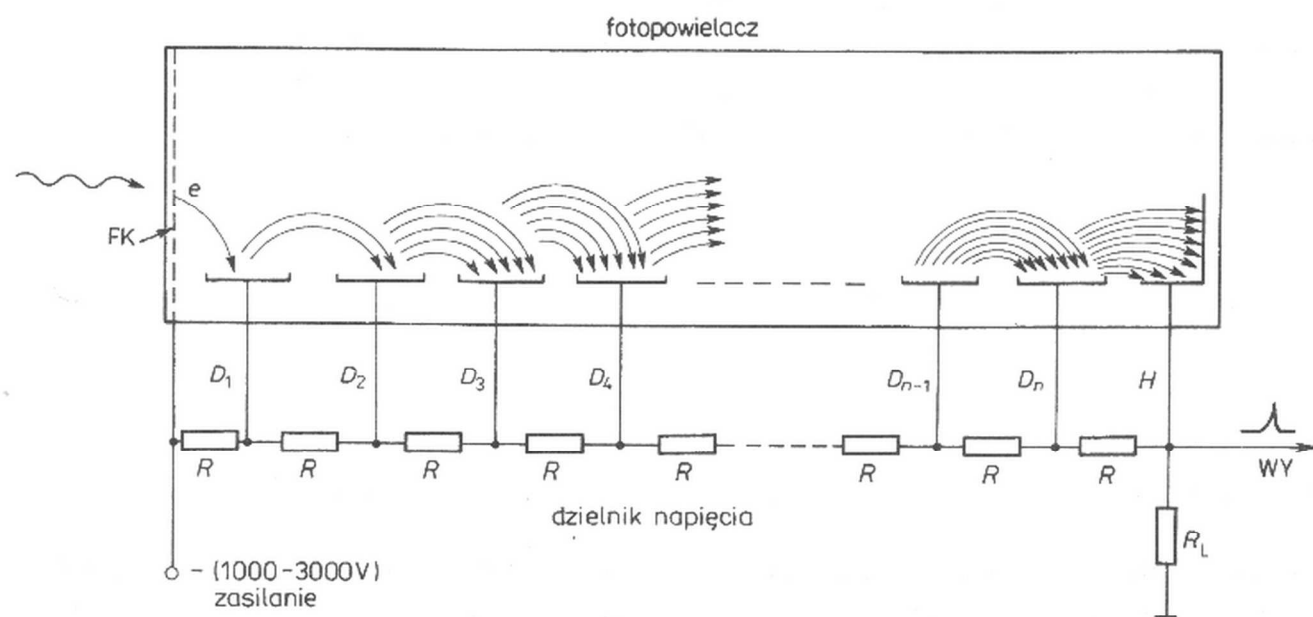


stosowano detektory o odpowiedzi proporcjonalnej do energii kwantów. Detektor D_1 wykrywa fotony o większej energii (fotony γ_1), dzięki zastosowaniu na jego wyjściu dyskryminatora o odpowiednio wysoko ustawionym progu. Impulsy tego dyskryminatora sterują bramką koincydencyjną, przez którą przepuszczane są sygnały z detektora D_2 . Dzięki koincydencji do analizatora docierają tylko sygnały wywołane przez kwanty γ_2 skorelowane czasowo z kwantami γ_1 rejestrowanymi przez detektor D_1 . Inne impulsy z detektora D_2 , a więc wywołane przez inne rozpady lub na przykład przez promieniowanie tła czy szumy układu, są eliminowane. Redukcja zakłóceń, jaką uzyskano za pomocą bramki, widoczna jest na rys. 14.50, na którym porównano widma rejestrowane w analizatorze wielokanałowym w przypadku braku układu koincydencyjnego i po jego zastosowaniu.

