm. Wskaźnik jest kluczowany podnośną akustyczną 800 Hz generowaną przez multiwibrator LM555. Wewnątrz obudowy wskaźnika należy zidentyfikować wyprowadzenia wyłącznika, masę połączyć z masą układu kluczującego a zasilanie z wyjściem kluczującym. Po skierowaniu wskaźnika na sufit można przy jego szybkim poruszaniu zaobserwować na suficie linie kropkowe odpowiadające częstotliwości podnośnej akustycznej.

Spis elementów nadajnika:

LM555, dowolny tranzystor krzemowy npn, oporniki 4,7 k Ω , 10 k Ω , 15 k Ω , potencjometr montażowy 10 k Ω , 8,2 k Ω dobierany, kondensator 68 nF, klips do baterii 9 V, bateria 9 V, gniazdko, wtyczki, uniwersalna płytka drukowana.

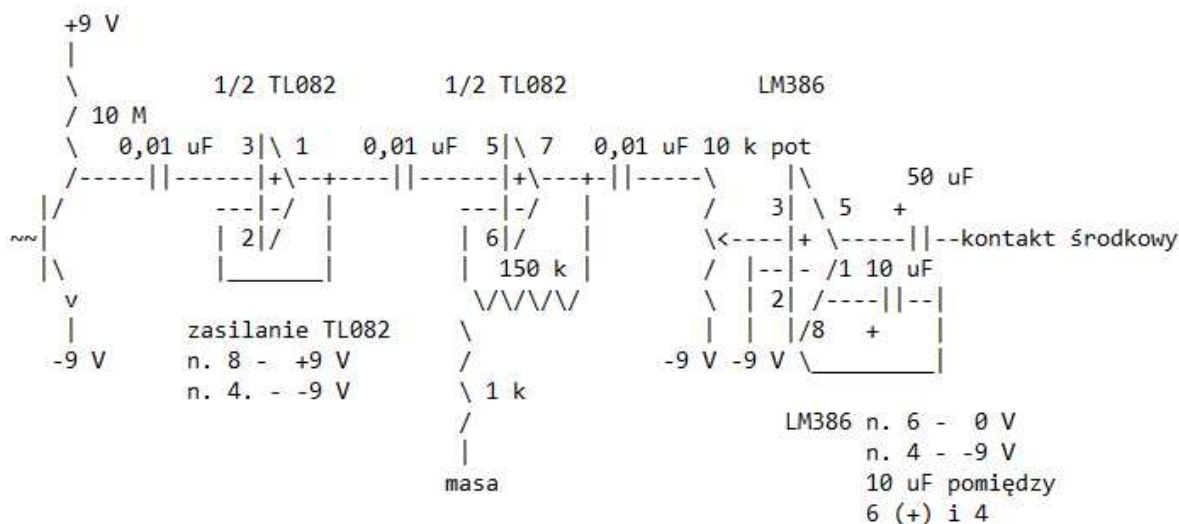


Rys. 3.1.1. Układ kluczowania wskaźnika laserowego

Odbiornik zawiera fototranzystor, dwa stopnie wzmocnienia na wzmacniaczach operacyjnych TL082 i popularny wzmacniacz mocy m.cz. LM386.

Spis elementów:

Wzmacniacz operacyjny TL082, wzmacniacz głośnikowy LM386, fototranzystor dowolnego typu, oporniki 1 k Ω , 150 k Ω , 10 M Ω , potencjometr logarytmiczny siły głosu 10 k Ω , kondensatory 3 x 0,01 μ F, 2 x 10 μ F, 50 μ F, gniazdka, wtyczki, klipsy do baterii 9 V, uniwersalna płytko drukowana. Zmiana czułości odbiornika następuje przez dobór opornika w kolektorze fototranzystora.



Rys. 3.1.2. Schemat ideowy odbiornika telegraficznego

Odbiornik i nadajnik powinny być zamontowane w metalowych obudowach ekranujących i umieszczone na statywie fotograficznym lub dowolnym innym. Dla zwiększenia zasięgu fototranzystor odbiorczy można umieścić w reflektorze od latarki lub użyć soczewki. Wskaźnik laserowy warto też umieścić w rurce osłaniającej.

3.2. Nadajnik foniczny z podnośną modulowaną częstotliwościowo

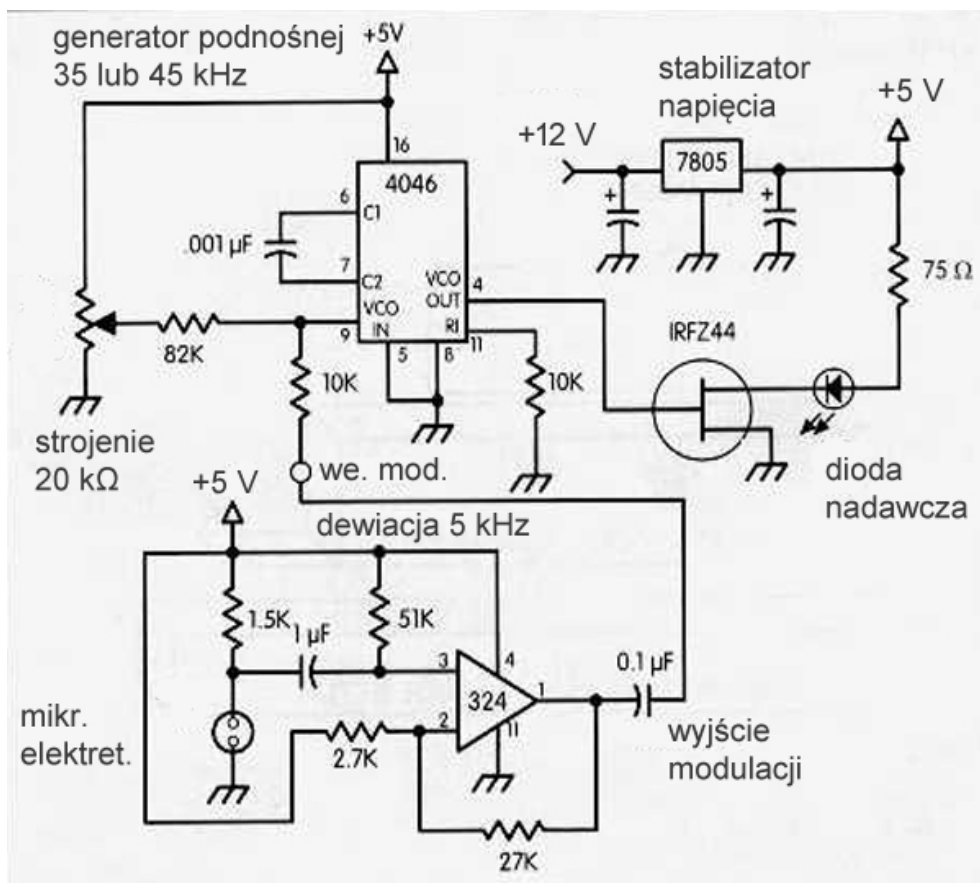
W nadajniku zastosowano generator podnośnej na obwodzie scalonym 4046. Dla uniknięcia wzajemnych zakłóceń przy pracy duplexowej jedna ze stacji nadaje na podnośnej 35 kHz, a druga – 45 kHz. Jako dioda nadawcza służy czerwona dioda elektroluminescencyjna o jasności 5000 mcd przy 20 mA lub o podobnych parametrach. Opornik 75 Ω należy dobrać dla uzyskania pożądanego prądu diody (zależnie od jej typu i jasności).

Zamiast konstrukcji odbiornika na wybraną częstotliwość podnośnej konstruktor zastosował mieszacz SBL-1 z heterodyną kwarcową tak, aby uzyskać przemianę na częstotliwość leżącą w amatorskim paśmie 2 m. Dalszą część toru odbiorczego stanowi ręczna radiostacja na to pasmo. Jako heterodynę najwygodniej wykorzystać generator kwarcowy typu komputerowego, przy czym do przemiany można wykorzystać jej drugą harmoniczną.

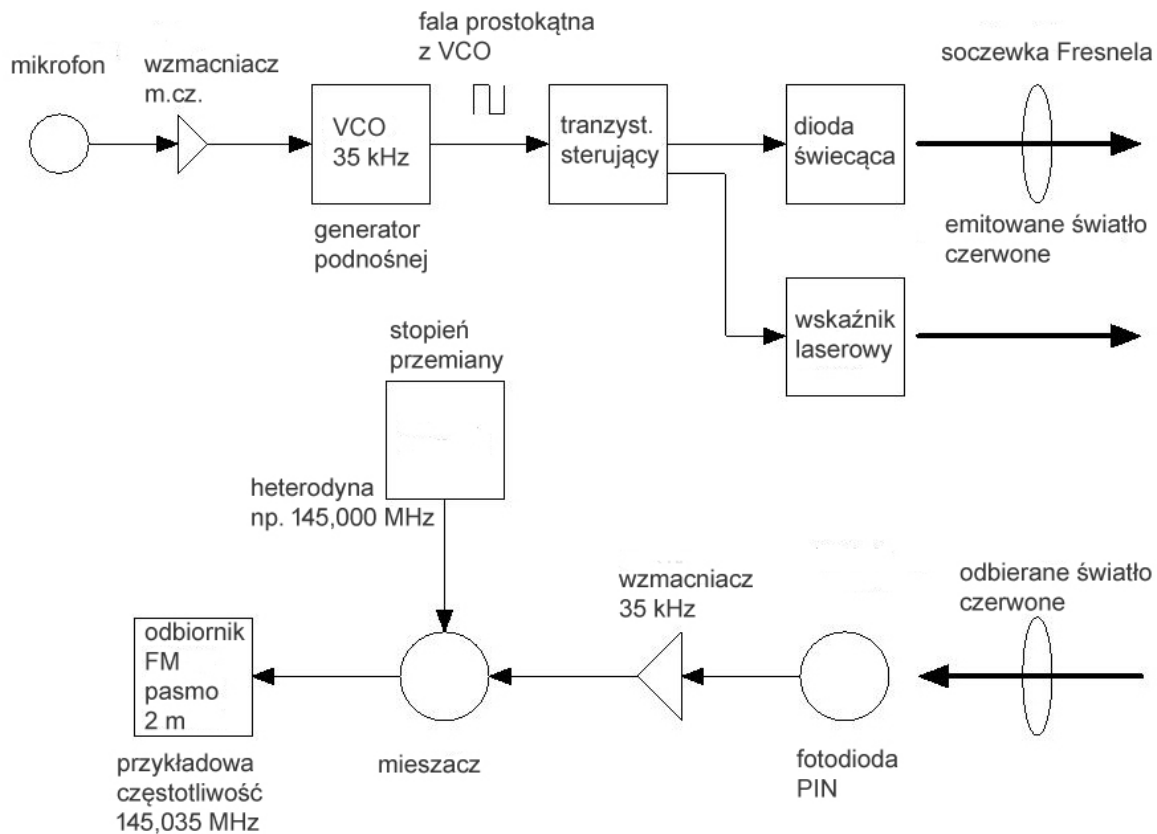
Ze względu na wykorzystanie amatorskiej radiostacji FM dewiacja wynosi 5 kHz. Widoczny na schemacie blokowym wskaźnik laserowy może zastępować diodę elektroluminescencyjną, albo też może być wykorzystany tylko w trakcie nakierowywania stacji na siebie.

Dioda nadawcza została umieszczona w plastikowej rurce osłaniającej, na końcu której zamontowano soczewkę Fresnela. Również fotodiodę odbiorczą należy umieścić w takiej osłonie zakończonej taką samą soczewką.

Rozwiązanie pochodzi z numerów miesięcznika „73 Amateur Radio Today” z czerwca i lipca 2000 r.



