

Politechnika Poznańska
Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej
Zakład Chemii Fizycznej

Materiały do ćwiczeń laboratoryjnych
z Chemii Fizycznej i Podstaw Ochrony Radiologicznej

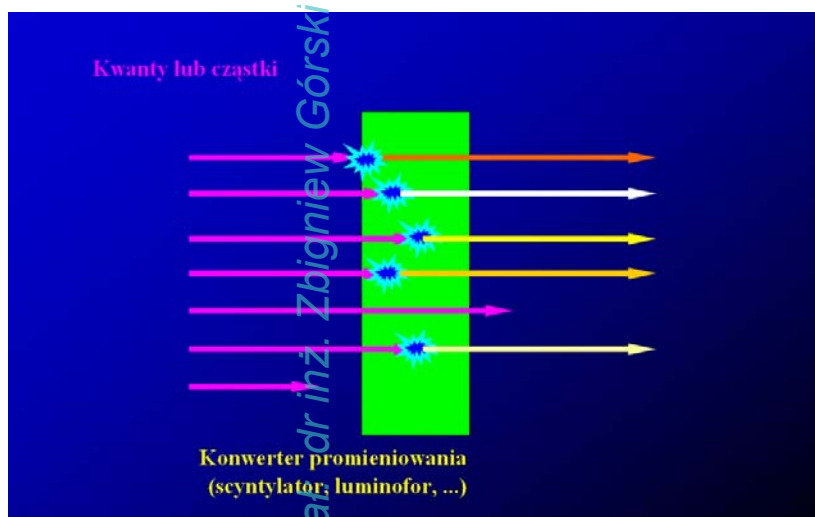
LICZNIK SCYNTYLACYJNY PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO

FIZYCZNE PODSTAWY DZIAŁANIA I BUDOWA

Opracował: dr inż. Zbigniew Górski

Licznik scyntylacyjny promieniowania jonizującego składa się z konwertera promieniowania (scyntyлятора), detektora światła (fotopowielacza lub fotodiody lawinowej) i układu analizującego zliczającego.

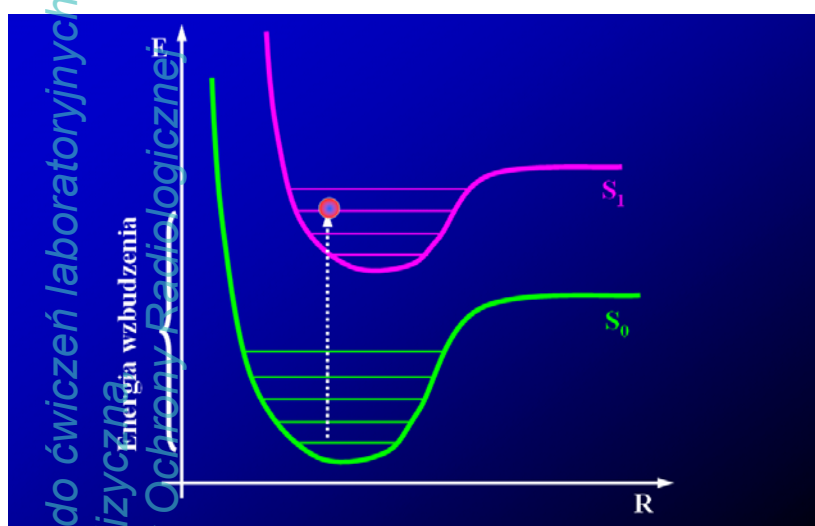
W liczniku scyntylacyjnym detektorem promieniowania jonizującego jest substancja, w której dochodzi do konwersji energii niesionej przez promieniowanie jonizujące na promieniowanie świetlne (rys.1).



Rys.1. Schemat konwersji promieniowania jonizującego na światło.

