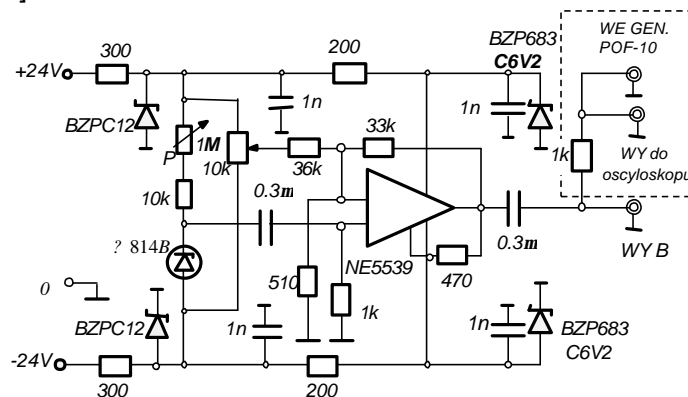


DODATEK A

GENERATORY SZUMÓW

Zróżnice szumów, niezbędne dla realizacji zadań przewidzianych programem ćwiczeń, powinny charakteryzować się odpowiednio wysokim poziomem szumów oraz pożądanym, założonym kształtem widma częstotliwościowego. Spełnienie tych wymagań osiąga się poprzez *dobór warunków pracy elementu szumogennego* (który zwą będziemy „pierwotnym” źródłem szumu) oraz *zastosowania dodatkowych układów wzmacniająco-formujących*.

Spśród rozporządzalnych źródeł pierwotnych szczególnie wydajnymi okazują się półprzewodnikowe diody stabilizacyjne – ogólnie zwane diodami Zenera – pracujące w reżymie przebicia lawinowego. Tego typu diody zostały wykorzystane w układach generatorów szumu wykonanych specjalnie dla potrzeb ćwiczeń prowadzonych w Laboratorium Elektroniki Jadrowej. Rysunek A1 przedstawia schemat ideowy GENERATORA SZUMU BIAŁEGO [GSB].



Rys. A1. Schemat ideowy generatora szumu białego

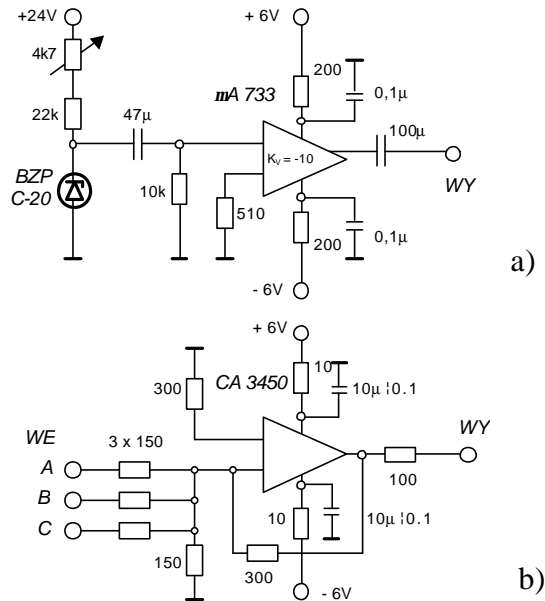
Pierwotnym źródłem szumu jest w nim dioda stabilizacyjna typu ? 814?. Warunki jej pracy wyznacza nastawiany potencjometrem P prąd zwrotny ($I_D \cong -45 \mu\text{A}$), którego wartość ustalono na podstawie globalnej charakterystyki szumowej diody w paśmie $<100 \text{ Hz} \div 5 \text{ MHz}>$. Szerokopasmowy wzmacniacz operacyjny NE5539 wzmacnia formowane na zaciskach diody (źródła prądowego) napięciowe widmo szumów do poziomu $V_{N \text{ rms}} \cong 500 \text{ mV}$. Wyjście modułu wyposażono w dodatkowy, prosty obwód miksujący, umożliwiający nakładanie szumu na impulsowe sygnały standardowe (opcja dla ćwiczenia nr 12)