Rys. 3.2.1. Schemat ideowy nadajnika z podnośną modulowaną częstotliwością



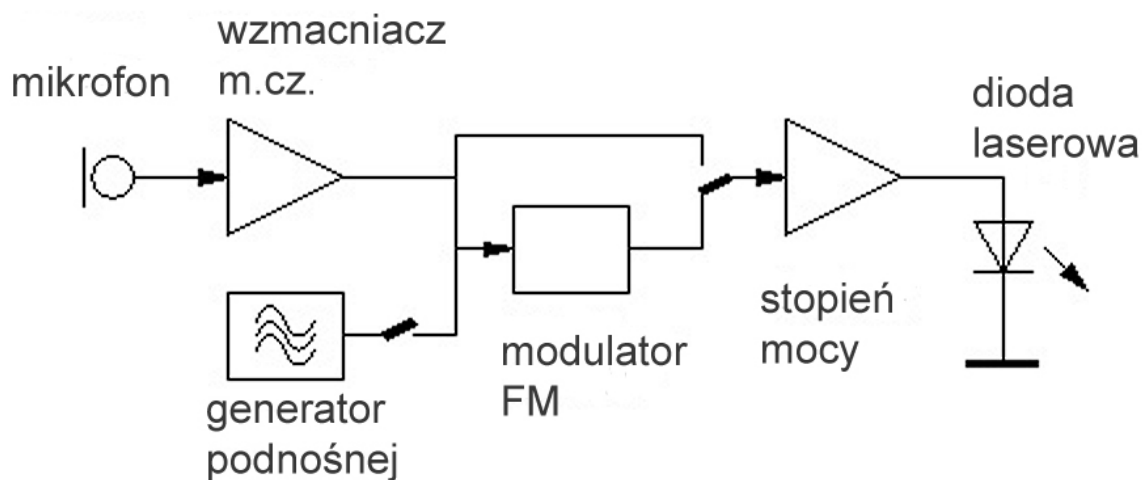
Rys. 3.2.2. Schemat blokowy stacji



Fot. 3.2.3. Przykład konstrukcji mechanicznej stacji nadawczo-odbiorczej

3.3. Nadajnik foniczny z dwoma rodzajami modulacji

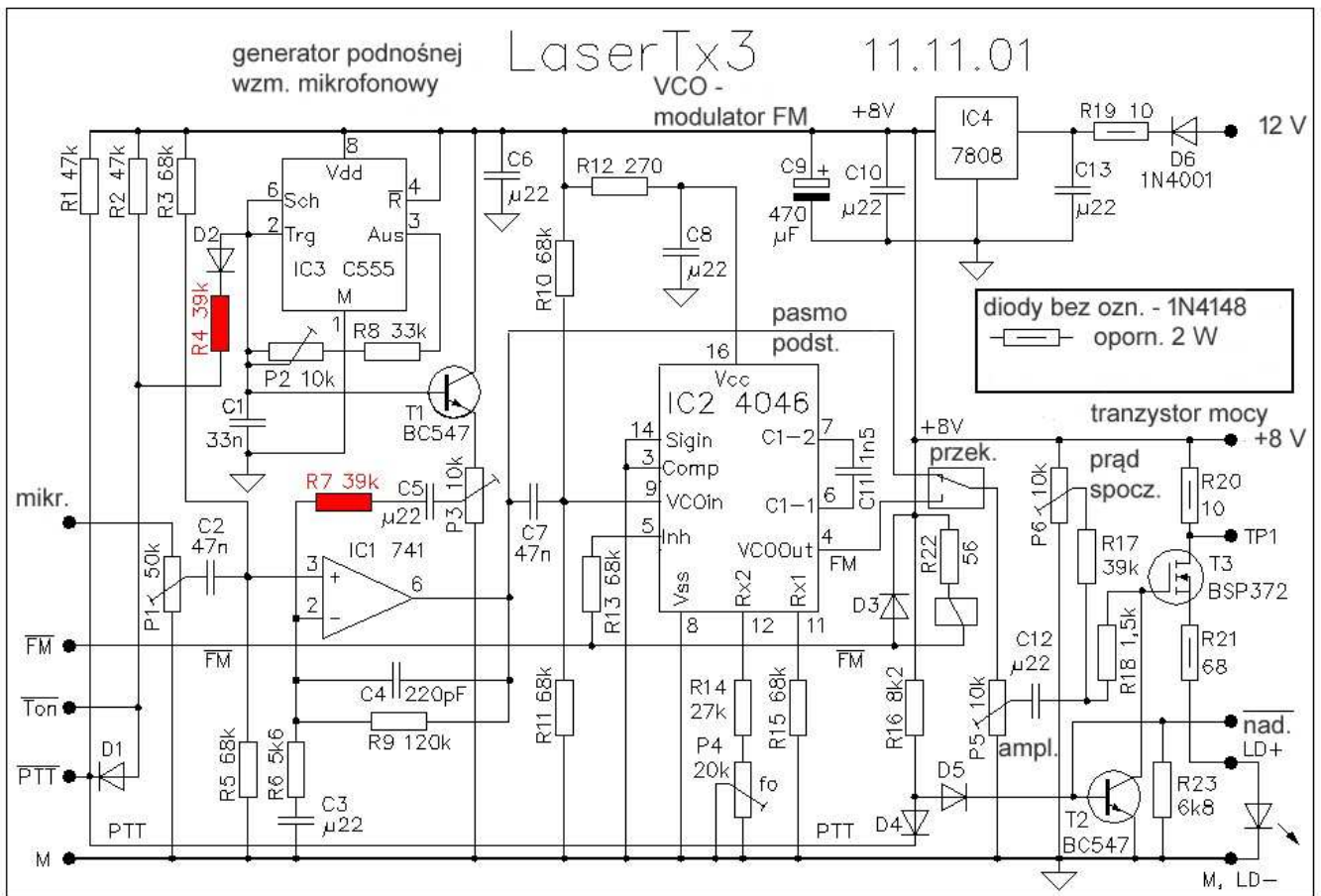
Nadajnik opracowany przez DL2CH posiada możliwość przełączania z bezpośredniej modulacji jasności (amplitudy) na transmisję podnośnej modulowanej częstotliwościowo. Generator podnośnej 500 – 650 Hz służy do prób i łączności telegraficznych.



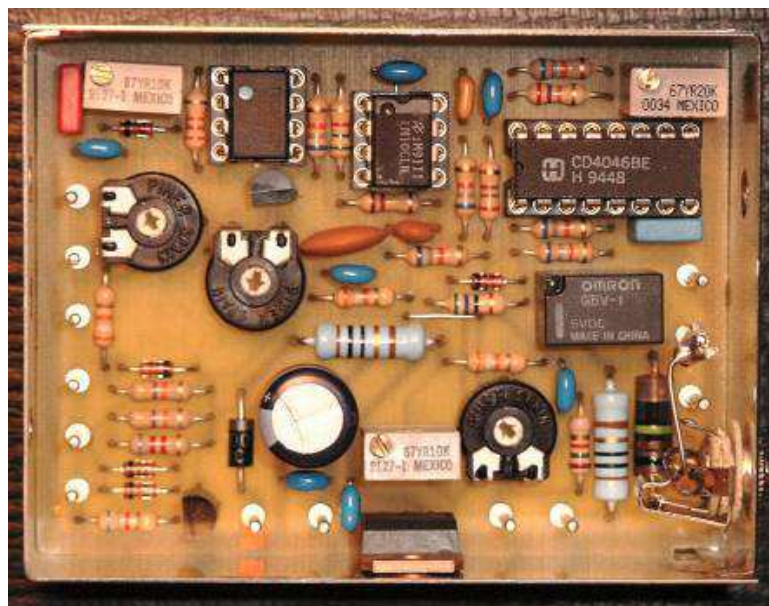
Rys. 3.3.1. Schemat blokowy nadajnika

Sygnal m.cz. z mikrofonu jest wzmacniany przez wzmacniacz operacyjny LM741, a do regulacji poziomu modulacji służy potencjometr P1. Częstotliwość podnośnej pochodzącej z generatora na LM555 jest przestrajana za pomocą potencjometru P2, a jej poziom – za pomocą P3. Potencjometr P4 służy do przestrajania generatora modulowanego częstotliwościowo. Sygnal modulujący jest podawany na wejście VCO scalonej pętli synchronizacji fazy typu 4046. Przełączenia rodzaju emisji dokonuje się za pomocą przekaźnika. Do regulacji głębokości modulacji diody laserowej służy potencjometr P5, a do ustawienia prądu spoczynkowego diody – P6. Oporniki R20 i R21 ograniczają maksymalny prąd lasera. W punkcie pomiarowym TP1 mierzony jest spadek napięcia proporcjonalny do prądu płynącego przez diodę laserową, której katoda jest połączona z masą. Przełączenie na nadawanie powoduje wytlumienie

tonu pomocniczej podnośnej. Na czerwono zaznaczono oporniki zmienione w stosunku do (nie opublikowanej tutaj) wersji poprzedniej.



Rys. 3.3.2. Schemat ideowy



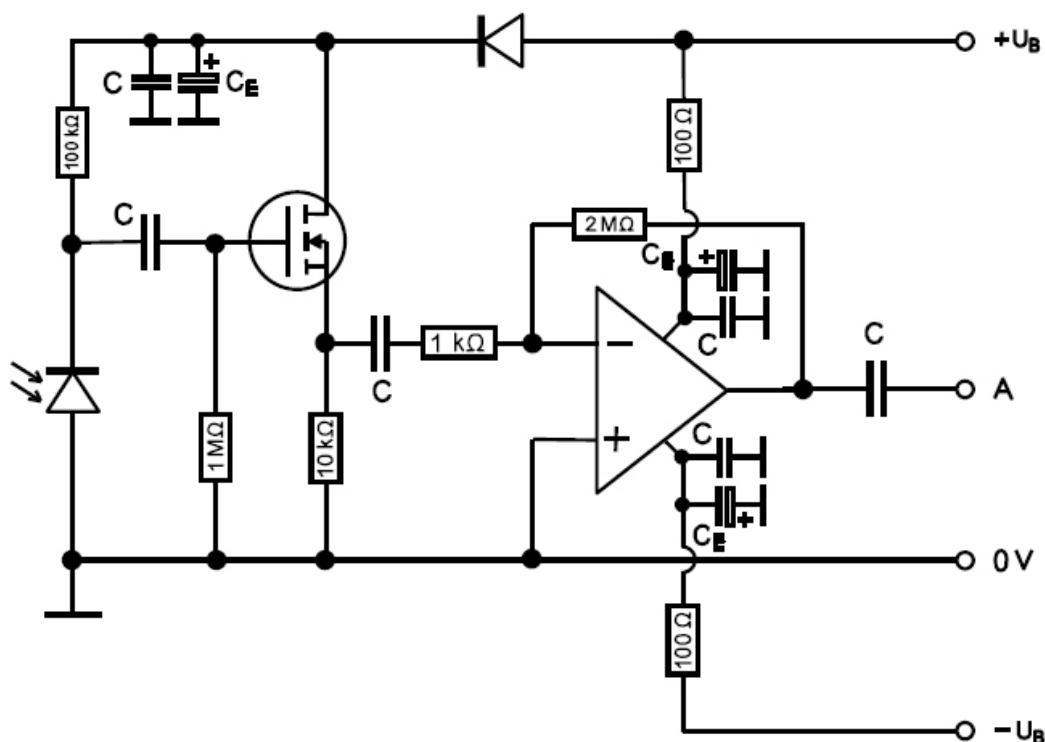
Fot. 3.3.3. Widok płytki

4. Odbiorniki systemów z bezpośrednią modulacją jasności

W odbiornikach najczęściej stosowane są popularne typy fotodiod krzemowych PIN o maksimum czułości leżącym w zakresie czerwieni. Są one stosunkowo niedrogie i charakteryzują się dobrą czułością przy niskich szumach własnych. Najczęściej też stosowane są soczewki Fresnela. Wymiary obszaru światłoczułego fotodiody powinny być możliwie jak najbardziej zbliżone do plamki świetlnej dawanej przez soczewkę w jej ognisku. Przy większych wymiarach elementu światłoczułego wykorzystana jest tylko część powierzchni, a jej pozostała część stanowi jedynie źródło dodatkowych szumów. W przypadku zbyt małych wymiarów wykorzystana jest tylko część strumienia świetlnego, co również odbija się ujemnie na czułości odbiornika. Stosunek sygnału do szumu można poprawić w pewnym stopniu przez dodanie filtra optycznego przepuszczającego tylko światło o kolorze odpowiadającym nadawanemu i eliminującego resztę składowych widmowych światła dziennego.