Proces konwersji energii promieniowania jonizującego nie zachodzi z 100% wydajnością. Część kwantów lub cząstek (promieniowania jonizującego) posiada tak dużą energię, że pokona drogę wewnątrz konwertera nie powodując widocznego oddziaływania, część posiada tak małą energię, że do konwertera w ogóle nie dotrze.

Ta część kwantów lub cząstek (promieniowania jonizującego), która jest zdolna do oddziaływać z materiałem konwertera odda część lub całą swoją energię elektronom substancji konwertującej. Proces ten nazywamy absorpcją promieniowania.



Rys.2. Mechanizm wzbudzenia elektronów konwertera promieniowania

E – energia elektronu, R – odległość pomiędzy jądrami substancji ochładniającej

W wyniku absorpcji elektrony konwertera zostaną wzbudzone (rys.2), to znaczy przeniesione z stanu podstawowego (S_0) do stanu wzbudzonego (S_1).

Żaden elektron nie może przebywać w stanie wzbudzonym w nieskończoność. Stara się, jak każdy układ fizyczny, uzyskać minimum energii. Pozbywa się nadmiaru energii.

Zależnie od usytuowania przestrzennego orbitali molekularnych w substancji konwertującej promieniowanie, nadmiar energii zgromadzony w elektronie wzbudzonym może być rozproszony różnymi sposobami, najbardziej typowe z nich to:

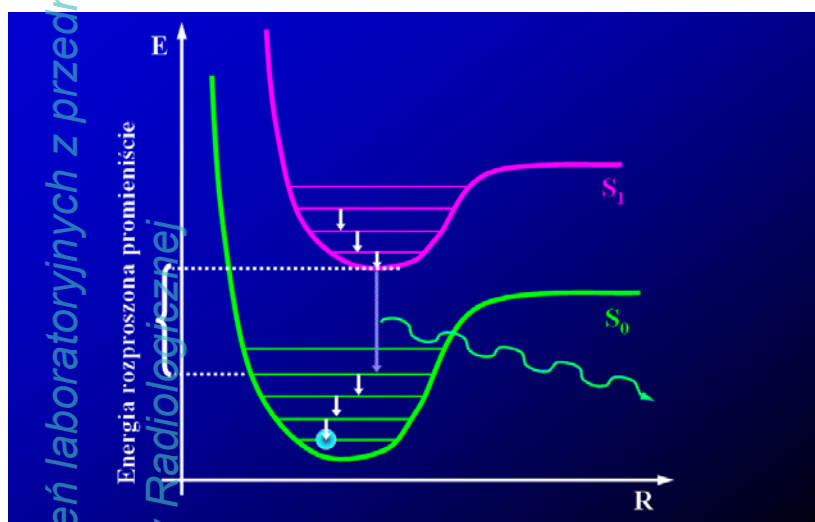
- fluorescencja,
- konwersja bezpromienista,
- fluorescencja opóźniona.

Jeżeli substancja konwertująca promieniowanie ma wyraźnie rozdzielone orbitale podstawowy (S_0) i wzbudzony (S_1) rozproszenie energii wzbudzenia zachodzi w procesie fluorescencji (rys.3).

Elektron wzbudzony by osiągnąć stan energetycznie stabilny (minimum S_0) przechodząc przez kolejne dopuszczone kwantowo stany energetyczne poziomu S_1 (białe strzałki, rys.3) rozprasza w małych porcjach energię w postaci ciepła. Gdy uzyska energię odpowiadającą minimum stanu (S_1) oddaje dużą część posiadanej energii i przechodzi na jeden z kwantowo dopuszczalnych stanów energetycznych poziomu (S_0). Energia rozpraszana w czasie przejścia pomiędzy minimum stanu (S_1) a stanem (S_0) jest emisją kwantu promieniowania świetlnego (zielona sinusoida, rys.3).

Mówimy, że dochodzi do promienistego rozproszenia energii.