14.9. Liczniki fotonów i pojedynczych cząstek naładowanych

Do pomiarów najsłabszych strumieni światła — pojedynczych fotonów — stosuje się fotopowielacze. Uproszczoną budowę fotopowielacza przedstawiono na rys. 14.51. Fotopowielacz ma najczęściej postać zamkniętej bańki szklanej (niekiedy ceramicznej), z której odpompowano powietrze aż do uzyskania wysokiej próżni.



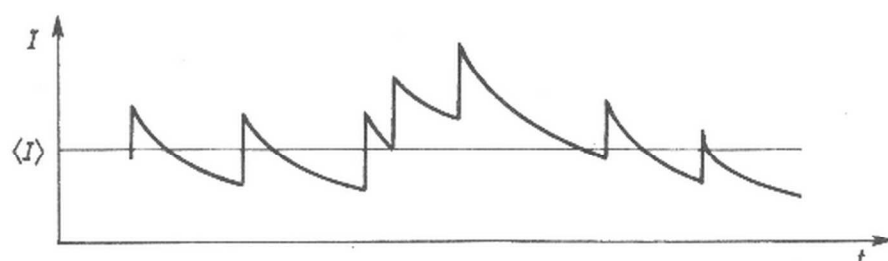
Rys. 14.51. Schemat budowy fotopowielacza

Tuż za okienkiem bańki znajduje się *fotokatoda* (FK), czyli elektroda pokryta substancjami fotoemisyjnymi. Pod wpływem padających fotonów z powierzchni fotokatody uwalniane są elektrony. Zakres widmowy działania fotopowielaczy zależy od materiału fotokatody i rodzaju okienek; rozciąga się od ultrafioletu do fal o długościach około $1,1 \mu\text{m}$. *Wydajność kwantowa fotokatody* (prawdopodobieństwo emisji elektronu na jeden foton) jest zależna od długości fali promieniowania, lecz nie przekracza 30%. W większości typów współczesnych fotopowielaczy katoda wykonana jest bezpośrednio na okienku. Poza nią wewnątrz fotopowielacza znaj-

duje się układ elektrod zwanych *dynodami* ($D_1 \dots D_n$) oraz anoda (A). Dynody są pokryte substancją o wysokim współczynniku emisji wtórnej elektronów. Kolejne dynody mają coraz wyższy potencjał w stosunku do fotokatody. Napięcia między nimi sięgają kilkuset woltów. Całość jest zasilana ze źródła wysokiego napięcia za pomocą odpowiedniego dzielnika napięciowego.

Działanie fotopowielacza jest następujące: elektron uwolniony z katody w wyniku zaabsorbowania przez nią fotonu ulega w polu elektrycznym panującym między fotokatodą i pierwszą dynodą przyspieszeniu do energii kilkuset elektronowoltów i uderza w tę dynodę. Dzięki zjawisku *emisji wtórnej* następuje wybite z powierzchni dynody pewnej liczby elektronów (średnio od 2 do 20). Elektrony te są przyspieszane w polu elektrycznym między D_1 i D_2 , i uderzają w powierzchnię następnej dynody, na której znowu następuje powielenie ich liczby itd. Wytworzona w ten sposób chmura ładunku dociera do anody i jest rejestrowana w obwodach wyjściowych jako impuls prądowy. Liczba dynod w fotopowielaczach o dużej czułości dochodzi do 14, a maksymalne wzmocnienia przekraczają 10^8 . Pochodzący od jednego fotonu impuls wyjściowy na oporze obciążenia 50Ω ma amplitudę rzędu kilku–kilkudziesięciu miliwoltów i kilkunanosekundowy czas trwania. Często stosuje się powielacze o mniejszym stopniu wzmocnienia, a wyjście detektora sprzęga się z szybkim wzmacniaczem ładunkowym.

Przy pomiarze wolnozmiennych, słabych strumieni światła zwykle stosuje się pojemnościowe obciążenie fotopowielacza. Przy dużej rezystancji wejściowej urządzenia mierzącego rozwiązanie takie pozwala uzyskać sygnał proporcjonalny do średniego natężenia oświetlenia fotokatody (rys. 14.52). W tych warunkach fotopowielacz można z pewnym przybliżeniem uważać za źródło prądowe.