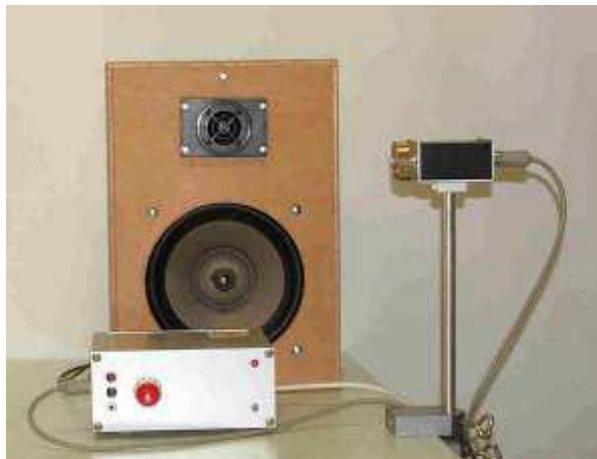
Częstotliwość graniczna fotodetektorów jest ograniczona głównie wpływem stosunkowo znacznej pojemności własnej złącza p-n. Dla jej zmniejszenia stosowana jest polaryzacja wsteczna diody, która powoduje wzrost grubości złącza. Jako wzmacniacze bardzo często stosowane są układy przetworników prąd-napięcie oparte o wzmacniacze operacyjne. Innym rozpowszechnionym rozwiązaniem są wzmacniacze o dużej impedancji wejściowej na tranzystorach polowych. Każde z tych rozwiązań korzysta z innego rodzaju pracy diody (obszaru charakterystyk).

4.1. Dwustopniowy odbiornik z fotodiody

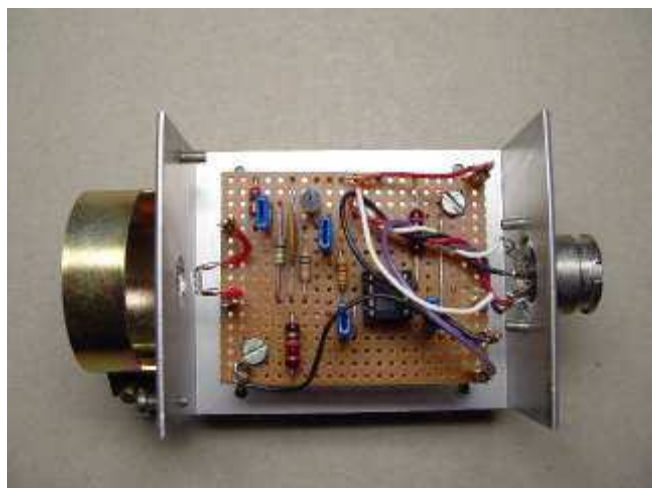


Rys. 4.1.1. Schemat ideowy części odbiorczej do nadajnika z punktu 2.1

Na ilustracji 4.1.1. przedstawiono schemat ideowy części odbiorczej do modemu świetlnego zawierającego nadajnik z punktu 2.1. Zastosowano w nim popularną fotodiody BPW34, w pierwszym stopniu wzmacniacza tranzystor polowy BF245, a w następnym wzmacniacz operacyjny LM741. Kondensatory C mają pojemności 100 nF, a CE – 100 μ F. Dioda 1N1448 zabezpiecza układ przed uszkodzeniem w przypadku odwrotnego podłączenia napięcia zasilania. Symetryczne napięcie zasilania nie może przekroczyć ± 18 V. Najwygodniej, aby napięcie dodatnie było równe napięciu zasilania nadajnika.



Fot. 4.1.2. Odbiornik świetlny połączony z kolumną głośnikową



Fot. 4.1.3. Płytki odbiornika w obudowie. Po lewej stronie widoczna fotodioda z soczewką

4.2. Odbiornik DJ9TU

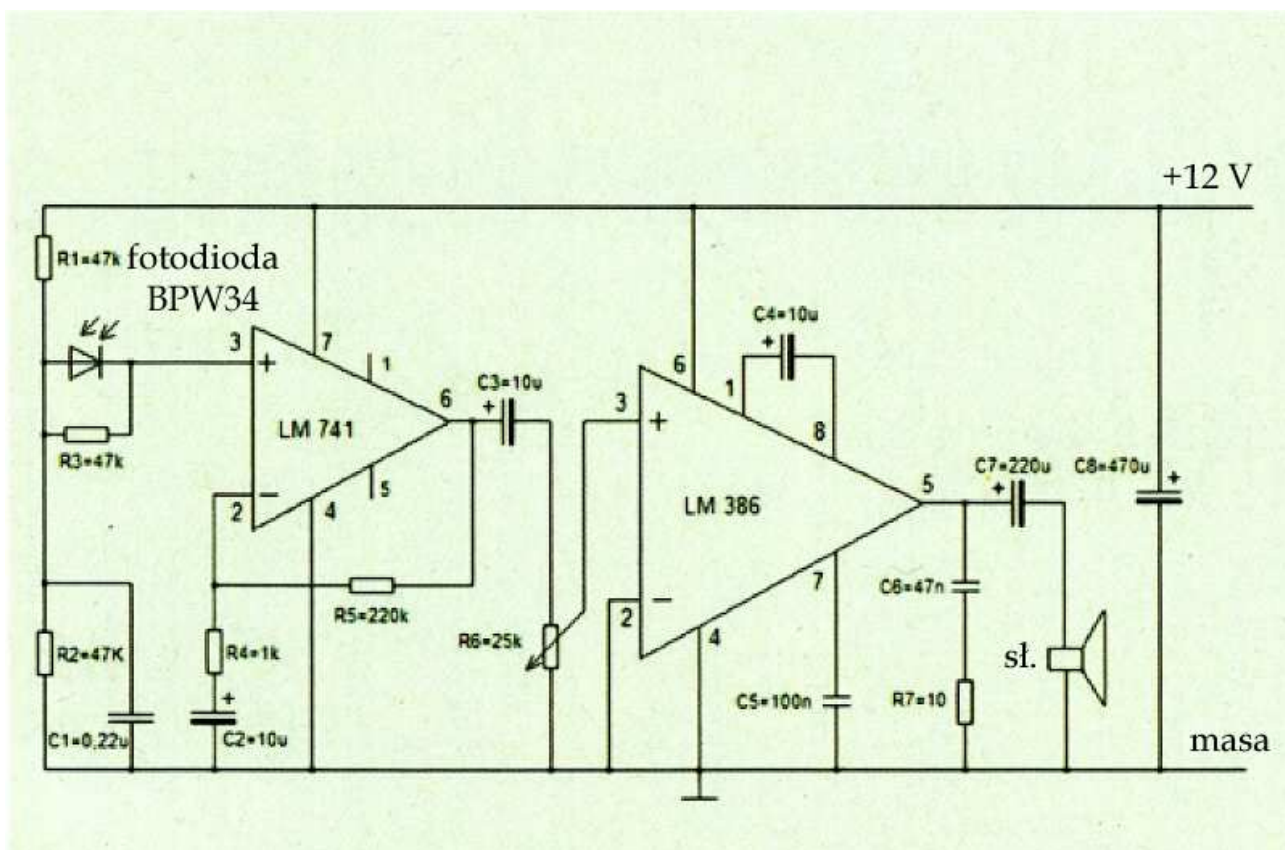
W odbiorniku DJ9TU zastosowano szklaną soczewkę o zdolności skupiającej 8 dioptrii¹, średnicy 125 mm skupiającą strumień światła na fotodiodzie BPW34. Sygnał elektryczny z fotodiody wymaga wzmocnienia przynajmniej 40000-krotnego (ok. 92 dB) dla uzyskania dobrej czułości odbiornika. W układzie zastosowano scalony wzmacniacz operacyjny LM741 sterujący wzmacniaczem mocy m.cz. LM386, co umożliwia odbiór na głośnik. Przy transmisji duplexowej praktyczniejsze jest jednak użycie słuchawek. Czułość tak skonstruowanego układu pozwala na odbiór sygnałów świetlnych dających napięcie 2 μV na wyjściu fotodiody.

Uzyskanie wzmocnień rzędu 2000000 (126 dB) i odpowiednio większej czułości wymaga zastosowania wzmacniaczy niskoszumnych i starannej konstrukcji odbiornika, zapobiegającej jego wzbudzeniu. Odbiornik powinien znajdować się wówczas w metalowej obudowie ekranującej, a źródło zasilania musi być dobrze zablokowane.

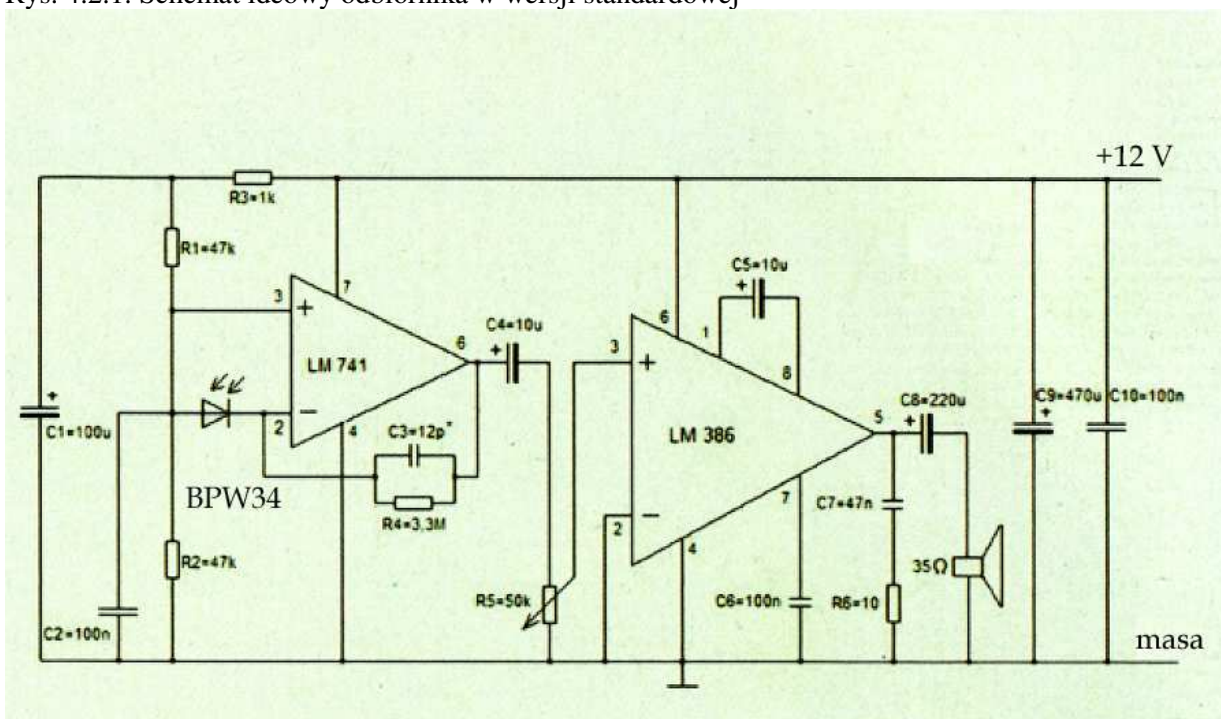
Na schemacie 4.2.1 przedstawiona jest standardowa wersja odbiornika, a na schemacie 4.2.2 – układ z przetwornikiem prądowo-napięciowym. Większa czułość tego układu powoduje jednak zwiększenie niebezpieczeństwa przesterowania przez światło pochodzące z innych źródeł, np. światło dzienne. Układ ten natomiast dobrze nadaje się do stosowania w nocy.

¹ Dioptria jest jednostką zdolności skupiającej układu optycznego. Wartości ujemne oznaczają soczewki rozpraszające, a dodatnie – skupiające. Dioptria nie jest jednostką pochodną układu SI – jest więc jednostką pozaukładową. Nie używa się żadnego skrótu jej nazwy. Wymiarem dioptrii jest odwrotność metra – 1/m.