Elektron, który w wyniku tego przejścia znalazł się na jednym z poziomów kwantowych stanu (S_0) dążąc do uzyskania stanu o najniższej możliwej energii przechodzi pomiędzy kolejnymi poziomami stanu (S_0) rozpraszając w postaci ciepła, posiadany jeszcze nadmiar energii. Wędrowka elektronu praktycznie nigdy się nie kończy, nie uzyskuje energii odpowiadającej minimum stanu (S_0), osiąga jedynie poziom równowagi termicznej układu (konwertera) i otoczenia.

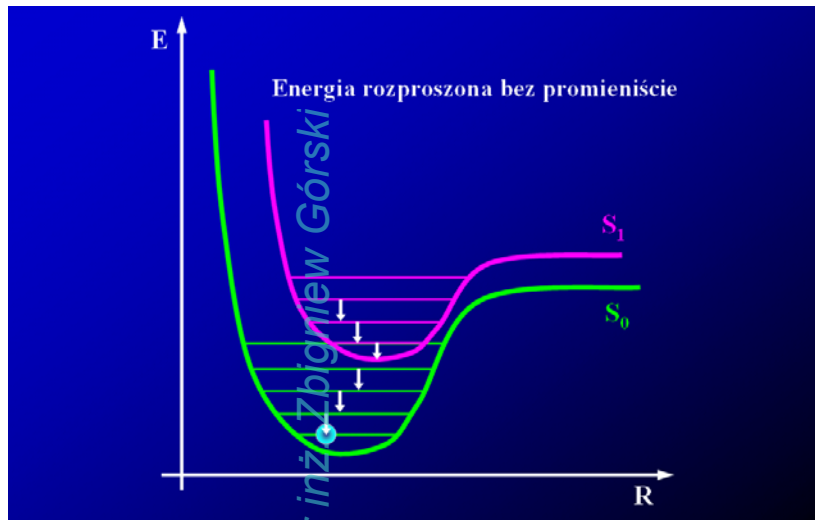


Rys.3. Mechanizm rozproszenia energii wzbudzenia w procesie fluorescencji

Ponieważ część energii wzbudzenia jest rozpraszana w postaci promieniowania cieplnego, energia rozpraszana jako promieniowanie świetlne w procesie fluorescencji jest mniejsza niż energia zaabsorbowana w procesie wzbudzenia elektronu. Długość fali promieniowania fluorescencyjnego jest większa od długości fali promieniowania rozpoczynającego cykl procesów zachodzących w konwerterze promieniowania (długości fali promieniowania jonizującego).

Opisany model rozpraszania energii jest obserwowany zwykle w czystych substancjach i w roztworach.

W przypadku, gdy poziomy energetyczne stanów podstawowego (S_0) i wzbudzonego (S_1) częściowo się nawarstwiają (pokrywają) zmienia się mechanizm procesu rozproszenia energii wzbudzenia elektronu (rys.4).



Rys.4. Mechanizm rozproszenia energii wzbudzenia elektronu w procesie bezpromienistym.

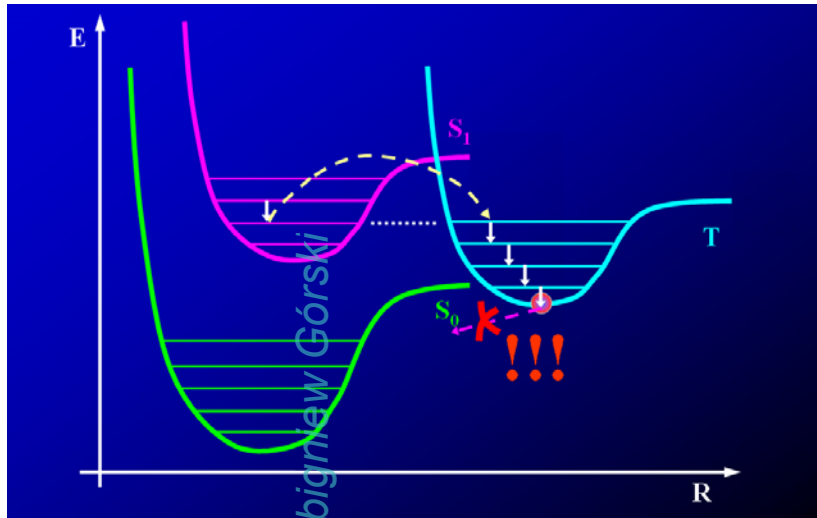
Wzbudzony elektron przechodząc przez kolejne dozwolone kwantowo poziomy stanów (S_1) i (S_0) rozprasza małe porcje energii w postaci ciepła aż do uzyskania energii odpowiadającej równowadze termicznej układu i otoczenia.