Rys. 14.52. Przebiegi na wyjściu fotopowielacza w przypadku obciążenia pojemnościowego

Podobną konstrukcję mają powielacze elektronowe przeznaczone do rejestracji słabych strumieni cząstek naładowanych. Są pozbawione fotokatody, zawierają tylko układ dynod i anodę. Obudowa powielacza zakończona jest zwykle uniwersalnym kołnierzem, pozwalającym na łatwe przyłączenie go do układu próżniowego, w którym mają być wykrywane swobodne ładunki.

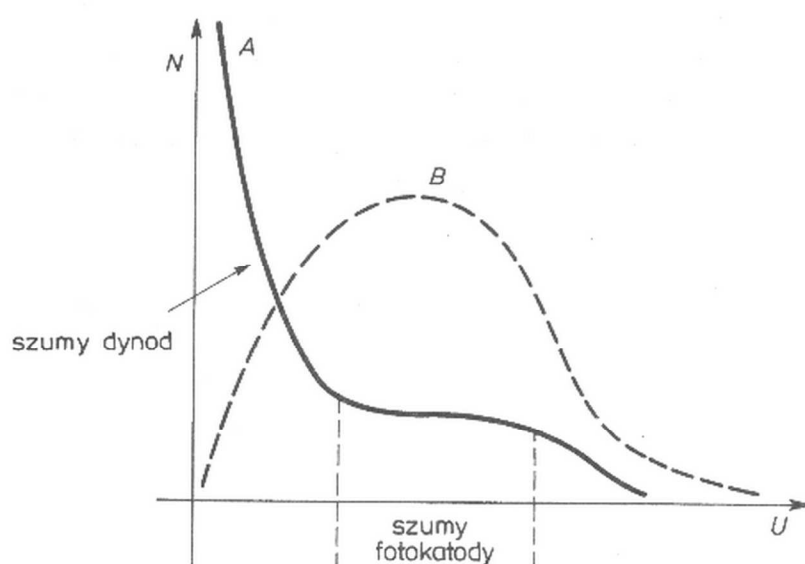
Liczne zjawiska powodują powstanie w fotopowielaczu także sygnałów nie związanych z efektem fotoelektrycznym na powierzchni katody — tak zwanych *zliczeń ciemnych*. Przyczyną ich są na przykład fluktuacje termiczne prowadzące do emisji elektronów. W dobrym fotopowielaczu o niewielkiej katodzie liczba zliczeń ciemnych wynosi około 20 na sekundę w temperaturze pokojowej. Obniżając temperaturę, można radykalnie zmniejszyć szumy fotokatody do kilku na minutę. Optymalna temperatura pracy fotopowielacza zależy od rodzaju fotokatody. Utrzy-

manie właściwej temperatury zapewniają odpowiednie chłodziarki wykorzystujące zjawisko termoelektryczne lub chłodzone suchym lodem czy ciekłym azotem.

Impulsy ciemne (prąd ciemny) mogą powstawać również na skutek termoemisji zachodzącej na powierzchni dynod. Na ogół charakteryzują się one amplitudą tym mniejszą, im bardziej oddalona od fotokatody była dynoda, z której nastąpiła emisja (inaczej mówiąc szumy z dynody $k + 1$ mają mniejszą amplitudę niż szumy z dynody k). Mniej istotnymi szumami są tzw. afterpulsy, czyli sygnały pojawiające się po impulsie elektronowym, pochodzące od zjonizowanych gazów reszkowych. Jeszcze mniej prawdopodobne są impulsy wywołane promieniowaniem kosmicznym lub reszkowym promieniowaniem materiałów, z których powielacz został wykonany.

Rozkład szumów fotopowielacza przedstawiono na rys. 14.53 (krzywa A). Duża liczba zliczeń o niewielkich amplitudach związana jest z termoemisją z dynod. Większą amplitudą (pełnym wzmocnieniem), lecz mniejszym prawdopodobieństwem wystąpienia charakteryzują się zliczenia ciemne pochodzące z fotokatody. Stosunkowo największe amplitudy mają rzadkie impulsy wywołane promieniowaniem tła.

