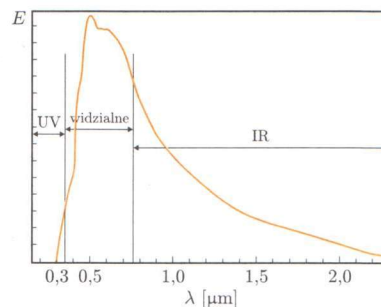


Aby nie widzieć Słońca... czyli detektory ultrafioletu

Aneta DRABIŃSKA

Słońce to źródło energii dla wszystkich procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych zachodzących na Ziemi oraz w jej atmosferze, a jego promieniowanie jest najważniejszym czynnikiem środowiskowym na Ziemi. Wysyła ono w przestrzeń międzyplanetarną promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie fal rentgenowskich (X), promieniowania ultrafioletowego (UV), widzialnego (VIS), podczerwonego (IR), aż do fal radiowych. Ze względu na pochłanianie promieniowania przez atmosferę, do powierzchni Ziemi dochodzi tylko część z tego promieniowania obejmująca część ultrafioletu (powyżej 290 nm), promieniowanie widzialne (400 nm–780 nm) i podczerwone (780 nm–1 mm), aż do fal radiowych (30 cm–100 km) (rys. 1).



Rys. 1. Widmo promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi z zaznaczonymi długościami fali odpowiadającymi promieniowaniu ultrafioletowemu, widzialnemu i podczerwonemu.

Promieniowanie ultrafioletowe ze względu na oddziaływanie chemiczne i biologiczne dzieli się na:

- nadfiolet próżniowy (10–200 nm),
- daleki ultrafiolet UV-C (200–280 nm),
- średni ultrafiolet UV-B (280–315 nm),
- bliski ultrafiolet UV-A (315–400 nm).

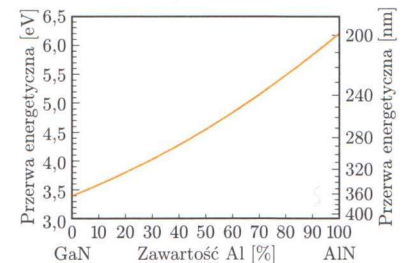
Istnieje dość duże zapotrzebowanie na detektory promieniowania ultrafioletowego, które jednocześnie byłyby nieczułe na promieniowanie widzialne (detektory *visible-blind*), czy w ogóle na promieniowanie słoneczne (detektory *solar-blind*). Wyobraźmy sobie taki detektor wbudowany w zegarek. W czasie wycieczki na plażę byłibyśmy w stanie kontrolować, kiedy promieniowanie UV przekroczy bezpieczny dla nas próg i w odpowiednim czasie moglibyśmy się schronić w cień, unikając nieprzyjemnych (i bardzo niezdrowych) poparzeń. W przypadku takiego detektora konieczna jest detekcja pochodzącego od Słońca promieniowania UV, a nie całkowitego promieniowania słonecznego, gdyż, jak wiadomo, to właśnie promieniowanie UV niszczy naszą skórę, a ze względu na dziurę ozonową jego ilość zmienia się w zależności od zanieczyszczeń i innych czynników. Mało tego – dobrze byłoby, żeby taki detektor reagował tylko na promieniowanie UV-B, a nie na UV-A, gdyż to właśnie UV-B jest szkodliwe dla naszej skóry. Poza tym bardzo wiele obiektów na Ziemi (niekoniecznie naturalnych) wysyła promieniowanie, którego maksimum przypada właśnie w ultrafiolecie. Bardzo ważne zastosowanie detektorów nieczułych na światło słoneczne, a czułych na ultrafiolet, można znaleźć w wojsku. Jedną z podstaw obrony narodowej wielu krajów jest skanowanie nieba w poszukiwaniu nadlatujących pocisków czy innego ataku powietrznego. Tak się składa, że rozkład widmowy promieniowania takiego pocisku czy rakiety rozciąga się na ultrafiolet, jednak ze względu na obecność silnego promieniowania słonecznego bardzo trudno jest „zauważyć” takie obiekty w czasie dnia na tle nieba. A obserwacje nocą są, po pierwsze, nie zawsze wygodne, a po drugie, niewystarczające. Z tego też powodu armie niektórych krajów (polska również) uruchomiły programy naukowe, których celem jest znalezienie i opracowanie metody produkcji dobrych detektorów *solar-blind*.

Skoro wiemy już, do czego mogą się przydać takie detektory, najwyższy czas zastanowić się, w jaki sposób można je skonstruować i jaki materiał będzie miał szanse się sprawdzić w takich zastosowaniach. Dobrym kandydatem wydaje się półprzewodnik – azotek galu z aluminium ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$). Jego przerwa energetyczna zmienia się w zależności od zawartości aluminium.