W innej konfiguracji zrealizowano GENERATOR SZUMU typu $1/f^2$ (w żargonie technicznym zwanym szumem czerwonym). Ukazano ją na rysunku A2. Transformacja generowanego w diodzie DZ9V1 pierwotnego prądowego widma szumu na widmo napięciowe dokonywana jest tu w układzie wielostopniowego wzmacniacza z obwodami lokalnych sprzężeń zwrotnych. Własności transmisyjne wzmacniacza, obok wartości prądu zwrotnego diody, decydują również o kształcie rozkładu widmowego szumów wyjściowych. Na drodze ich racjonalnego doboru uzyskano rozkład zadowalająco przybliżający (w ograniczonym paśmie) zależność $1/f^2$. Konstrukcyjnie omawiany generator związany z sumatorem aktywnym umożliwiającym syntezę sygnału złożonego z impulsowego sygnału informacyjnego (WE-C) oraz dwóch zakłócających sygnałów szumowych (WE-A) i (WE-B). Schemat tego subukładu funkcjonalnego zamieszczono również wspólnie ze

GENERATORY SZUMÓW

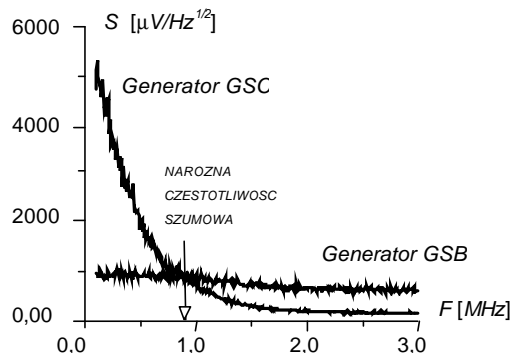
schematem generatora szumu, określając cały moduł ćwiczeniowy skrótem [GSC+M] – GENERATOR SZUMU CZERWONEGO + MIESZACZ.

Obydwa moduły wykonano w formie wkładek systemu aparaturowego STANDARD.



Rys. 2. Schematy: a) generatora szumu $1/f^2$ (GSC) oraz b) „miksera”

Jak łatwo zauważyć, tor A sumatora przenosi sygnał z mniejszą (nastawialną) wagą niż pozostałe dwa tory (B i C). W ten sposób zapewniono możliwość ustalania założonych relacji między intensywnościami obu rodzajów szumu. Własności obu generatorów ilustruje rysunek A3 przedstawiający widma szumów obu omawianych generatorów, otrzymywane na wyjściu sumatora WY, po podaniu na jego wejścia A i B odpowiednio szumu czerwonego i szumu białego. Słaby spadek intensywności szumu białego spowodowany jest modyfikującym wpływem impedancji obciążenia. Na rysunku zaznaczono również charakterystyczny punkt przecięcia się obu rozkładów widmowych. W punkcie tym gęstości widmowe mocy obu rodzajów szumu są równe, zaś przynależnej mu współrzędnej częstotliwościowej nadano nazwę **naroznej częstotliwości szumowej** (ang. *noise corner frequency*).



Rys. A3. Rozkłady widmowe szumów generowanych przez GSB i GSC

W charakterze *pierwotnych źródeł szumu* zastosowano krzemowe diody stabilizacyjne z dominującym udziałem lawinowego powielania nośników ładunku w procesie przebicia

odwrotnego. Efekt ten manifestuje się na charakterystyce prądowo-napięciowej diody stabilizacyjnej gwałtownym wzrostem prądu wstecznego przy minimalnym wzroście napięcia polaryzacji zaporowej po przekroczeniu określonego jej poziomu. To graniczne napięcie nazywane napięciem przebicia V_b (ang. *breakdown voltage*). Określa go formuła empiryczna

$$V_b = 60(W_g / 1,1)^{\frac{3}{2}} (N / 10^{22})^{-\frac{3}{4}},$$

gdzie:

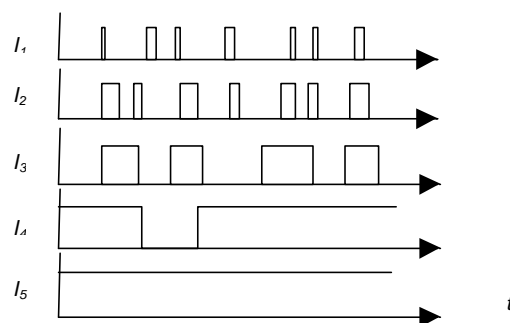
- W_g – szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika,
- N – koncentracja domieszek.