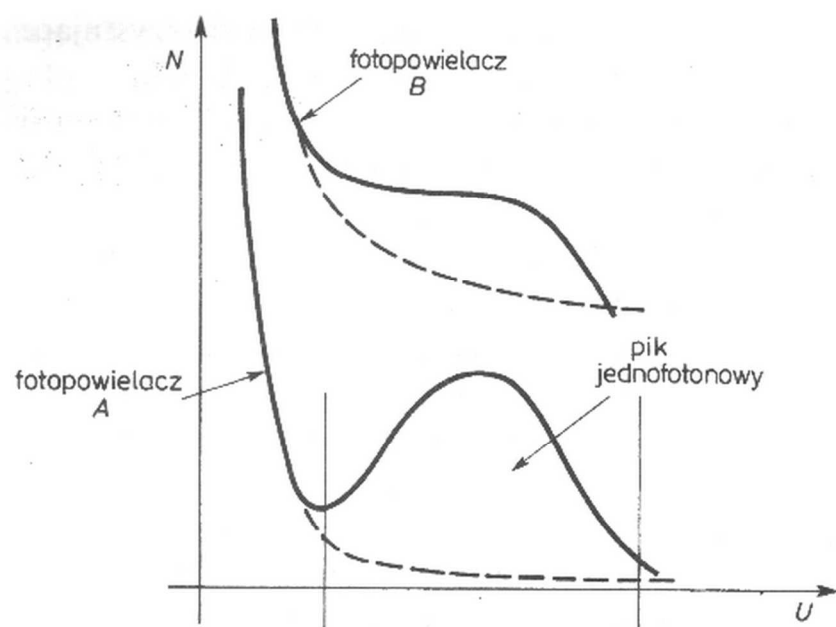
Rys. 14.53. Rozkład amplitud szumów fotopowielacza (A) oraz rozkład amplitud impulsów powstałych w wyniku fotoefektu (B)



Krzywa B na rys. 14.53 prezentuje rozkład amplitud impulsów wyjściowych fotopowielacza wywołanych fotonami (krzywa wzmocnienia). Ponieważ zjawisko emisji wtórnej jest efektem statystycznym, opisujący je współczynnik (liczba elektronów wybitych z dynody na jeden elektron padający) ulega zmianie od przypadku do przypadku i operować możemy tylko wielkością średnią. Prawdopodobieństwo całkowitego wzmocnienia opisywane jest więc w przybliżeniu rozkładem Poissona. Zarówno charakterystyka szumowa jak i krzywa wzmocnienia mają indywidualny kształt dla każdego fotopowielacza.