Spis elementów: C1 – 0,22 μ F, C2, C3, C4 – 10 μ F, C5 – 100 nF, C6 – 47 nF, C7 – 220 μ F, C8 – 470 μ F, R1, R2, R3 – 47 k Ω , R4 – 1 k Ω , R5 – 220 k Ω , R6 – potencjometr logarytmiczny 25 k Ω , R7 – 10 Ω , LM741, LM386, fotodioda BPW34.



Rys. 4.2.1. Schemat ideowy odbiornika w wersji standardowej



Rys. 4.2.2. Schemat ideowy odbiornika o podwyższonej czułości z przetwornikiem prąd-napięcie

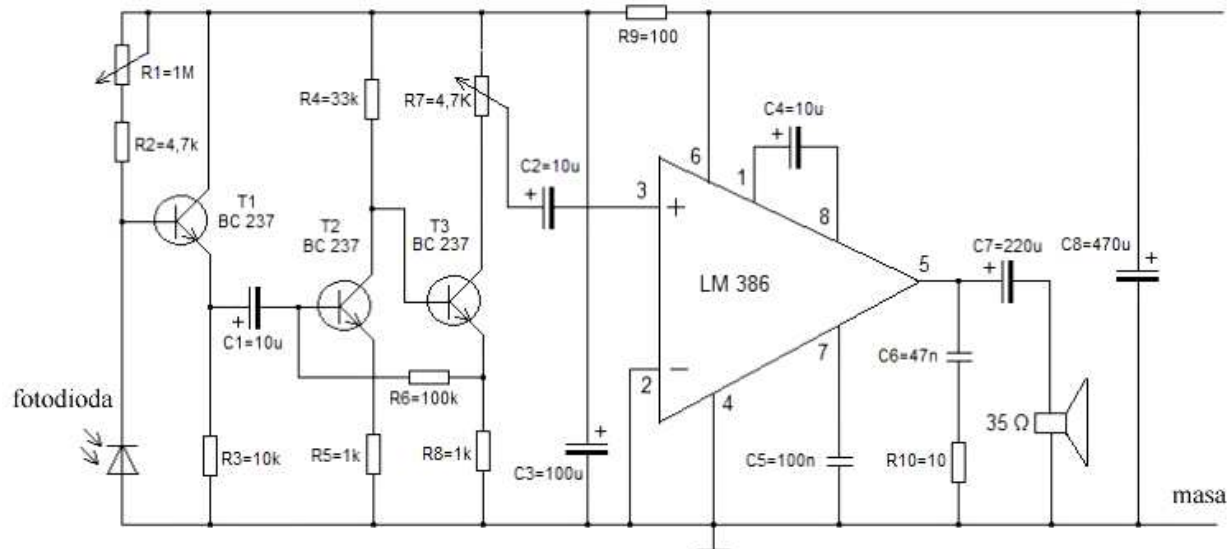
Spis elementów: C1 – 100 μ F, C2, C6, C10 – 100 nF, C3 – 12 pF, C4, C5 – 10 μ F, C7 – 47 nF, C8 – 220 μ F, C9 – 470 μ F, R1, R2 – 47 k Ω , R3 – 1k Ω , R4 – 3,3 M Ω , R5 – potencjometr logarymiczny 50 k Ω , R6 – 10 Ω , LM741, LM386, fotodioda BPW34, słuchawki 35 Ω .

R1, R2 polaryzacja fotodiody

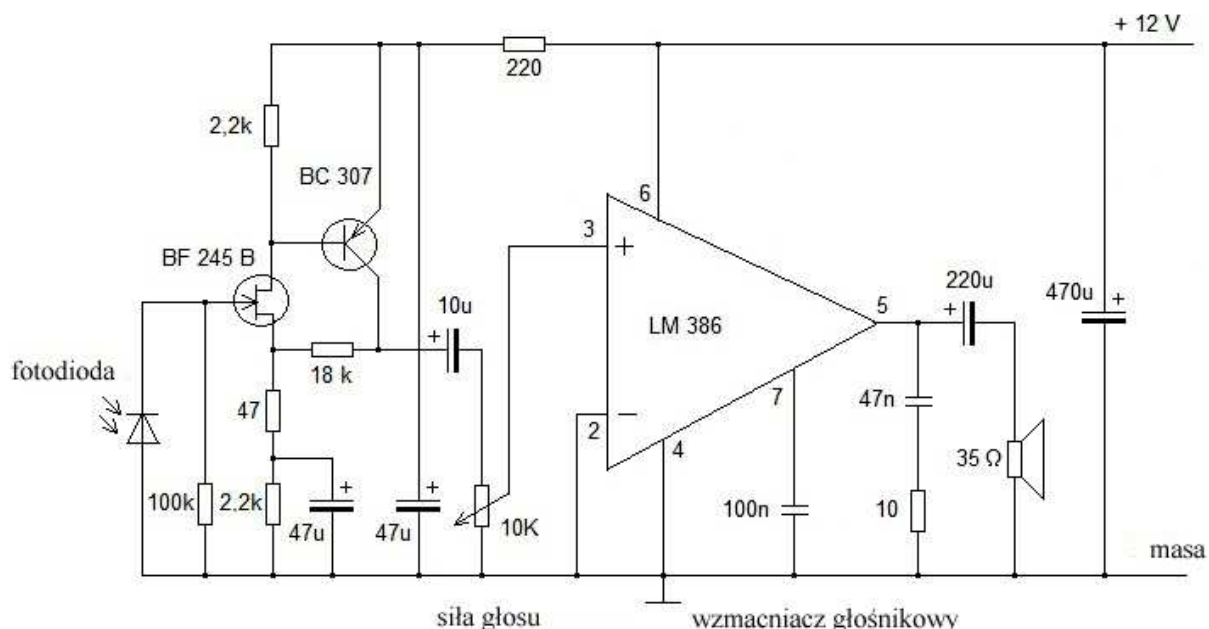
(regulacja R1 na maksimum sygnału) siła głosu

wzmacniacz głośnikowy

+12 V



Rys. 4.2.3. Schemat ideowy odbiornika ze wzmacniaczem tranzystorowym na wejściu



Rys. 4.2.4. Wariant odbiornika z tranzystorem polowym w pierwszym stopniu. Całkowite wzmocnienie toru wynosi 40000, a czułość 2 μ V

W odbiorniku z rys. 4.2.3 tranzystor T1 w układzie wtórnika emiterowego zapewnia dopasowanie fotodiody do wzmacniacza pracującego na tranzystorach T2 i T3 dającego wzmocnienie 41 dB (120-

krotne). Logarytmiczny potencjometr R7 służy do regulacji siły głosu. Wzmocnienie LM386 wynosi 46 dB (200-krotne). Całkowite wzmocnienie wynosi więc 2400 i zapewnia dobry odbiór sygnałów 5 μ V. Polaryzację i zarazem obciążenie fotodiody dobiera się potencjometrem R1 na maksimum sygnału.

Spis elementów:

Oporniki R2 – 4,7 k Ω , R3 – 10 k Ω , R4 – 33 k Ω , R5, R8 – 1k Ω , R6 – 100 k Ω , R9 – 100 Ω , R10 – 10 Ω , potencjometry R1 – 1 M Ω , R7 – 4,7 k Ω potencjometr logarytmiczny, C1, C2, C4 – 10 μ F elektrolityczne, C3 – 100 μ F elektrolityczny, C5 – 100 nF, C6 – 47 nF, C7 – 220 μ F elektrolityczny, C8 – 470 μ F elektrolityczny, tranzystory T1, T2, T3 – BC237, LM386, głośnik 35 Ω .

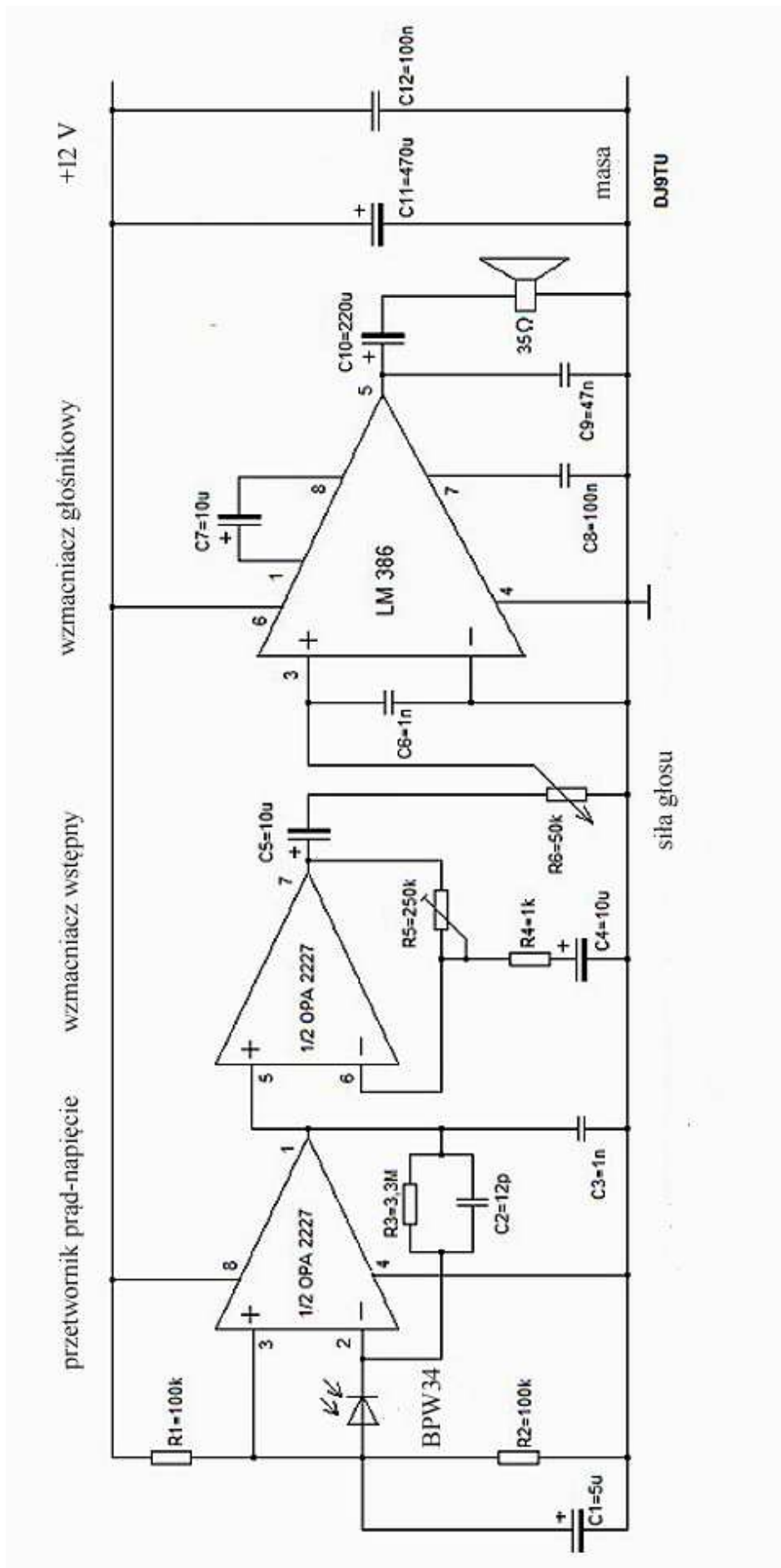
Zmniejszenie oporności R3 w odbiornikach z rys. 4.2.5 i 4.2.6. z 3,3 M Ω na około 100 k Ω powoduje wprawdzie zmniejszenie wzmocnienia przetworników, ale wzrasta jednocześnie odporność na zewnętrzne oświetlenie. Z wartością tą można zresztą eksperymentować.

Przetworniki prąd-napięcie są wzmacniaczami dostarczającymi na wyjściu napięcia proporcjonalnego do wpływającego na wejście prądu.