Zmiana nachylenia charakterystyki $I - V$ diody zachodzi w sposób ciągły, stąd też dla określenia wartości napięcia znamionującej efekt przebicia przyjęto umownie napięcie, dla którego prąd zwrotny osiąga wartość równą dziesiątej części dopuszczalnej wartości maksymalnej.

Z punktu widzenia koncentracji domieszek, tego rodzaju diody zajmują pośrednie miejsce między konwencjonalnymi diodami prostowniczymi a diodami Zenera. W szczególności dla złącz krzemowych charakterystyczny dla przebicia lawinowego obszar koncentracji domieszek zawiera się w granicach $(5 \cdot 10^{20} \div 2 \cdot 10^{23}) \text{ m}^{-3}$, a odpowiadające im napięcia przebicia mieszczą się w przedziale $(10^3 \div 5) \text{ V}$. Wartości tych parametrów mają istotny wpływ na poziom szumów generowanych w złączu w warunkach pracy na *kolanie* zaporowej części charakterystyki diody.

W obszarze tym inicjowany jest proces przebicia złącza. W swym początkowym stadium ma on charakter pojawiających się przypadkowo, krótkotrwałych *mikroprzebiec*, ujawniających się w formie prostokątnych impulsów prądowych o eksponencjalnym rozkładzie rozciągłości czasowej i stałej amplitudzie.

W miarę wzrostu średniej wartości prądu wstecznego diody charakter impulsów prądowych nie ulega zmianie, wydłuża się natomiast ich szerokość, a amplituda zdąża do pewnej, określonej wartości maksymalnej. Z chwilą jej osiągnięcia zmienia się gwałtownie charakter wyładowania z niestabilnego (impulsowego) na stabilne (ciągłe). Efekt ten poglądowo ilustruje rysunek A4 przedstawiający w uproszczeniu kilka przebiegów ciągów impulsów prądowych mikroplazmy dla różnych wartości średnich prądu wstecznego ($I_1 < I_2 < I_3 < I_4 < I_5$).



Rys. A4. Ewolucja impulsów prądowych mikroplazmy w funkcji $\langle I_D \rangle$

Zjawiska *mikroprzebiec* mają swe źródła w niedoskonałościach (defektach) sieci krystalicznej, na których tworzą się mikroskopijne obszary (o średnicy kilku μm), w których osiągnięcie krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego, warunkującego pełne rozwinięcie wyładowania lawinowego, zachodzi przy nieco niższym napięciu przebicia niż w pozostałej objętości warstwy zubożonej złącza. Wykazuje ono wiele podobieństwa do

lawninowej jonizacji zderzeniowej w gazach. Z tego też względu – przez analogie – mikroobszarom tym, o dużej gęstości prądu wyladowania, nadano nazwę *mikroplazmy*.

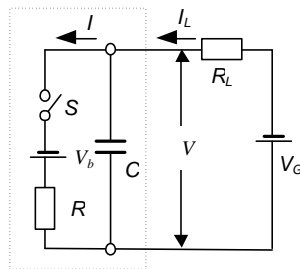
Zauważmy, że zapoczątkowanie jonizacji zderzeniowej, prowadzącej w konsekwencji do wyladowania lawinowego, uwarunkowane jest fluktuacjami swobodnych nośników ładunku w warstwie zaporowej, te zaś produkowane są w różnych współbieżnych procesach stochastycznych.

Do najważniejszych zaliczane są:

- jonizacja termiczna,
- proces generacyjno-rekombinacyjny,
- emisja polowa (*tunelowanie międzypasmowe*),
- jonizacja fotoelektryczna.

Zapłon mikroplazmy następuje więc z pewnym, uwarunkowanym statystyką tych procesów, opóźnieniem losowym w stosunku do chwili osiągnięcia krytycznej wartości pola elektrycznego. Również losowy charakter wykazuje czas życia mikroplazmy i związany z nim moment jej zgasnięcia. Proces *gaszenia* mikroplazmy jest bardzo złożony. Warunkują go głównie fluktuacje prądu mikroplazmy (amplituda i szybkość zmian) oraz wartości jej lokalnych parametrów elektrycznych i termodynamicznych.