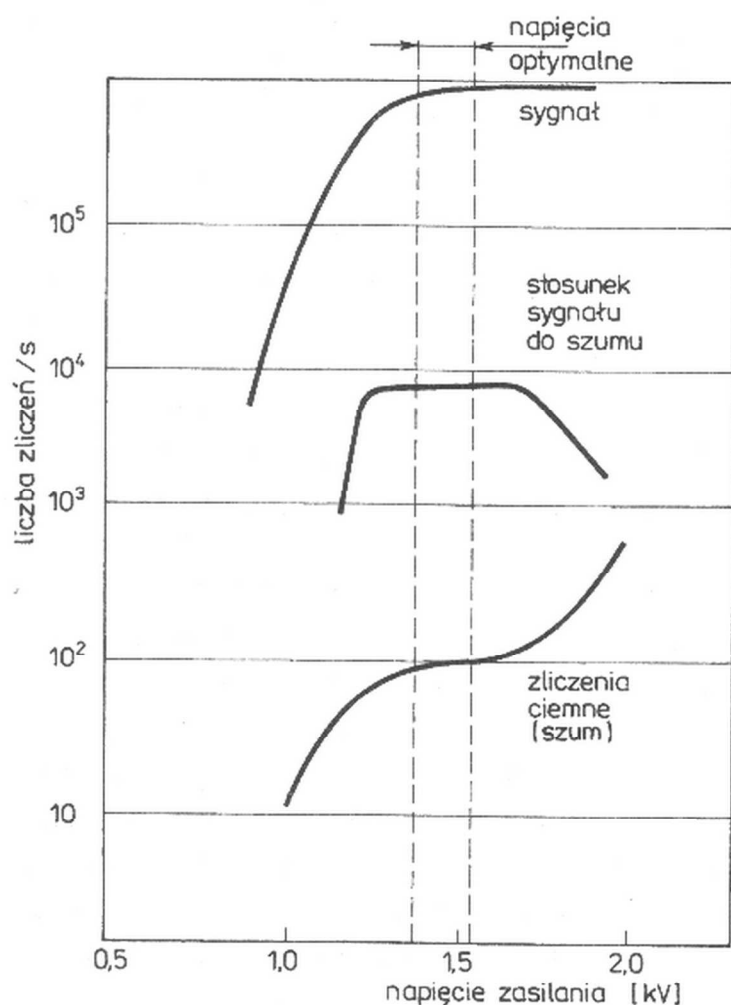
Na rysunku 14.54 przedstawiono rozkłady amplitud impulsów wyjściowych, jakie można otrzymać za pomocą wielokanałowego analizatora amplitudy dla różnych fotopowielaczy w przypadku słabego oświetlenia katod. Krzywa A charakteryzuje fotopowielacz o niewielkich szumach i wyraźnie wydzielonym tak zwanym *piku jednofotonowym*, wywołanym wejściowym strumieniem światła*. Wykorzyst-

* Przy silniejszym oświetleniu obserwuje się także *pik dwufotonowy*, o maksimum przesuniętym w kierunku większych napięć.



Rys. 14.54. Rozkład amplitud impulsów wyjściowych dwu fotopowielaczy przy słabym oświetleniu katody (linia ciągła) oraz ich charakterystyki ciemne (linia przerywana)

tanie tego detektora do zliczania pojedynczych cząstek wymaga jednak zastosowania dyskryminatora okienkowego. Progi dyskryminacji, oznaczone na omawianym rysunku pionowymi liniami, należy ustawić tak, by jak najskuteczniej wyeliminować szumy, nie zmniejszając jednocześnie zbytnio czułości układu pomiarowego. Krzywa *B* charakteryzuje fotopowielacz o dużych szumach i słabo odróżnialnym pik

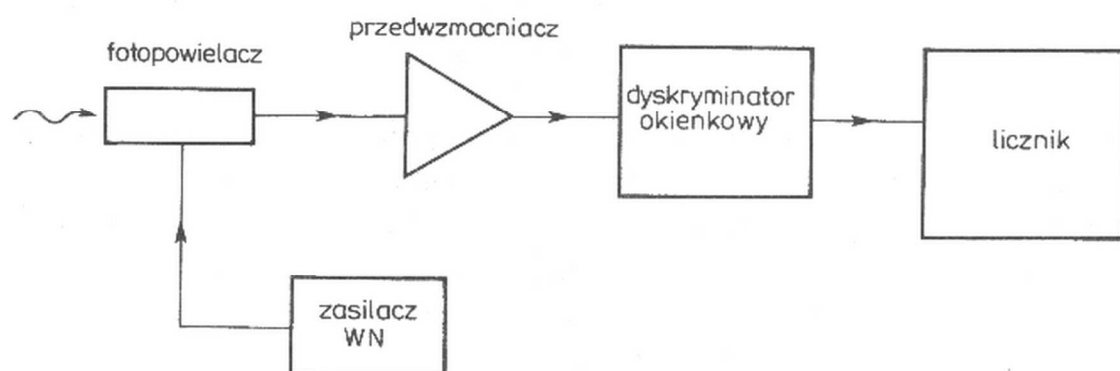


Rys. 14.55. Liczba zliczeń fotonów i zliczeń ciemnych w zależności od napięcia zasilania fotopowielacza

jednofotonowym. Zastosowanie tego detektora do zliczania fotonów jest raczej problematyczne, jednak nadaje się on do pomiaru słabych strumieni światła w układach, w których stały poziom szumów może być łatwo wyeliminowany, na przykład przy badaniach impulsów promieniowania lub w pomiarach z zastosowaniem metody uzmiennienia sygnału.