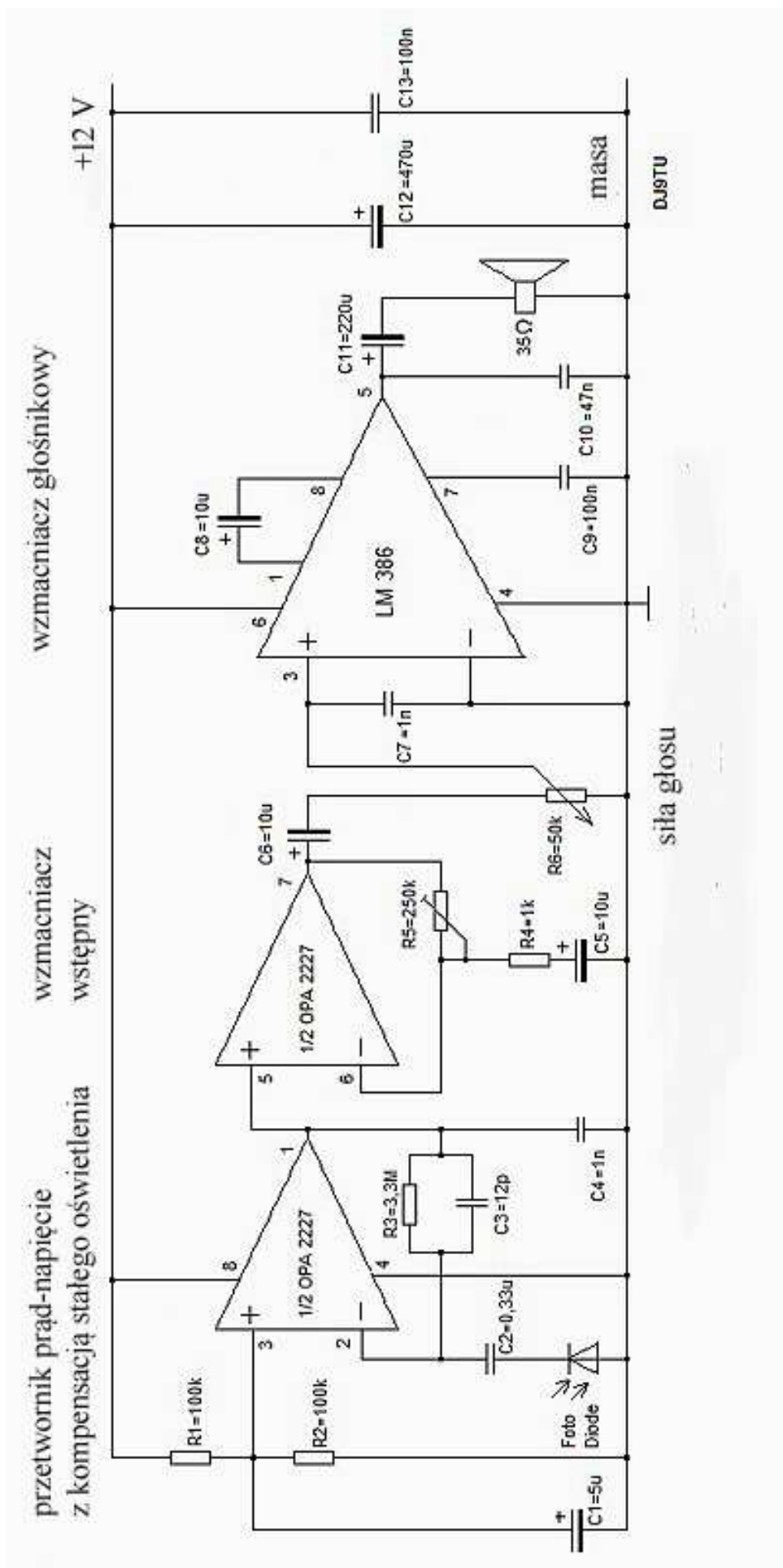
$U_{wy} = I_{we} \times R$, gdzie R jest opornością w gałęzi sprzężenia zwrotnego.

Dostarczany przez fotodiode prąd I_{we} jest z kolei proporcjonalny do jej oświetlenia, a więc wypadkowo otrzymuje się napięcie wyjściowe proporcjonalne do oświetlenia diody. Kondensator włączony równolegle do opornika zapobiega ewentualnym zniekształceniom sygnału wyjściowego. Jego pojemność powinna być dobrana eksperymentalnie w zależności od typu wzmacniacza operacyjnego.

W układzie z rys. 4.2.6 potencjometr montażowy R5 służy do regulacji wzmocnienia wzmacniacza wstępnego.

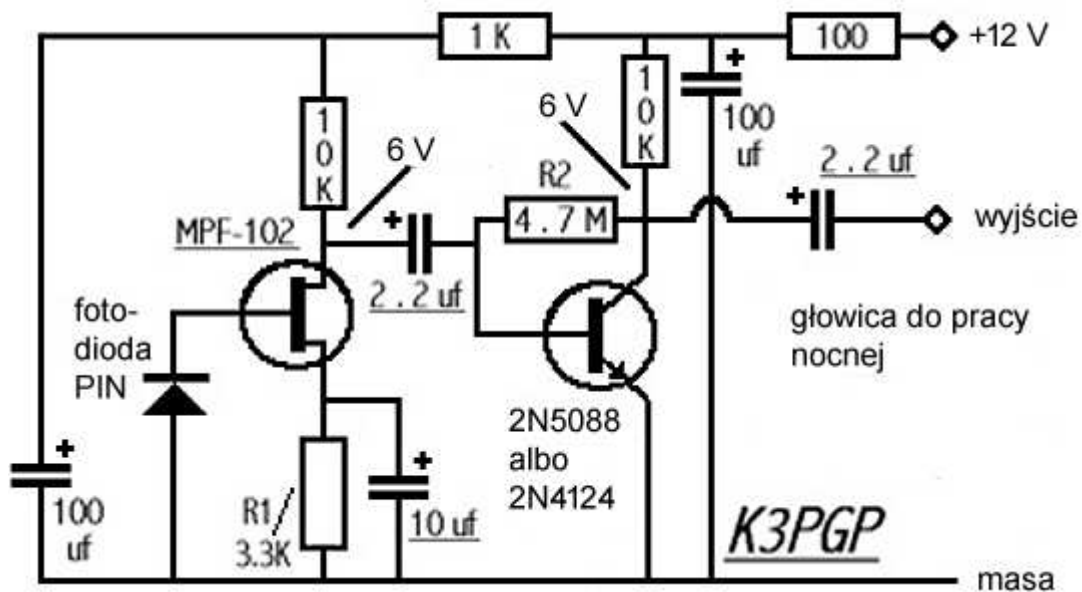


Rys. 4.2.5. Odbiornik z przetwornikiem prąd-napięcie i dodatkowym wzmacniaczem

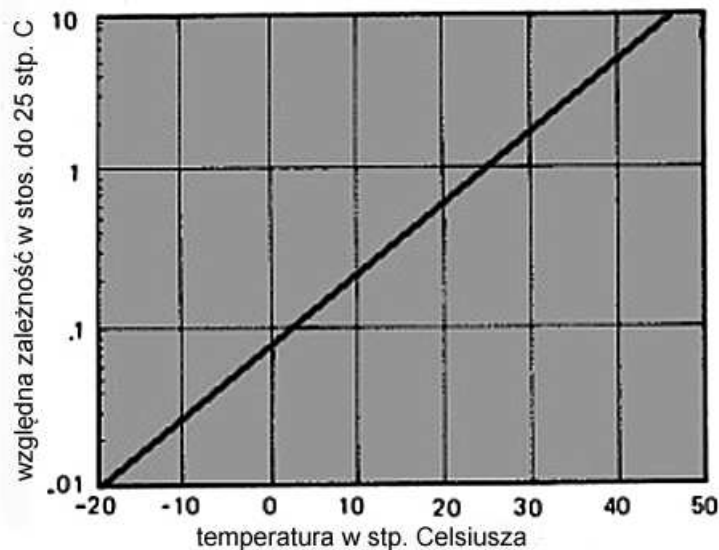


Rys. 4.2.6. Odbiornik z przetwornikiem prąd-napięcie i kompensacją stałego oświetlenia

4.3. Głowica odbiorcza do pracy nocnej

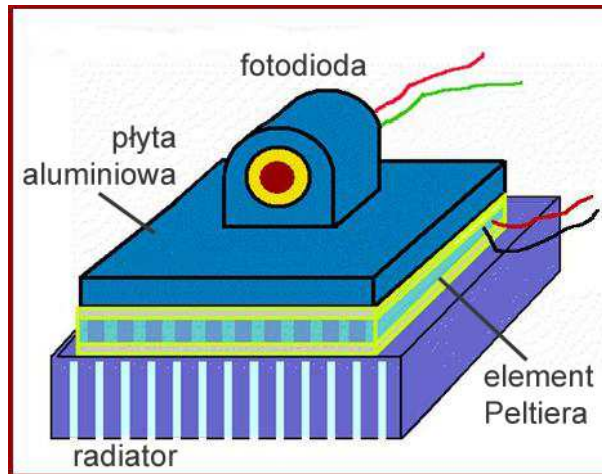


Rys. 4.3.1. Schemat ideowy



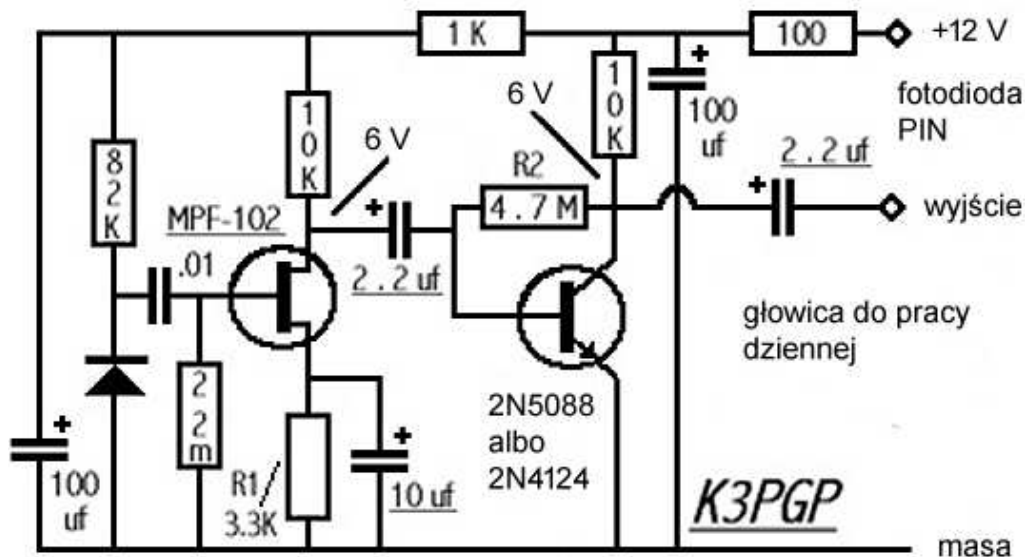
Rys. 4.3.2. Orientacyjna względna zależność prądu ciemnego fotodiody w zależności od temperatury w odniesieniu do temperatury 25 °C

W układzie czulej głowicy przeznaczonej do pracy nocnej jedynie oporniki R1 i R2 mogą wymagać doboru w wąskich granicach dla uzyskania napięcia 6 V w dwóch uwidocznionych punktach układu. W praktyce napięcia te mogą leżeć w granicach 5 – 7 V. Oporność R1 może leżeć w granicach 2,7 – 3,9 k Ω , a R2 – w granicach 2,2 – 5,6 M Ω . W obwodzie bramki MPF-102 nie występuje opornik polaryzujący. Dla obniżenia poziomu szumów można chłodzić albo samą fotodiode albo całość włącznie ze stopniami wzmacniacza. Korzystając z elementu Peltiera można uzyskać nawet temperatury poniżej zera. Ujemną stroną intensywnego chłodzenia jest kondensacja pary wodnej na chłodzonym elemencie. Ze względu na znaczną czułość układ powinien być zamontowany w metalowej obudowie ekranującej. W następnym stopniu wzmacniacza w obydwu rozwiązaniach można zastosować niskoszumny wzmacniacz operacyjny TL071 albo inny o podobnych lub lepszych parametrach i dopiero na jego wyjściu opłaca się włączyć ewentualne filtry ograniczające szerokość przenoszonego pasma.