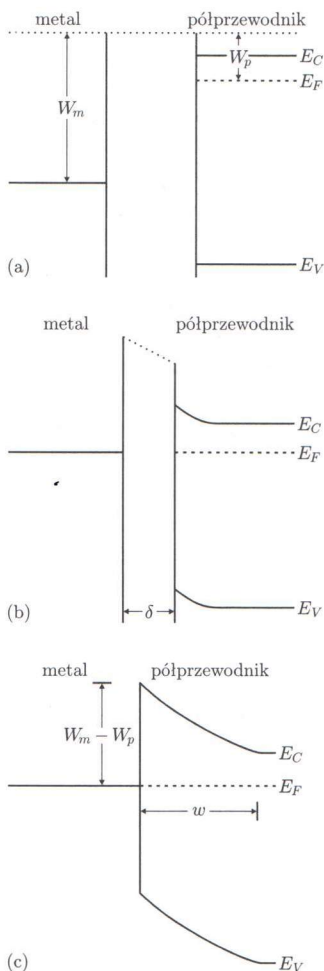


W kryształach pasma energetyczne przedstawiają dostępne stany elektronowe. W temperaturze 0 K niektóre z tych stanów są obsadzone elektronami, a inne są puste. Ostatnie całkowicie wypełnione pasmo energetyczne (*pasmo walencyjne* – E_V) jest oddzielone od pierwszego całkowicie pustego pasma (*pasmo przewodnictwa* – E_C) *przerwą energetyczną*. To właśnie wartość przerwy energetycznej półprzewodnika odpowiada za to, jakiej długości promieniowanie półprzewodnik pochłania.

W przypadku czystego azotku galu (GaN) przerwa energetyczna wynosi 3,4 eV (co odpowiada długości fali około 365 nm), co oznacza, że dla światła o długości fali większej niż 365 nm jest on przezroczysty, natomiast pochłania on w pełni światło o fali krótszej niż 365 nm. Wraz z zastępowaniem coraz większej ilości atomów galu atomami aluminium przerwa energetyczna tego półprzewodnika zwiększa się (to znaczy zmniejsza się długość fali, którą taki materiał pochłania), tak że dla czystego azotku aluminium (AlN) wynosi ona 6,2 eV (około 200 nm). Zachowanie przerwy energetycznej $Al_xGa_{1-x}N$ w zależności od składu ilustruje rysunek 2. Półprzewodnik ten wydaje się więc idealnym kandydatem na detektor ultrafioletu, gdyż jest on przezroczysty dla światła widzialnego (idealny detektor *visible-blind*), natomiast w przypadku odpowiednio wysokiej zawartości aluminium (powyżej 40%) może być on również przezroczysty dla całego spektrum światła słonecznego (detektor *solar-blind*).



Rys. 2. Zależność przerwy energetycznej $Al_xGa_{1-x}N$ w zależności od zawartości Al. Na lewej osi wartość przerwy energetycznej została podana w elektronowoltach, natomiast prawa oś przedstawia odpowiadającą jej długość fali (w nanometrach).



Rys. 3. Powstawanie pola elektrycznego w warstwie zubożonej podczas kontaktu metalu i półprzewodnika o różnych pracach wyjścia.

Jak można zrealizować taki detektor? Jedną z metod jest napylenie półprzezroczystej elektrody metalowej na półprzewodnik. W przypadku kontaktu metalu z półprzewodnikiem poziomy Fermiego tych dwóch materiałów po ustaleniu się stanu równowagi muszą być takie same.

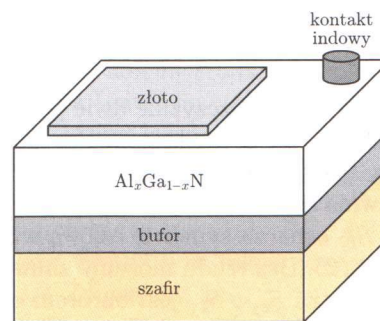
Poziomy Fermiego (E_F) oznacza taką energię, że w temperaturze 0 K wszystkie stany o energii niższej od E_F są obsadzone, a wszystkie stany o energii wyższej od E_F są puste. Oczywiście, w temperaturach wyższych od zera bezwzględnej energia elektronów podlega rozkładowi statystycznemu i mogą one mieć energię wyższą niż energia Fermiego. Tak więc im temperatura wyższa, tym więcej stanów powyżej poziomu Fermiego jest obsadzonych (i jednocześnie tyle samo stanów poniżej poziomu Fermiego jest pustych).

Rysunek 3 przedstawia sposób ustalania się takiej równowagi. W pierwszym momencie (rys. 3a) metal i półprzewodnik nie są w kontakcie. Po połączeniu tych dwóch materiałów nastąpi przepływ ładunku z półprzewodnika do metalu (rys. 3b), tak że w stanie równowagi poziomy Fermiego w półprzewodniku obniży się w porównaniu do poziomu Fermiego w metalu o wartość równą różnicy prac wyjścia (W_m i W_p) tych dwóch materiałów (rys. 3c). Jeżeli prace wyjścia będą różne, w pewnej przypowierzchniowej warstwie półprzewodnika (na rysunku 3c oznaczonej przez w) powstanie pole elektryczne. Ze względu na pole elektryczne wszelkie swobodne nośniki, znajdujące się w tej warstwie, zostaną natychmiast rozseparowane (dlatego warstwę tę nazywamy warstwą zubożoną). Po oświetleniu półprzewodnika światłem, które zostanie w nim zaabsorbowane, w warstwie tej wytworzą się pary nośników elektron-dziura, które właśnie dzięki polu elektrycznemu zostaną natychmiast rozseparowane i dadzą przepływ prądu pomiędzy półprzewodnikiem a metalem. Kontakt taki nazywamy kontaktem Schottky'ego. Dobrym metalem, który daje kontakt Schottky'ego dla $Al_xGa_{1-x}N$, jest złoto.