W rezultacie, w ograniczonym zakresie (średniej wartości) prądu wstecznego złącza ($50 \div 100 \mu\text{A}$) mikroplazma podlega sukcesywnemu, losowemu włączaniu (*zapłonowi*) i wylączeniu (*gaszeniu*), którego efekt obserwowany jest w formie stochastycznego ciągu prostokątnych mikroimpulsów prądowych. Taki charakter sygnału prądowego dał podstawę do zaproponowania modelu oraz elektrycznego *schematu zastępczego mikroplazmy*. W tym przedmiocie wysunięto szereg koncepcji szczegółowych. Za najbardziej zaawansowany uznawany jest tzw. udoskonalony model mikroplazmy Haitza. Na rysunku A5 przedstawiono oparty na tym modelu elektryczny schemat zastępczy. Obok wielkości deskryptywnych mikroplazmy, jak rezystancja szeregową R_S oraz ekstrapolowane napięcie przebicia V_b także zawartych w stochastycznym elemencie bistabilnym (kluczu S) funkcji opisujących prawdopodobieństwa zapłonu (włączenia) – p_{01} i zgasnięcia (wylączenia) – p_{10} mikroplazmy w interwale jednosekundowym, uwidoczniło na nim również *pojemność własną mikroplazmy* C i elementy zewnętrznego obwodu polaryzacji złącza (R_L, V_G).



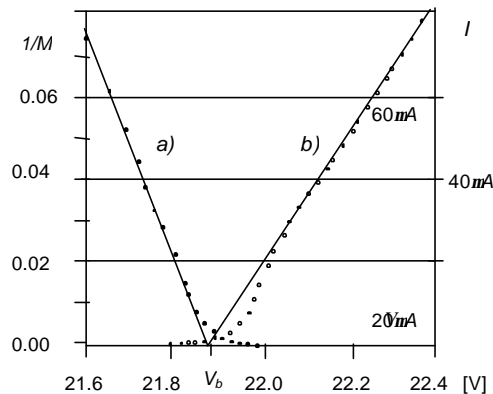
Rys. A5. Schemat zastępczy generatora mikroplazmy wg modelu Haitza

Istotnym krokiem w doskonaleniu modeli matematycznych mikroplazmy okazała się, podjęta przez Haitza, sugestia Shockleya, dotycząca pojęcia *ekstrapolowanego napięcia przebicia*. Wielkość ta zdefiniowana jest na gruncie formuły Shockley'a określającej (liniową) zależność odwrotności współczynnika powielania M od napięcia V w obszarze napięć bardzo bliskich wartości napięcia przebicia V_b . Według tej koncepcji ekstrapolowane

napiecie przebicia należy rozumieć jako *teoretyczną* wartość napięcia polaryzacji, jaka – przy hipotetycznym, idealizującym założeniu braku oddziaływań ograniczających – zapewniłaby osiągnięcie w procesie jonizacji zderzeniowej nieskończonej wartości współczynnika powielania nosników ładunku.

Na rysunku A6 przedstawiono dla przykładu, zaczerpnięty z prac Haitza, wykres ilustrujący sposób wyznaczenia wartości ekstrapolowanej V_b . Uwidoczniono na nim przebieg dwóch charakterystyk pojedynczej mikroplazmy: charakterystyki powielania w procesie jonizacji zderzeniowej (a) oraz charakterystyki prądowo-napięciowej (b). Charakterystyka (b) pozwala wyznaczyć drugi podstawowy parametr modelu R_S (tj. wartość *rezystancji szeregowej mikroplazmy*), a także poprzez ekstrapolację jej odcinka liniowego w obszar $I \rightarrow 0$ wyznaczyć wartość V_b .

Nie wnikając w szczegóły warsztatu eksperymentalnego umożliwiającego pomiar tego rodzaju charakterystyk, wypada choćby zasygnalizować, że dotyczą one zarówno technik pomiarowych, jak i podlegających badaniom struktur, narzucając w obu dziedzinach bardzo wyrafinowane wymagania. Łączne wykorzystanie specjalnych i konwencjonalnych technik pomiarowych pozwala natomiast wyznaczyć wartości dwu pozostałych parametrów modelu, tj. prawdopodobieństw włączenia (*turn-on*) mikroplazmy – $p_{01}(I)$ oraz jej wyłączenia (*turn-off*) – $p_{10}(I)$.