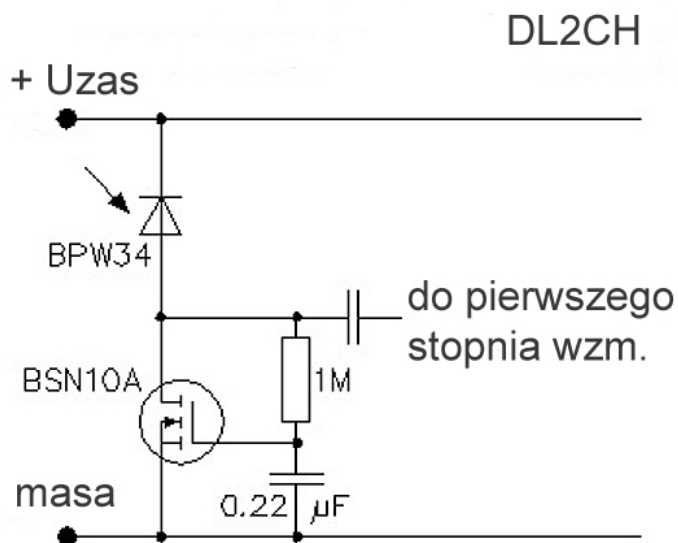
Fot. 4.3.3. Chłodzenie fotodiody. Na płycie metalowej można umieścić również wzmacniacz

4.4. Głowica odbiorcza do pracy dziennej



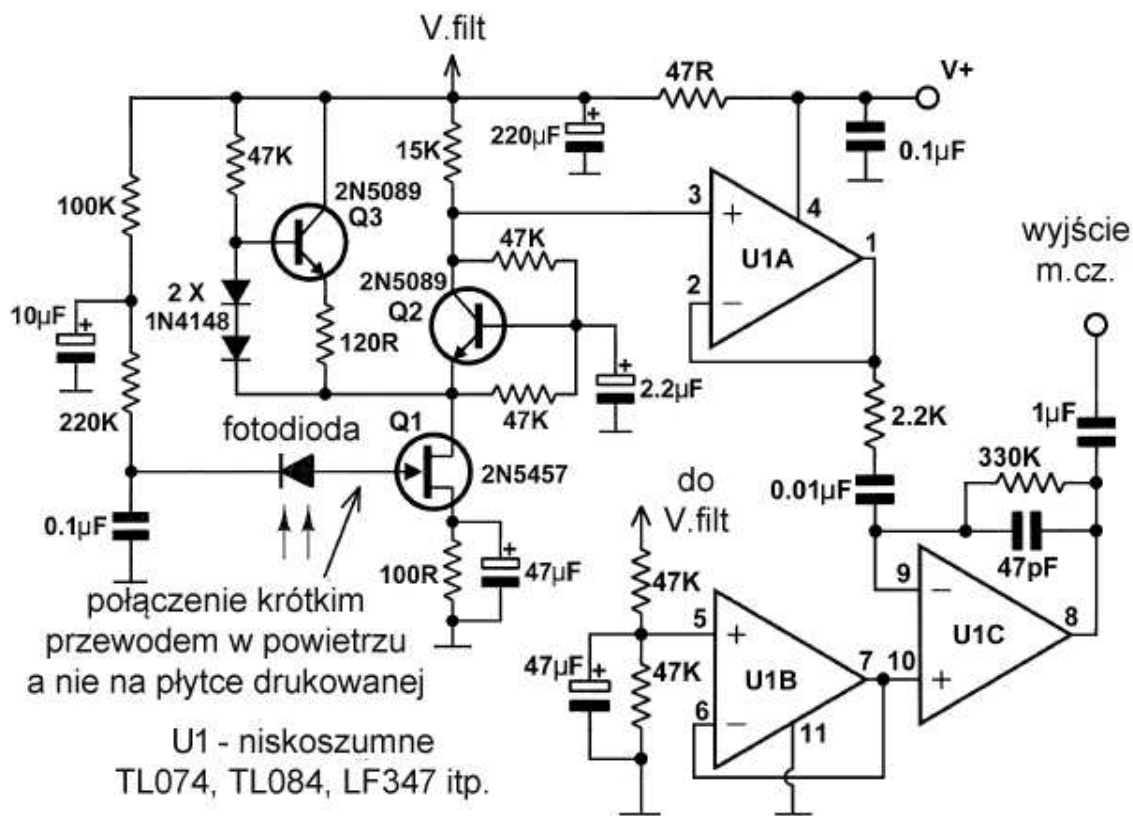
Rys. 4.4.1. Schemat ideowy

W układzie dziennym dioda jest spolaryzowana wstecznie, dzięki czemu częstotliwość graniczna wzrasta do 20 kHz. Opornik polaryzujący 82 kΩ można dobrać w zależności od ogólnego oświetlenia diody i od pożądanego pasma przenoszenia. Niższa oporność pozwala na zwiększenie wzmocnienia przy silnym oświetleniu, ale odbywa się to kosztem wzrostu poziomu szumów. Ze względu na ten fakt polaryzacja diody nie jest zalecana w rozwiązaniu przeznaczonym do pracy nocnej. Zamiast dwóch oddzielnych układów możliwe jest też zastosowanie jednego przełączanego na pracę dzienną lub nocną. DL2CH zaproponował zastąpienie opornika polaryzującego fotodiode w głowicy K3PGP przez układ na tranzystorze polowym. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu eliminuje on w znacznym stopniu wpływ stałego oświetlenia zewnętrznego i pozwala na utrzymanie większej czułości dla sygnałów zmiennych. Przepływ prądu w obwodzie drenu powoduje wzrost napięcia na bramce tranzystora aż do momentu, kiedy prąd przyjmuje minimalną wartość. Dolnoprzepustowy filtr RC powoduje uniezależnienie się od składowych modulacji (odfiltrowanie ich), tak że oporność kanału tranzystora zmienia się jedynie pod wpływem składowej stałej. Tranzystor reprezentuje sobą dużą oporność dla sygnałów zmiennych zabcobnikowaną jedynie przez opornik 1 MΩ. Układ zachowuje się więc podobnie jak cewka o dużej indukcyjności – a więc mająca małą impedancję dla sygnałów stałych i dużą dla zmiennych, a więc jest to żyrator. Rozwiązanie to dobrze sprawdziło się przy pełnym dziennym oświetleniu.



Rys. 4.4.2. Modyfikacja DL2CH

4.5. Czujły odbiornik do łączności fonicznych



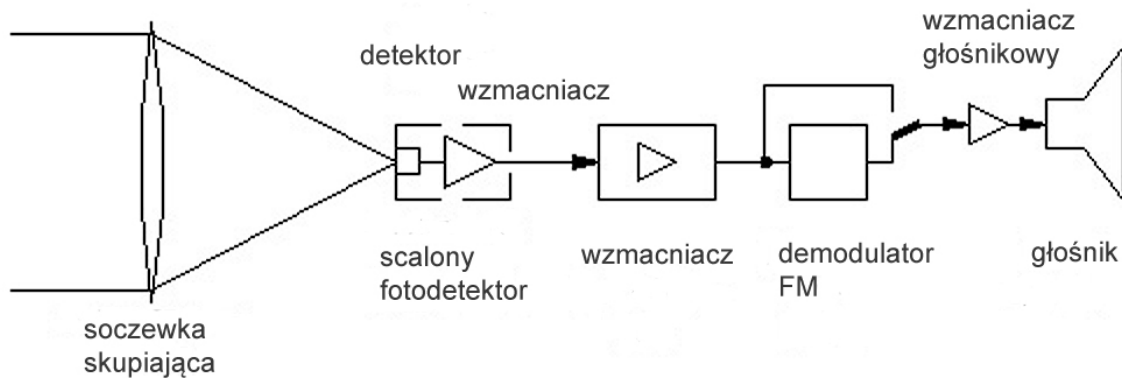
Rys. 4.5.1. Schemat czułego odbiornika o charakterystyce dostosowanej do odbioru mowy

5. Odbiorniki systemów z modulowaną podnośną

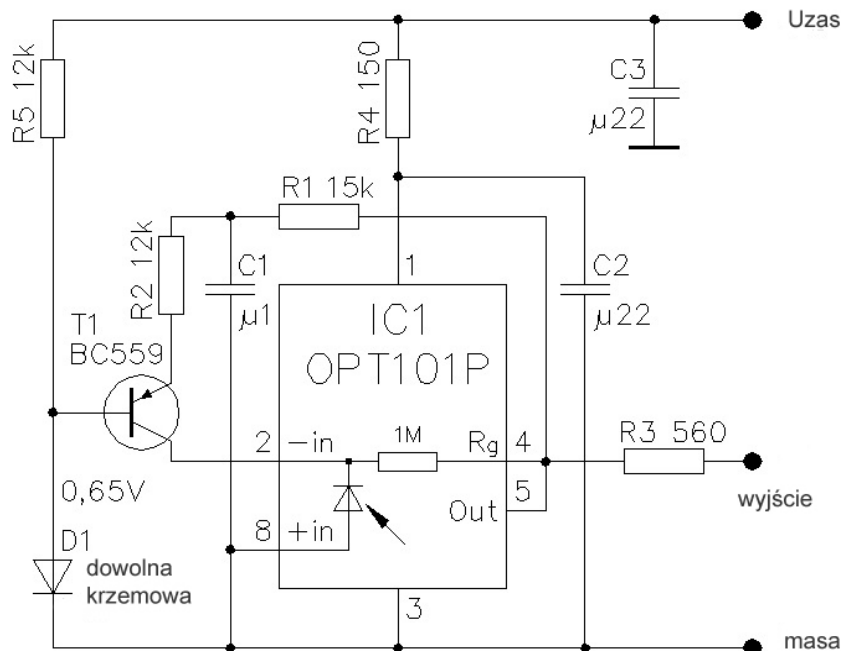
5.1. Odbiornik DL2CH z przełączanym rodzajem modulacji

Odbiornik jest przystosowany do odbioru transmisji z nadajnika opisanego w punkcie 3.3: bezpośredniej modulacji amplitudy (jasności) i z wykorzystaniem podnośnej modulowanej częstotliwościowo. Jego schemat blokowy przedstawia rys. 5.1.1, a ideowy – 5.1.3.