Jeżeli substancja konwertująca promieniowanie posiada poza opisanymi wyżej stanami (S_0) i (S_1) dodatkowy stan energetyczny, trypletowy (celowo wprowadzona domieszka lub zanieczyszczenie) obserwujemy kolejną zmianę mechanizmu rozproszenia energii wzbudzenia elektronu.

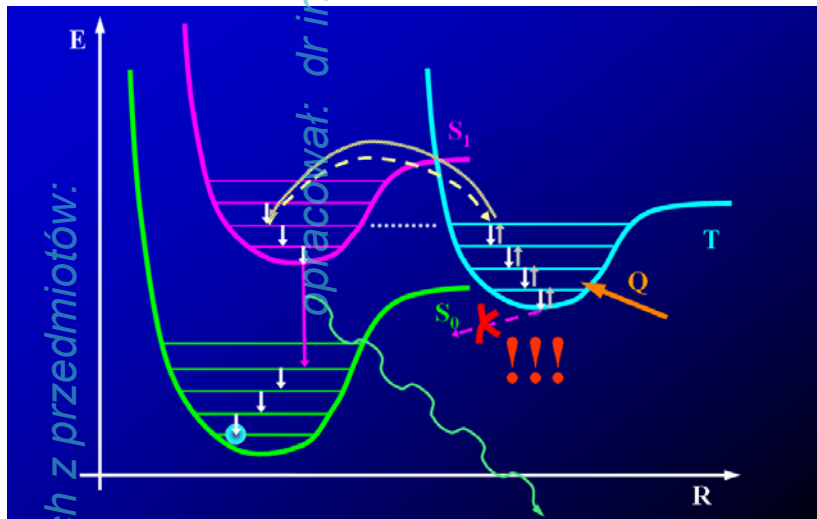
W pierwszym etapie rozpraszania energii wzbudzenia (rys.5), elektron oddaje (rozprasza) małe porcje energii w postaci ciepła przechodząc na niższe poziomy stanu (S_1), gdy energia elektronu obniży się do najwyższego z poziomów stanu trypletowego (T) może nastąpić przeniesienie interkombinacyjne elektronu (S_1) \rightarrow (T). Teraz, dążąc do uzyskania minimum energii, elektron porusza się po kolejnych poziomach stanu trypletowego rozpraszając energię w postaci ciepła. Po uzyskaniu energii odpowiadającej minimum energii stanu trypletowego z powodu zakazu Pauliego nie może dojść do przejścia promienistego (T) \rightarrow (S_0). Opisany układ pozostaje w dynamicznym stanie nie zrównoważenia energetycznego, a to znaczy, że może absorbować lub rozpraszać energię. Elektron, który „znalazł się” w minimum stanu trypletowego musi zaabsorbować energię (np. w postaci ciepła Q) i „wrócić” do stanu (S_1), z którego możliwe jest rozproszenie promieniste towarzyszące przejściu (S_1) \rightarrow (S_0) i następujące po nim rozproszenie energii w postaci ciepła prowadzące do uzyskania równowagi energetycznej (termicznej) układu (rys.6).