Należy pamiętać, że choć wzmocnienie fotopowielacza zwiększa się wraz ze wzrostem napięcia zasilającego jego dzielnik, to zwiększanie czułości tego detektora przez stosowanie napięcia większego od pewnej wartości U_{opt} jest niecelowe, gdyż liczba zliczeń ciemnych rośnie wtedy znacznie szybciej i następuje pogorszenie stosunku sygnału do szumu (rys. 14.55). W takim wypadku korzystniejsze jest zwiększenie czułości układu przez zastosowanie przedwzmacniacza.

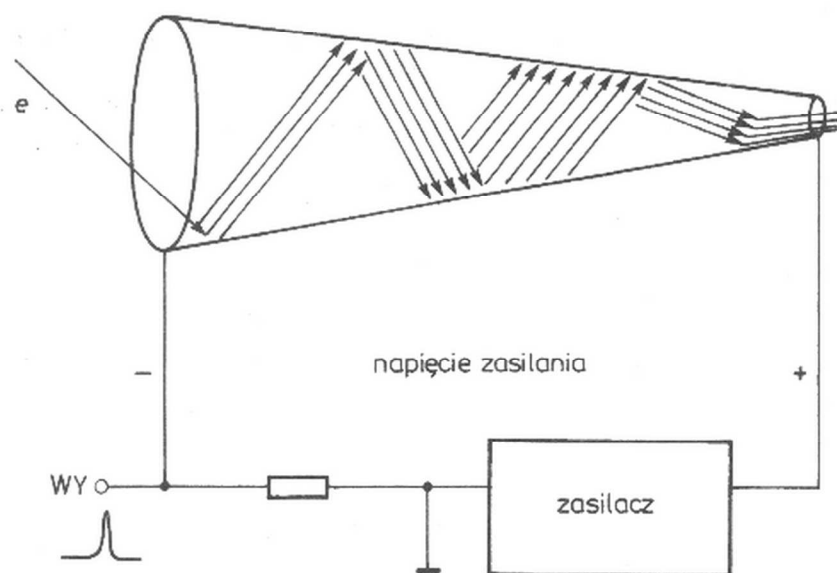
Na rysunku 14.56 pokazano schemat blokowy układu do zliczania pojedynczych fotonów. Składa się on z przedwzmacniacza, dyskryminatora okienkowego (pełniącego rolę ogranicznika szumów) i licznika. W najprostszym rozwiązaniu licznik służy do gromadzenia informacji o liczbie fotonów. Zwykle aparatura tego typu jest wyposażona także w układy do wyznaczania histogramu impulsów wyjściowych powielacza (jak na rys. 14.54). Do pomiarów ciągłych strumieni światła stosuje się układ *cyfrowego detektora synchronicznego*, który współpracując z tarczowym modulatorem promieniowania pozwala na zredukowanie zliczeń ciemnych (*lock-in*



Rys. 14.56. Schemat blokowy układu do zliczania fotonów

mode). Natomiast przy pomiarach światła ze źródeł impulsowych wykorzystuje się metodę bramkowania czasowego, podobnie jak w analizatorach jednokanałowych (*boxcar mode*). Bramka jest otwierana synchronicznie ze spodziewanymi impulsami światła, podobnie jak w doświadczeniu z rys. 14.22. Przy niewielkich czasach otwarcia bramki — rzędu kilkudziesięciu nanosekund — należy na tyle osłabić badaną wiązkę promieniowania, by w trakcie jednego impulsu triggera do fotopowielacza docierał co najwyżej jeden foton*. W ten sposób wyznacza się prawdopodobieństwo pojawienia się fotonu na jeden impuls synchronizujący. Zmniejszając szerokość bramki czasowej (np. do około 10 ns) przy dużych częstotliwościach powtarzania impulsów synchronizujących (np. 10 MHz) i stosując foto-