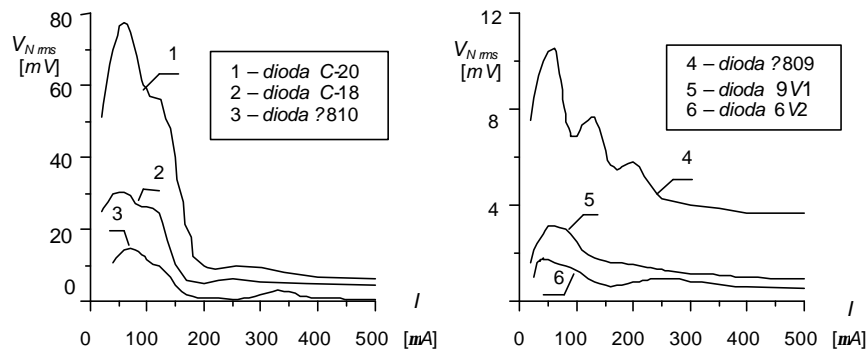
Rys. A6. Ilustracja sposobu wyznaczania wartości ekstrapolowanej napięcia przebicia

Przedstawiony w zarysie model mikroplazmy dotyczy najprostszego przypadku dwu-poziomowego przełączania bistabilnego. Bogata literatura przedmiotu dostarcza informacji o bardziej złożonych mechanizmach przełączania, charakteryzujących się więcej niż dwoma poziomami impulsów prądowych. Złącza wykazujące taką własność przyjęto zwyczajem złączami o przewodzeniu wielostabilnym (ang. *multistable conduction*) względnie wielo-poziomowym. Blizsze dane na ten temat znajdzie czytelnik w podanej w wykazie materiałów źródłowych obszernej publikacji K.C. Champlina. Do tej właśnie kategorii zaliczają się (praktycznie wszystkie) standardowe, komercyjnie dostępne, diody stabilizacyjne. Ponadto zwykłe diody lawinowe zawierają dużą liczbę mikroplazm, przy czym część z nich w zadanym punkcie pracy może znajdować się w stanie stabilnym a część w niestabilnym.

Z charakterem przewodzenia niestabilnego (dwu- lub wielopoziomowego) omawianych diod związany jest wysoki poziom szumów nadmiarowych. Jest on silnie zależny od wartości napięcia przebicia, a nadto wykazuje nieregularną (nawet w obrębie tego samego typu diody) zależność od prądu wstecznego. W ogólnym przypadku dyspersja szumów diody osiąga szereg wyraźnie rozdzielonych maksimum (ang. *noise peaks*) i minimum (ang. *noise valleys*) w miarę wzrostu prądu wyladowania lawinowego, a każdy z pików szumowych związany jest jednoznacznie z występowaniem mikroplazmy.

Napięcie przebicia i natężenie prądu diody wywierają również istotny wpływ na rozkład gęstości widmowej mocy generowanych szumów. Poprzez racjonalny dobór typu diody stabilizacyjnej oraz wartości jej prądu wstecznego można w łatwy sposób zestawić generator szumów o wysokiej wydajności i pożądanym kształcie widma. Główną wadą tego rodzaju *pierwotnych źródeł szumu*, ograniczającą ich możliwości aplikacyjne, jest ich duża wrażliwość termiczna.

Dla ilustracji omawianych własności diod stabilizacyjnych i ich wzajemnego porównania na rysunku A7 zestawiono charakterystyki szumowe kilku losowo wybranych konwencjonalnych diod o różnych wartościach napięcia stabilizacji (napięcia przebicia). Reprezentują one zależności wartości średniokwadratowych (dyspersji) globalnego szumu $V_{N\text{rms}}$ w szerokim pasmie częstotliwości ($BW = <0\div 20\text{ MHz}>$) od prądu wstecznego diody I .