Pojawienie się w mechanizmie rozpraszania energii stanu trypletowego wydłuża czas rozpraszania energii.

Mechanizm rozpraszania energii wzbudzenia z wykorzystaniem stanu trypletowego obserwujemy w monokryształach, w których na etapie hodowli kryształu wprowadzono aktywatory dostarczające nieobecnych w czystym (niedomieszkowanym) monokryształ stanów trypletowych. Przykładem tego typu monokryształu detekcyjnego jest jodek sodu aktywowany talem. Monokryształ detekcyjny (scyntylator krystaliczny) zapisujemy wzorem NaJ(Tl).

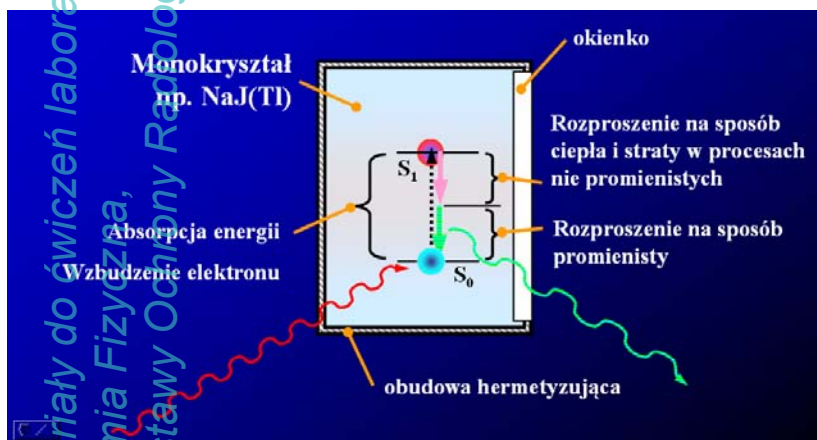


Rys.5. Mechanizm rozproszenia energii wzbudzenia z udziałem stanu trypletowego.



Rys.6. Mechanizm rozproszenia energii wzbudzenia w procesie fluorescencji opóźnionej.

Ponieważ NaJ(Tl) jest higroskopijny musi być zamknięty w szczelnej obudowie, chroniącej go przed dostępem wilgoci z powietrza (rys. 7).



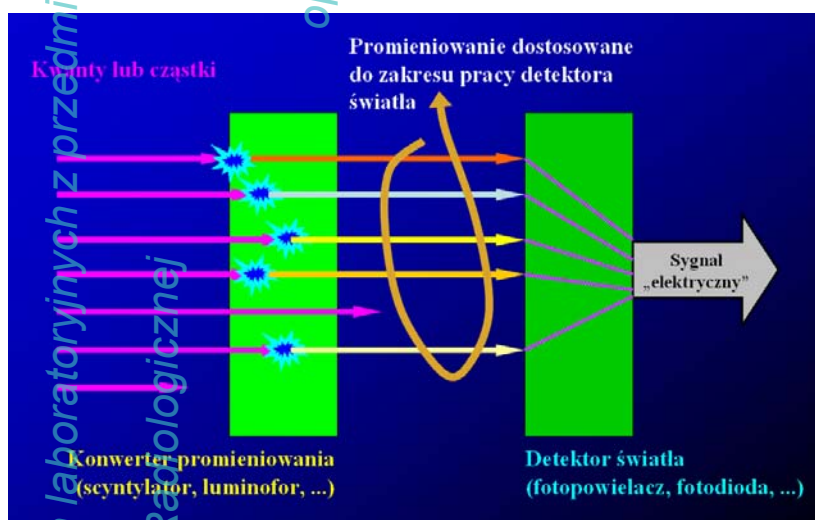
Rys. 7. Ogólny schemat budowy krystalicznego detektora scyntylacyjnego i zachodzących w nim procesów.