* Nowoczesne układy dwukanałowe o dwu niezależnych dyskryminatorach, pracujące w modzie sumy zliczeń z obu kanałów, pozwalają także rejestrować impulsy dwufotonowe i kompensować wprowadzany przez nie błąd pomiarowy.

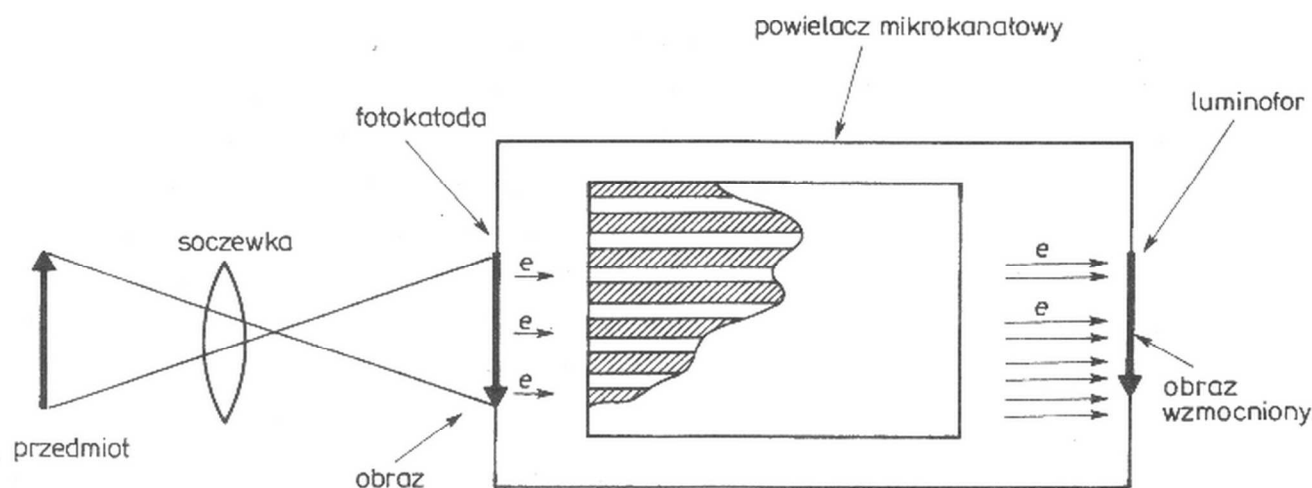


Rys. 14.57. Channeltron

powielacze o niewielkich szumach (kilka zliczeń ciemnych na minutę), można uzyskać bardzo duży stosunek sygnału do szumu (rzędu 10^8).

Ostatnio coraz szersze zastosowanie znajdują kanalikowe powielacze elektronowe zwane *channeltronami*. Zbudowane są z materiału izolacyjnego w kształcie rurki (rys. 14.57) pokrytej od wewnątrz substancją charakteryzującą się wysokim współczynnikiem emisji wtórnej. Układ zasilany jest napięciem rzędu kilku kilowoltów. Dzięki dużemu oporowi właściwemu materiałowi powielacza powstaje wzdłuż niego pole elektryczne, w którym elektrony ulegają wydajnemu przyspieszaniu. Podczas przebiegu przez channeltron zderzają się one wielokrotnie z jego ściankami, przy czym na skutek emisji wtórnej ich liczba szybko rośnie. Wzmocnienia uzyskiwane w tych powielaczach nie są mniejsze niż w powielaczach dynodowych, natomiast średnice channeltronów mogą być submilimetrowe. Wadą channeltronów jest stosunkowo niewielka dopuszczalna częstotliwość zliczeń (rzędu $10^5/s$), ze względu na czas niezbędny na powtórne naładowanie po każdym impulsie wysokooporowych warstw powielających.