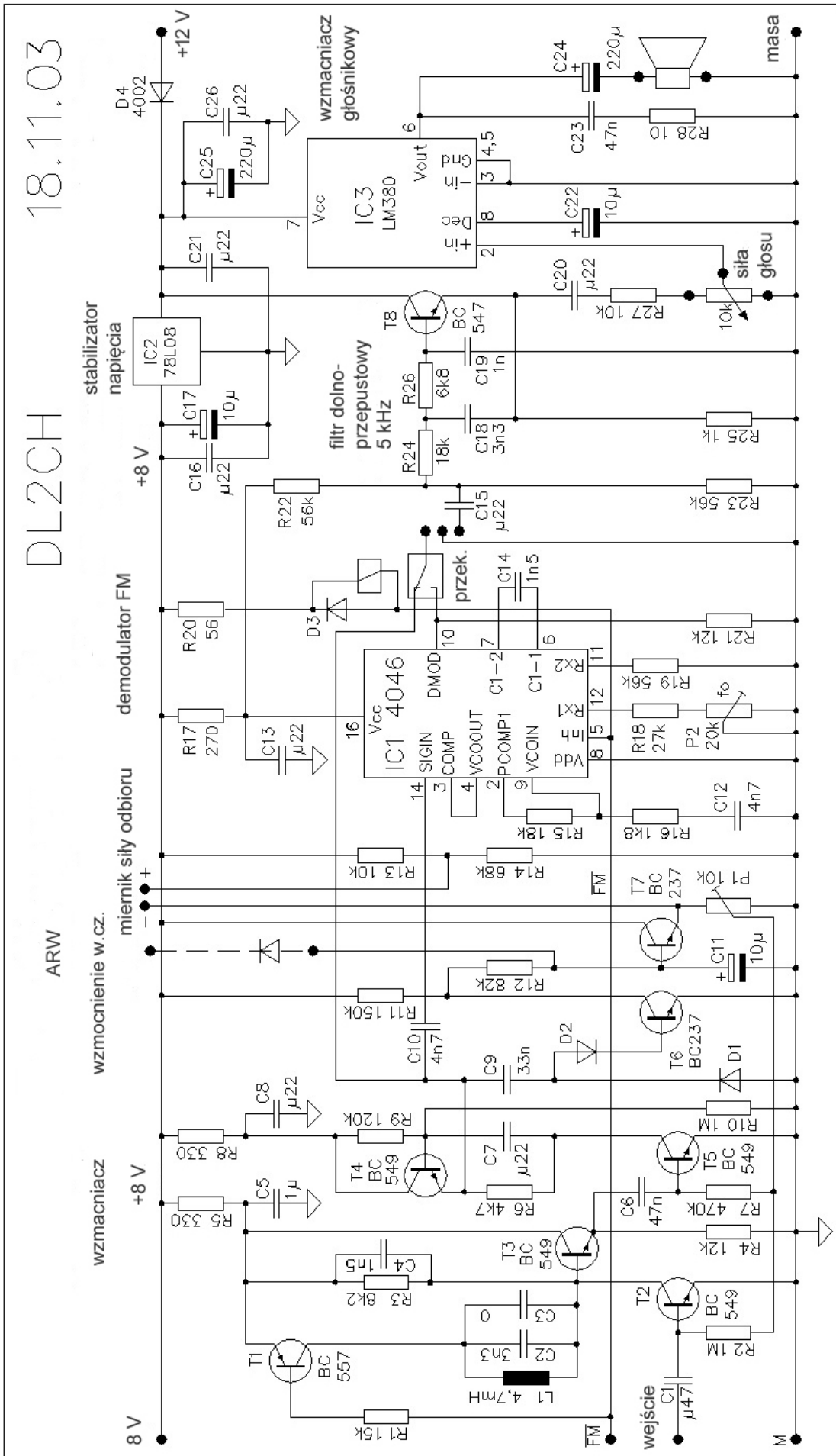
Odbiornik posiada dwustopniowy wzmacniacz o maksymalnym wzmacnieniu przekraczającym 100 dB. W zależności od rodzaju odbieranego sygnału do obwodu kolektora pierwszego stopnia włączany jest za pomocą tranzystora T1 albo obwód rezonansowy L1C2 dostrojony do częstotliwości podnośnej 32,768 kHz albo opornik 8,2 k Ω . Opornik R3 i kondensator C4 są włączone w każdym przypadku i dla wzmacniacza selektywnego podowują tłumienie obwodu rezonansowego poszerzając jego pasmo przenoszenia, a w przypadku odbioru sygnału m.cz. służą jako filtr dolnoprzepustowy. Kondensator C3 (o zerowej pojemności na schemacie) można dobrać w miarę potrzeby.



Rys. 5.1.1. Schemat blokowy odbiornika



Rys. 5.1.2. Głowica odbiorcza na scalonym detektorze OPT101P



Rys. 5.1.3

Automatyczna regulacja wzmacnienia (ARW) reaguje już słabo na szumy własne układu. Powoduje to wychylenie się wskaźnika siły odbioru już przy napięciu $2 \mu\text{V}$, co ułatwia nacelowanie stacji przy słabych sygnałach odbieranych. Zakres regulacji ARW przekracza 80 dB. Do demodulacji FM służy obwód 4046. Sygnał m.cz. jest podawany na wzmacniacz foniczny przez dolnoprzepustowy filtr Czebyszewa o częstotliwości granicznej 5 kHz. Jako wzmacniacz głośnikowy pracuje LM380, ale można go zastąpić także przez LM386 w wersji dostosowanej do wyższych napięć zasilania.

W głowicy odbiorczej zastosowano scalony fotodetektor OPT101P. Jego dużym plusem jest skuteczny układ kompensacji stałego oświetlenia. Wykorzystanie zawartego w obwodzie opornika $1 \text{ M}\Omega$ wiąże się wprawdzie z pewnym spadkiem wzmacnienia na 32,768 kHz, ale upraszcza układ elektryczny.

W obwodzie kompensacji oświetlenia stałego pracuje tranzystor T1.

Po przekroczeniu przez napięcie wyjściowe OPT101P wartości 1,2 V przez oporniki R1 i R2 zaczyna płynąć prąd do emitera tranzystora. Prąd wypływający z jego kolektora wpływa z kolei do wejścia obwodu scalonego. Obwód kolektora ma dużą oporność wyjściową i nie oddziałuje na składową zmienną. Częstotliwość graniczna kompensacji została ustalona na 100 Hz co zapewnia kompensację przydźwięku sieci.

Odporność na sygnały zakłócające można zwiększyć przez osłonięcie od zewnętrznego oświetlenia, zastosowanie przesłon i filtrów optycznych.

6. Systemy optyczne

6.1. Soczewka jako antena

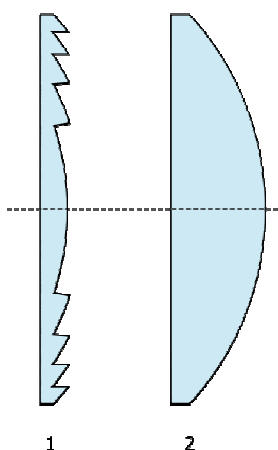
Soczewki skupiające koncentrują w ognisku docierające do nich promieniowanie. Zysk antenowy soczewki jest proporcjonalny do stosunku powierzchni soczewki i powierzchni umieszczonego w jej ognisku elementu światłoczułego. Przykładowo dla soczewki o średnicy 90 mm umieszczonej w uchwycie tak, że powierzchnia przepuszczająca światło ma średnicę 86 mm i powierzchni elementu światłoczułego $2,3 \times 2,3 \text{ mm} = 5,3 \text{ mm}^2$ otrzymujemy

$$5809 \text{ mm}^2 / 5,3 \text{ mm}^2 = 1096 = 30,4 \text{ dB.}$$

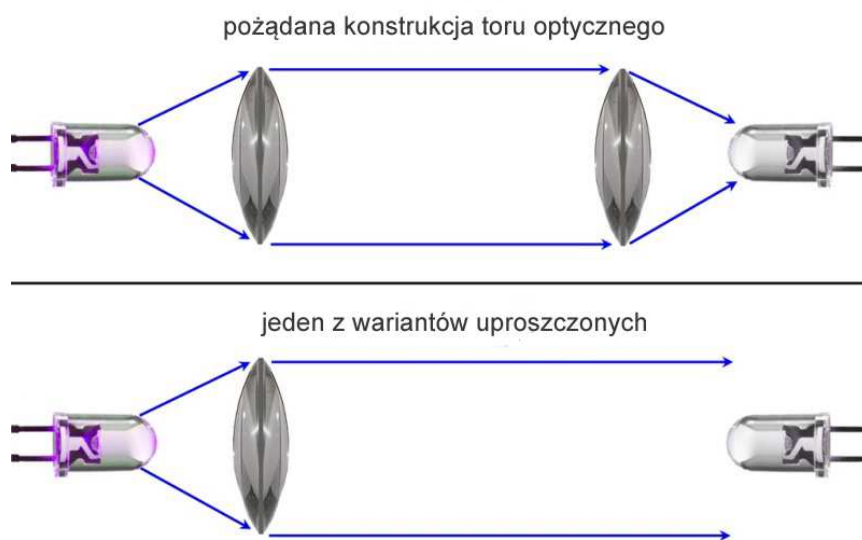
W obliczeniach nie uwzględniono strat światła w układzie optycznym, a więc jakości soczewek.

W sumie parametr ten ma znaczenie orientacyjne i nie należy przeceniać jego znaczenia. Czułość odbiornika zależy w dużym stopniu od parametrów fotodiody i połączonego z nią wzmacniacza, a zwłaszcza od ich poziomu szumów.

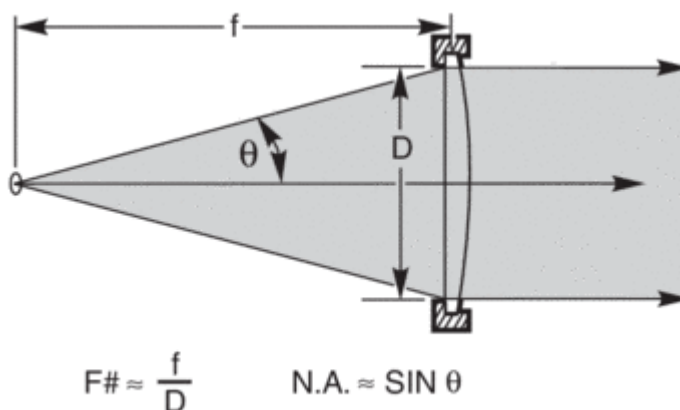
W systemach optycznych stosowane są soczewki klasyczne, soczewki Fresnela i reflektory. Przy większych średnicach szybko rośnie grubość i w związku z tym masa soczewek. Dlatego też praktycznym rozwiązaniem stają się płaskie soczewki Fresnela.



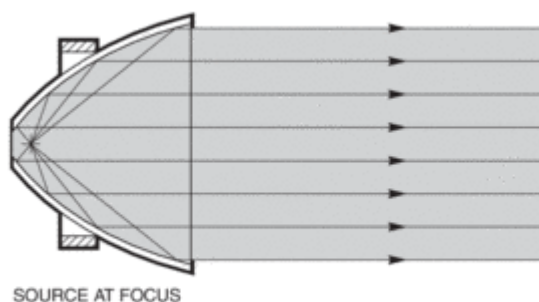
Rys. 6.1.1. Porównanie soczewki klasycznej (2) z soczewką Fresnela (1)



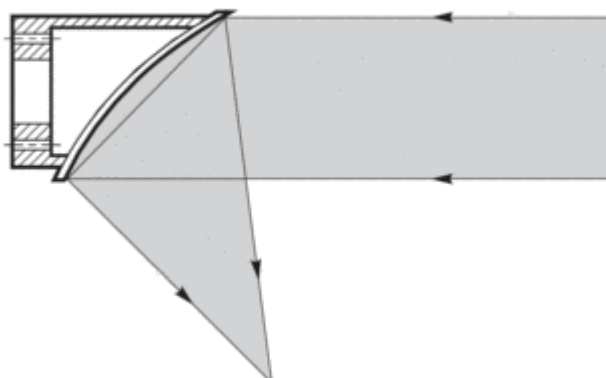
Fot. 6.1.2. Warianty toru optycznego



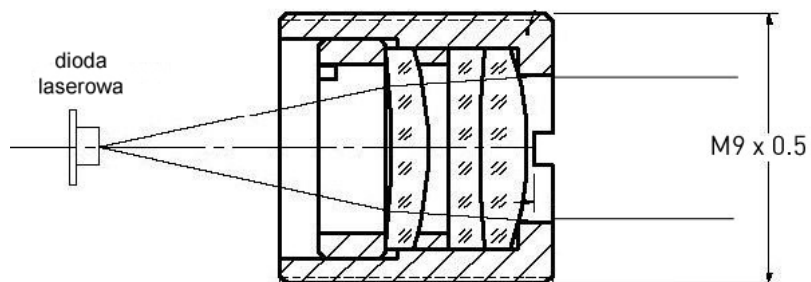
Rys. 6.1.3. Uzyskanie równoległej wiązki światła w nadajniku przy użyciu soczewki. Dla skorygowania ewentualnej aberracji sferycznej, powodującej zbieżność lub rozbieżność wiązki zamiast jej równoległości dobiera się eksperymentalnie odległość między źródłem światła a soczewką, co oznacza, że po korekcji nie znajduje się ono idealnie w ognisku. Soczewki płasko-wypukłe umieszcza się ścianką płaską od strony źródła światła