Zwykle, zewnętrzna (narażona na światło) część obudowy wykonana jest z aluminium, co skutecznie eliminuje wzbudzenie elektronów scyntylatora światłem. Okienko, przez które wyprowadzamy światło emitowane przez scyntylator do detektora światła wykonana jest z pleksi lub kwarcu. Światłoszczelność zewnętrznej części detektora scyntylacyjnego pozwala na obserwację emisji światła będącego efektem rozpraszania energii wzbudzenia elektronów wzbudzonych jedynie na drodze oddziaływania z promieniowaniem jonizującym. Szczelne osłonięcie scyntylatora warstwą metalu pozwala również na łatwą obserwację rozbłysków luminescencyjnych – natężenie emisji scyntylacji jest o kilka rzędów mniejsze od natężenia światła dziennego.

Obecnie stosowane technologie pomiarowe zawsze dążą do zamiany informacji pomiarowej na dobrze mierzalne wielkości elektryczne. Ta zasada jest również stosowana w konstrukcji licznika scyntylacyjnego.

Opisane na wcześniejszych stronach procesy pozwalają wprowadzić na przekształcenie niedostępnej dla naszych zmysłów informacji o energii promieniowania jonizującego na światło, jednak światło uzyskiwane ze scyntylatora ma bardzo małe natężenia, a uzyskiwane długości fali emisji leżą w obszarze światła ultrafioletowego i skraju światła niebieskiego $\lambda = 200 \div 450 \text{ nm}$. Światło takie jest praktycznie niewidoczne dla oka. Można je zobaczyć gołym okiem w ciemni jako bladoniebieską poświatę, patrząc na poruszany scyntylator, po ok. 3 godzinnej adaptacji oka.

Obserwowany okiem scyntylator byłby nienajlepszym sygnalizatorem i nie nadawałby się do mierzenia promieniowania jonizującego. By temu zaradzić musimy, w miejsce fantastycznego, ale nie radzącego sobie w tak skrajnych warunkach detektora światła, jakim jest oko ludzkie, wprowadzić wysokoczuły detektor elektroniczny, który dostarczy nam informacji w postaci sygnału elektrycznego (rys. 8).



Rys. 8. Schemat ilustrujący ideę konwersji energii promieniowania jonizującego na dobrze mierzalny sygnał elektryczny w licznikach scyntylacyjnych promieniowania jonizującego.

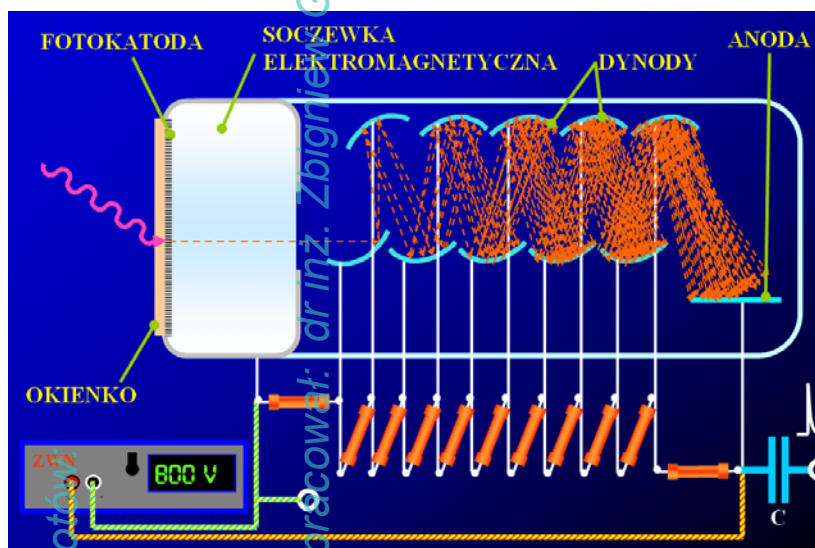
W budowanych i eksploatowanych obecnie licznikach scyntylacyjnych jako detektory światła stosuje się rutynowo fotopowielacze. W urządzeniach specjalnych (technologia wojskowa i satelitarna), naukowych i medycznych (metody obrazowania rozkładu powierzchniowego dawek promieniowania i stężenia radioizotopów) często obok klasycznych fotopowielaczy stosuje się matryce fotodiod lawinowych i mikrokanalikowe detektory promieniowania.