Wykorzystując macierze powielaczy kanałowych — tak zwane płytki mikrokanalowe — (rys. 14.58), wytwarza się *wzmacniacze obrazu* o dużej czułości, które



Rys. 14.58. Kanalikowy wzmacniacz obrazu

poza licznymi innymi zastosowaniami bywają używane zamiast tradycyjnych fotopowielaczy. Najnowocześniejsze fotopowielacze z płytkami mikrokanalowymi charakteryzują się zdolnością do zliczania pojedynczych fotonów i bardzo krótkim czasem narastania impulsów wyjściowych — rzędu 130 ps.

14.10. Zakończenie

Laboratoryjne przyrządy pomiarowe powinny charakteryzować się możliwie dużą dynamiką, dużą czułością, jak największą zdolnością rozdzielania sygnału od szumu, stabilnością, jak również niezależnością parametrów od warunków zewnętrznych (temperatura, wilgotność, wahania napięcia zasilającego, zakłócenia), zdolnością do nieprzerwanej pracy w czasie kilkudziesięciu tysięcy godzin. Od nowoczesnego urządzenia żąda się także możliwości sprzęgnięcia go ze standardowym systemem komputerowym. Pod pojęciem współpracy z komputerem należy rozumieć nie tylko przekazywanie do systemu wyników pomiarów za pomocą złącza szeregowego lub równoległego, lecz również możliwość zdalnego wybierania funkcji przyrządu za pomocą oprogramowania lub klawiatury komputera.

Z punktu widzenia organizacji eksperymentu naukowego, w którym używa się na ogół zestawów złożonych, istotny jest również standard elektryczny, mechaniczny i logiczny urządzeń laboratoryjnych. Z tego powodu wiele aparatów wykonywanych jest często w postaci bloków do takich systemów, jak CAMAC, NIM, FASTBUS lub VME. Zapewnia to stosunkowo łatwą, szybką i elastyczną, a jednocześnie tańszą i bardziej zwartą budowę zespołów elektronicznych, gwarantując zarówno poprawną współpracę wzajemną poszczególnych ich elementów, jak i możliwość pełnego komputerowego sterowania systemu.

Literatura

- J. Baranowski, G. Czajkowski, *Układy analogowe nieliniowe i impulsowe*, WNT, Warszawa 1993.
- A.M. Boncz-Brujewicz, *Układy elektroniczne w nauce i technice*, PWN, Warszawa 1973.
- A. Guziński, *Liniowe elektroniczne układy analogowe*, WNT, Warszawa 1993.
- P. Horowitz, W. Hill, *Sztuka elektroniki*, WKiŁ, Warszawa 1993.
- Z. Kulka, M. Nadachowski, *Liniowe układy scalone*, WNT, Warszawa 1984.
- A.F. Lent, S. Miastkowski, *Practical Applications Circuits Handbook*, Academic Press, Inc., San Diego, New York, ... 1989.
- O. Limman, *Elektronika bez wielkich problemów*, WKiŁ, Warszawa 1976.
- W. Majewski, *Układy logiczne*, WNT, Warszawa 1993.
- B.M. Oliver, J. M. Cage, *Pomiary i przyrządy elektroniczne*, WKiŁ, Warszawa 1978.
- H.W. Ott, *Metody redukcji zakłóceń i szumów w układach elektronicznych*, WNT, Warszawa 1979.
- J. Rydzewski, *Oscyloskop elektroniczny*, WKiŁ, Warszawa 1982.
- B. Szumielewicz, B. Słomski, W. Styburski, *Pomiary elektroniczne w technice*, WNT, Warszawa 1982.
- R. Śledziwski, *Elektronika dla fizyków*, PWN, Warszawa 1982.