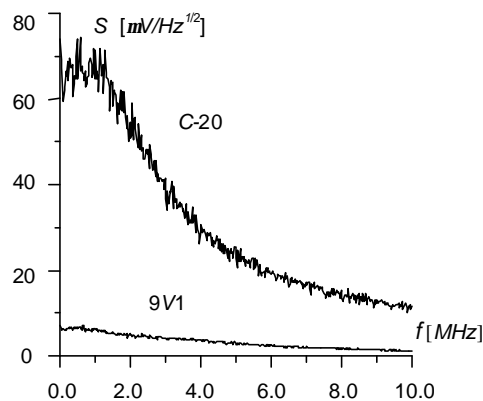


Rys. A7. Charakterystyki szumowe różnych typów diod stabilizacyjnych

Jak łatwo zauważyć, pierwszy (najwyższy) pik szumowy wszystkich badanych egzemplarzy mieści się w przedziale prądu wstecznego $<50\div 100> \mu\text{A}$. Jest to jedyna prawidłowość dotycząca wszystkich typów diod. Położenie i amplituda kolejnych pików szumowych związane są prawdopodobnie z niekontrolowanymi w procesie wytwórczym parametrami materiałowymi i technologicznymi. W zakresie większych wartości prądu wstecznego, gdy wylądowanie lawinowe rozciąga się w sposób jednorodny na całe złącze, intensywność szumów monotonicznie maleje.

Stabilność wylądowania w tym obszarze pozwoliła sformułować (podany przez Hinesa) dobrze pracujący opis teoretyczny, według którego $V_{N\text{rms}} \propto f^{-1}$.

Rysunek A8 ilustruje wpływ napięcia przebicia na charakter widma generowanych szumów. Przedstawia on mianowicie przykładowe rozkłady gęstości widmowych mocy



Rys. A8. Rozkłady widmowe szumów wybranych diod stabilizacyjnych

szumów generowanych przez diody o znacznie różniących się wartościach napięcia przebicia, (20 V oraz 9 V) pomierzone przy prądzie wstecznym odpowiadającym maksimum natężenia szumu.

Literatura

- [1] Champlin K.S.: *Microplasma Fluctuations in Silicon.*, J. Appl. Phys., vol. 30, Jul. 1959, 1039
- [2] Chynoweth A.G., Pearson G. L.: *Effect of Dislocations on Breakdown in Silicon p-n Junctions.* J. Appl. Phys., vol. 29, Jul. 1958, 1103
- [3] Haitz R.H., Goetzberger A., Scarlett R.M., Shockley W.: *Avalanche Effects in Silicon p-n junctions. I. Localized Photomultiplication Studies on Microplasmas.* J. Appl. Phys., vol. 34, Jun. 1963, 1581
- [4] Haitz R.H., Goetzberger A.: *Avalanche Noise Study in Microplasmas and Uniform Junctions.* Solid-State-Electronics, vol. 6, Nov-Dec. 1963, 678
- [5] Haitz R.H.: *Model for the Electrical Behaviour of a Microplasma.* J. Appl. Phys., vol. 35, May 1964, 1370
- [6] Haitz R.H.: *Mechanisms Contributing to the Noise Pulse Rate of Avalanche Diodes.* J. Appl. Phys., vol. 36., Oct. 1965, 3123
- [7] Haitz R.H.: *Noise of a Self-Sustaining Avalanche Discharge in Silicon: Low Frequency Studies.* J. Appl. Phys., vol. 38, June 1967
- [8] Haitz R.H., Voltmer F.W.: *Noise of a Self-Sustaining Discharge in Silicon: Studies at Microwave Frequencies.*, J. Appl. Phys., vol. 39, Jun. 1968, 3379
- [9] Hines M.E.: *Noise Theory for the Read Type Avalanche Diode.* IEEE Trans. on Electron Dev., ED-13, No. 1, January 1966, 158
- [10] McIntyre R.J.: *Theory of Microplasmas Instability in Silicon.* J. Appl. Phys., vol. 32, June 1961, 983
- [11] McIntyre R.J.: *Multiplication Noise in Uniform Avalanche Diodes.* IEEE Trans. on Electron Dev. ED-13, No. 1, January 1966, 164
- [12] McKay K.G.: *Avalanche Breakdown in Silicon.* Phys. Rev., vol. 94, May 1954, 877
- [13] Rose D.J.: *Microplasmas in Silicon.* Phys. Rev., vol. 105, Jan 1957, 413
- [14] Senitzky B., Moll J.L.: *Breakdown in Silicon.* Phys. Rev., vol. 110, May 1958, 612