Liczniki scyntylacyjne stosowane w zestawach pomiarowych na naszej pracowni zbudowane są w oparciu o fotopowielacze. Fotopowielacz jest lampą elektronową stanowiącą bardzo czuły detektor światła. Obecnie dostępne są w handlu fotopowielacze pokrywające cały

zakres promieniowań świetlnych od ultrafioletu próżniowego po podczerwień. Nie buduje się fotopowielaczy pokrywających cały zakres widmowy. Zwykle stosuje się inne fotopowielacze dla promieniowań z zakresu:

- ultrafiolet próżniowy do widzialnego,
- ultrafiolet do widzialnego,
- widzialny bez podczerwieni (dla scyntylicji),
- widzialny do podczerwieni.

Poszczególne konstrukcje zbudowane są tak samo (rys. 9), różnice wynikają z stosownych materiałów optycznych i materiału stosowanego na fotokatodę.



Rys. 9. Schemat budowy i działania fotopowielacza.

Fotopowielacz jest to zespół odpowiednio dobranych, ukształtowanych i ustawionych przestrzennie elektrod, zamkniętych w szklanej obudowie wyposażonej w okienko wejściowe wykonane z materiału przepuszczającego wybrane długości fal promieniowania świetlnego (rys. 9). Wewnątrz obudowy panuje próżnia. Na wewnętrznej części okienka wejściowego naparowana jest pierwsza elektroda (fotokatoda). Jest to kilkumikrometrowa warstwa półprzewodnika lub mieszaniny metali alkalicznych. Materiał fotokatody jest dobrany tak by łatwo oddziaływał z mierzonym promieniowaniem świetlnym tzn. uwalniał elektrony w procesie fotoelektrycznym zewnętrznym.

Kolejną częścią fotopowielacza jest soczewka elektromagnetyczna, której zadaniem jest zogniskowanie i ukierunkowanie strumienia fotoelektronów na pierwszą dynodę.

Za obszarem soczewki elektromagnetycznej znajduje się zespół elektrod pomocniczych (dynod), a za nimi anoda. Kierunek przepływu elektronów od fotokatody przez soczewkę elektromagnetyczną, dynody do anody jest wymuszony przez stopniowo zmieniający się potencjał kolejnych części składowych fotopowielacza. Wielkość potencjału przyłożonego do poszczególnych elektrod jest wyznaczana poprzez dzielnik oporowy dołączony do zasilacza wysokiego napięcia (ZWN) i odpowiednich elektrod.

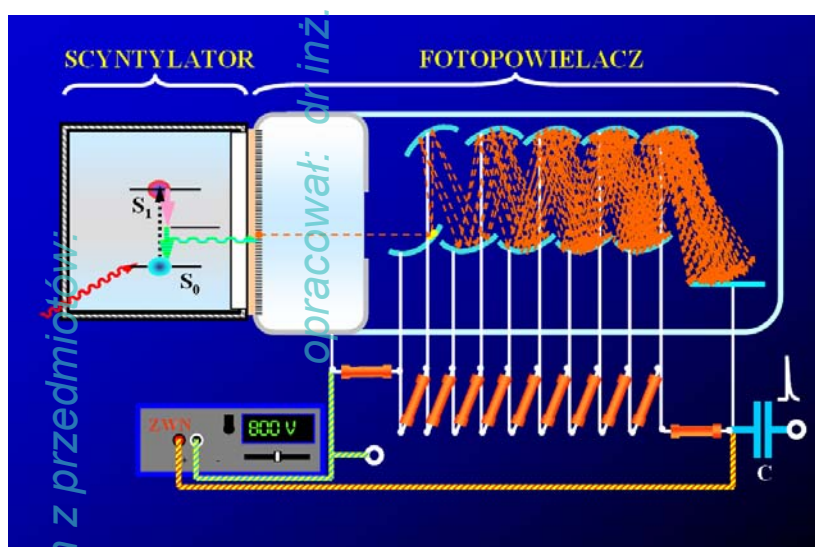
Mierzone światło (kwant promieniowania świetlnego) przechodzi przez materiał okienka wejściowego i oddziaływuje z materiałem fotokatody. Wynikiem tego oddziaływania jest uwolnienie w procesie fotoelektrycznym zewnętrznym fotoelektronu.