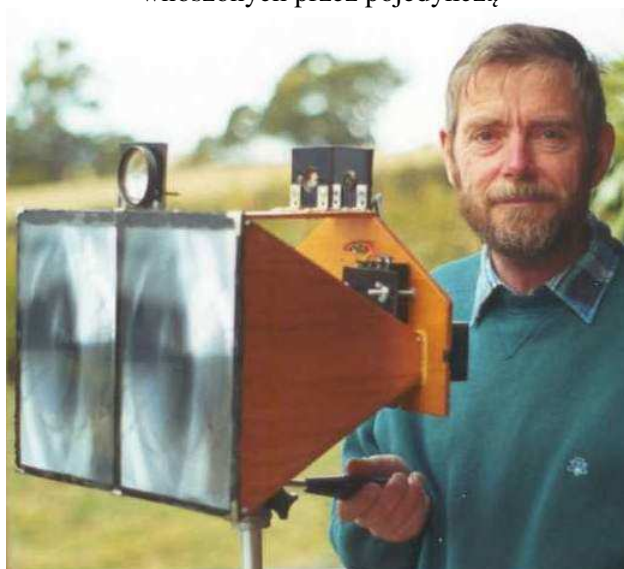
Rys.6.1.4. Uzyskanie równoległej wiązki światła w nadajniku przy użyciu reflektora. Źródło światła znajduje się w jego ognisku



Rys. 6.1.5. Wykorzystanie reflektora ofsetowego w nadajniku lub odbiorniku



Rys. 6.1.6. Obiektyw nadawczy (kolimator) na trzech soczewkach umożliwia skompensowanie błędów wnoszonych przez pojedynczą



Fot 6.1.7. Umieszczenie torów nadawczego i odbiorczego obok siebie z wykorzystaniem soczewek Fresnela



Fot. 6.1.8. Konstrukcja odbiornika z soczewką Fresnela o dużej średnicy

6.2. Konstrukcja mechaniczna stacji DJ9TU

Całość została zamontowana wewnątrz plastikowych rur kanalizacyjnych o średnicy 125 mm. Umieszczono w nich soczewki o zdolności skupiającej 8 dioptrii, średnicy 125 mm i ogniskowej 12,5 cm wymontowane z podświetlanej lupy. Dioda laserowa nadajnika może być w najprostszym wykonaniu zamontowana zamontowana w profilu aluminiowym stanowiącym podstawę lunetki celowniczej.



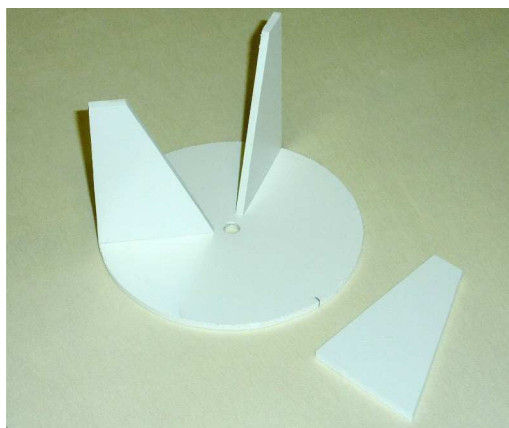
a



b



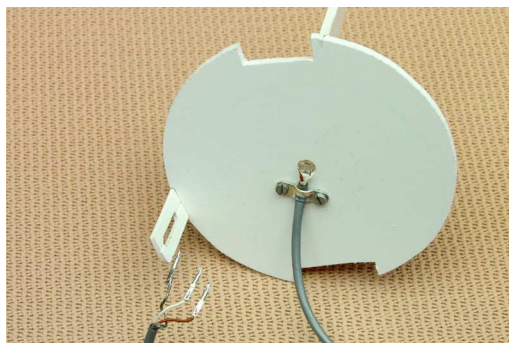
c



d



e



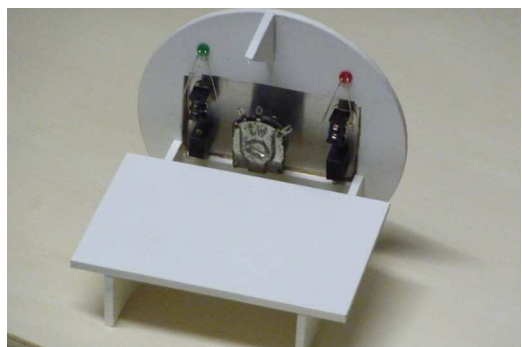
f



g



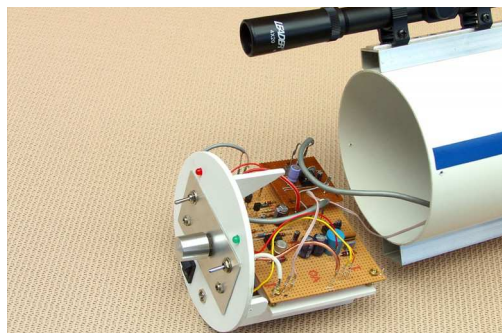
h



i



j



k



l



m

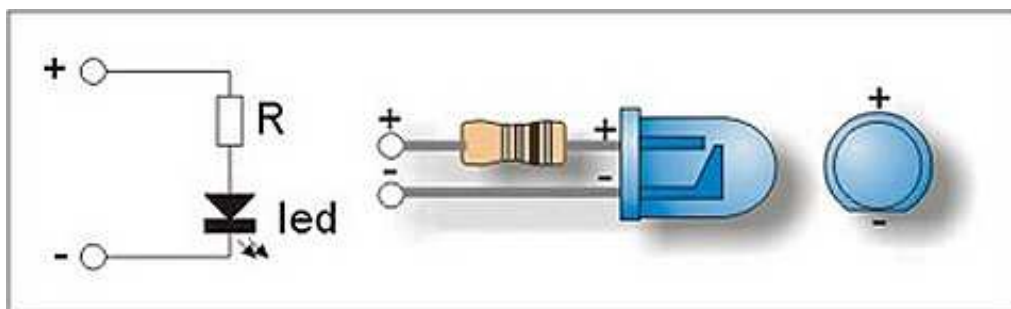


n

Zdjęcia 6.2.1. Szczegóły konstrukcji mechanicznej: a – widok gotowej konstrukcji, b – soczewka, c – rura kanalizacyjna, d, e – ścianka poprzeczna do zamontowania fotodiody, f – montaż fotodiody w otworze, ścianka umieszczona w ognisku soczewki, g – widok ścianki wewnątrz rury, h – podstawka do montażu układu elektronicznego, i – podstawka połączona z tylną ścianką, j – tylna ścianka, widoczne gniazdko dla mikrofonu i słuchawek, l – montaż diody laserowej na profilu aluminiowym, m – nadajnik i odbiornik obok siebie, n – nadajnik i odbiornik na wspólnym statywie.

Dodatek A

Obliczanie wartości oporników szeregowych dla diod świecących



Rys. A.1. Zasilanie diody elektroluminescencyjnej przez opornik szeregowy

Wartość opornika szeregowego do zasilania diod elektroluminescencyjnych oblicza się ze wzoru:

$$R = (U_{zas} - U_d) / I$$

gdzie U_{zas} jest napięciem zasilania, U_d – spadkiem napięcia na diodzie zależnym od materiału, z którego jest wykonana (koloru świecenia), a I – prądem płynącym przez diodę. W praktyce obliczone w ten sposób wartości są zastępowane przez najbardziej zbliżone do nich oporności ze standardowego szeregu. Typowymi wartościami prądu są 5 mA dla diod wskaźnikowych o małej średnicy (3 mm) i 20 mA dla diod o większych średnicach (5 mm i więcej) ale są to tylko wartości orientacyjne i zależne również od tego czy są to diody zwykłe czy o wysokiej jasności świecenia.

Tabela A.1

Typowe wartości oporników szeregowych

Zasilanie 12 V			
Rodzaj diody	Napięcie	Prąd	Opornik szeregowy
Niebieskie, białe, wysoka jasność	3,7 V	20 mA	390 Ω (obl. 415)
Czerwone, wysoka jasność	1,2 V	20 mA	560 Ω (obl. 540)
Czerwone, wskaźn.	1,2 V	5 mA	2200 Ω (obl. 2160)
Zielone, żółte, wskaźn.	1,6 V	5 mA	2200 Ω (obl. 2080)
Zasilanie 5 V			
Rodzaj diody	Napięcie	Prąd	Opornik szeregowy
Niebieskie, białe, wysoka jasność	3,7 V	20 mA	68 Ω (obl. 65)
Czerwone, wysoka jasność	1,2 V	20 mA	180 Ω (obl. 190)
Czerwone, wskaźn.	1,2 V	5 mA	680 Ω (obl. 760)
Zielone, żółte, wskaźn.	1,6 V	5 mA	680 Ω (obl. 680)

Literatura i adresy internetowe

- [1] Ehret, Bernhard, „Bauanleitungsentwurf Lichtmodem”, 2004
- [2] Greil, Peter, DL7UHU, „(Amateur)-Funk im Terahertz Bereich”, 2005, www.lichtsprechen.de
- [3] Houghton, C., L., „A safe LED Optical Transceiver System”, 73 Amateur Radio Today, 6/2000, 7/2000
- [4] Kendelbacher, Erich, „Verbindungen mit Lichtsignalen, CQDL 5/2016, str. 22
- [5] Long, Christopher, Groth, Michael, Turnrer, Clinton, „Dollars versus Decibels: Long Range atmospheric optic communication on a tight budget”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008
- [6] Malzahn, Uwe, „Grundlagen der Laserdiodenansteuerung”, Photonik 5/2003, str. 2

W serii „Biblioteka polskiego krótkofalowca” dotychczas ukazały się:

- Nr 1 – „Poradnik D-STAR”, wydanie 1 i 2
- Nr 2 – „Instrukcja do programu D-RATS”
- Nr 3 – „Technika słabych sygnałów” Tom 1
- Nr 4 – „Technika słabych sygnałów” Tom 2
- Nr 5 – „Łączności cyfrowe na falach krótkich” Tom 1
- Nr 6 – „Łączności cyfrowe na falach krótkich” Tom 2
- Nr 7 – „Packet radio”
- Nr 8 – „APRS i D-PRS”
- Nr 9 – „Poczta elektroniczna na falach krótkich” Tom 1
- Nr 10 – „Poczta elektroniczna na falach krótkich” Tom 2
- Nr 11 – „Słownik niemiecko-polski i angielsko-polski” Tom 1
- Nr 12 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 1
- Nr 13 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 2
- Nr 14 – „Amatorska radioastronomia”
- Nr 15 – „Transmisja danych w systemie D-STAR”
- Nr 16 – „Amatorska radiometeorologia”, wydanie 1 i 2
- Nr 17 – „Radiolatarnie małej mocy”
- Nr 18 – „Łączności na falach długich”
- Nr 19 – „Poradnik Echolinku”
- Nr 20 – „Arduino w krótkofalarstwie” Tom 1
- Nr 21 – „Arduino w krótkofalarstwie” Tom 2
- Nr 22 – „Protokół BGP w Hamnecie”
- Nr 23 – „Technika słabych sygnałów” Tom 3, wydanie 1, 2 i 3
- Nr 24 – „Raspberry Pi w krótkofalarstwie”
- Nr 25 – „Najpopularniejsze pasma mikrofalowe”
- Nr 26 – „Poradnik DMR” wydanie 1 i 2, nr 326 – wydanie skrócone
- Nr 27 – „Poradnik Hamnetu”
- Nr 28 – „Budujemy Ilera” Tom 1
- Nr 29 – „Budujemy Ilera” Tom 2
- Nr 30 – „Konstrukcje D-Starowe”
- Nr 31 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 3
- Nr 32 – „Anteny łatwe do ukrycia”
- Nr 33 – „Amatorska telemetria”
- Nr 34 – „Poradnik systemu C4FM”
- Nr 35 – „Licencja i co dalej” Tom 1
- Nr 36 – „Cyfrowa Obróbka Sygnałów”
- Nr 37 – „Telewizja amatorska”
- Nr 38 – „Technika słabych sygnałów” Tom 4
- Nr 39 – „Łączności świetlne”