Fotoelektrony są ogniskowane przez soczewkę elektromagnetyczną na powierzchni pierwszej dynody.

Dynody wykonane są z materiału o małej pracy wyjścia tzn. z materiału, który pochłania elektrony bombardujące jego powierzchnię a ich energię spożytkowuje na uwolnienie z własnej struktury kilku elektronów o niższej energii.

Załóżmy, że dynody naszego fotopowielacza po uderzeniu ich jednym elektronem uwalniają trzy inne. Jeżeli tak jest to jeden fotoelektron skierowany na pierwszą dynodę uwolni z niej trzy inne elektrony, te z kolei zostaną przyspieszone w polu elektrycznym panującym między pierwszą a drugą dynodą i po uderzeniu w nią uwolnią z drugiej dynody dziewięć elektronów. Proces ten będzie się powtarzał na każdej kolejnej dynodzie, dzięki czemu pojedynczy kwant promieniowania świetlnego będzie rejestrowany na anodzie fotopowielacza jako impuls prądowy reprezentowany przez 3^n elektronów (gdzie n – liczba dynod w fotopowielaczu). Ponieważ w opisywanej lampie elektronowej dochodzi do powielenia liczby obserwowanych elektronów – jeden fotoelektron jest zamieniany na 3^n elektronów – nazywamy ją fotopowielaczem elektronowym.

Teraz, gdy rozumiemy mechanizmy rozpraszania energii wzbudzenia elektronów scyntylatora prowadzące do emisji kwantu światła i rozumiemy mechanizm zamiany energii kwantu światła na prąd elektryczny w fotopowielaczu możemy zbudować detekcyjną sondę scyntylacyjną. Sonda taka stanowi połączenie kryształu scyntylacyjnego (detektora promieniowania jonizującego) i detektora światła (rys. 10).



Rys. 10. Schemat budowy detekcyjnej sondy pomiarowej promieniowania jonizującego i jej mechanizm działania (opis w tekście).

Zastosowany w opisie mechanizmu powielania elektronów współczynnik powielenia materiału dynody nie jest w rzeczywistości wielkością stałą, zależy od wielkości zaabsorbowanej energii (energii elektronu uderzającego w dynodę). Wykorzystanie tego faktu pozwala nam nie tylko na liczenie kolejnych kwantów promieniowania jonizującego docierających do scyntylatora, ale i na pomiar ich energii.

Informacja fakcie rejestracji kwantu promieniowania jest reprezentowana jako impuls elektryczny na wyjściu scyntylacyjnej sondy detekcyjnej promieniowania jonizującego, informacja o energii rejestrowanego promieniowania zawarta jest w wysokości rejestrowanego impulsu.

Opisana tu scyntylacyjna sonda detekcyjna promieniowania jonizującego jest obecnie najbardziej uniwersalnym urządzeniem do detekcji promieniowania jonizującego. Zmieniając, w zawsze tak samo zbudowanej sondzie, jedynie scyntylator możemy dopasować ją do pomiarów każdego z znanych obecnie promieniowania jonizującego.