Detektory uzyskuje się przez wyhodowanie metodami epitaksjalnymi cienkich (o grubości od kilkudziesięciu nanometrów do kilku mikronów) warstw $Al_xGa_{1-x}N$ na różnych podłożach.

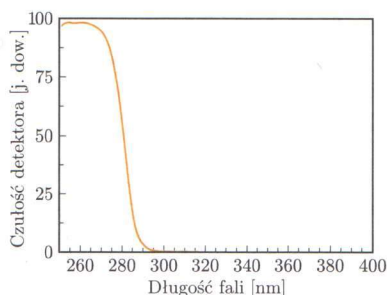
W ostatnich latach zostały opracowane metody hodowania półprzewodników pozwalające na nanoszenie po kolei poszczególnych warstw atomowych danych półprzewodników. Są to tzw. *metody epitaksjalne*. Dzięki nim podczas procesu wzrostu półprzewodników stało się możliwe dokładne sterowanie grubością poszczególnych warstw, a także hodowanie praktycznie dowolnie skomplikowanych struktur.

Obecnie ze względu na dość dobre dopasowanie jego struktury krystalicznej do struktury krystalicznej azotków i w miarę niską cenę najczęściej jako podłoże do $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ stosuje się szafir. Budowa detektora, który może posłużyć jako detektor *solar-blind* lub *visible-blind* (w zależności od tego, jaka zawartość Al będzie w warstwie $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$), została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Budowa detektora ultrafioletu.

Na podłożu szafirowym zostaje wyhodowany bufor, którego celem jest jak najlepsze dopasowanie struktury krystalicznej pod ostateczną warstwę $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, tak aby była ona jak najlepszej jakości. Na buforze tym zostaje wyhodowana docelowa warstwa $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ o składzie odpowiednim do wybranego detektora. Następnie na warstwie zostaje napylna cienka półprzezroczysta warstwa złota (o grubości około 10 nm) oraz naniesiony zostaje drugi kontakt. Dzięki temu, jeśli na warstwę złota zostanie skierowane światło, które następnie zostanie pochłonięte w półprzewodniku, pomiędzy tymi dwoma kontaktami zacznie płynąć prąd. Czułość wykonanego w ten sposób detektora o składzie dobranym tak, aby był to detektor *solar-blind*, została przedstawiona na rysunku 5. Można tutaj zobaczyć, że dla światła o długości fali większej od 290 nm detektor jest kompletnie nieczuły, natomiast oświetlenie światłem o długości fali 290 nm lub krótszej powoduje popłynięcie prądu pomiędzy kontaktami i daje sygnał na detektorze.

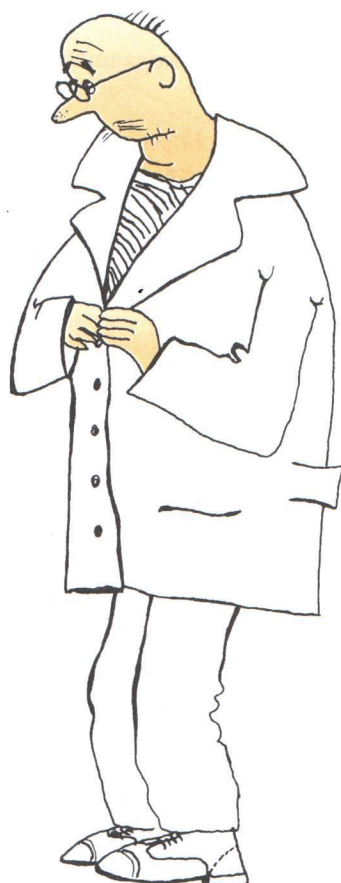


Rys. 5. Czułość detektora „solar-blind” jako funkcja długości fali.

Jak na razie detektory takie powstają w laboratoriach i są ciągle na etapie badań naukowych, których celem jest optymalizacja detektorów na każdym możliwym etapie – poczynając od samej metody hodowania detektorów (dobieranie różnych metod epitaksjalnych i buforów, tak aby były to warstwy najwyższej jakości), poprzez wybieranie odpowiedniej struktury (okazuje się, że udoskonalenie i rozszerzenie takiej prostej struktury np. do struktury *pin* może prowadzić do większej wydajności detektora), a kończąc na wyborze odpowiednich kontaktów (różnych w zależności od tego, jaka struktura zostanie ostatecznie wybrana).

Struktura typu *pin* oznacza strukturę, w której zostają wyhodowane po kolei następujące warstwy: półprzewodnik typu *p* (w którym nośnikami są dziury), izolator oraz półprzewodnik typu *n* (w którym nośnikami są elektrony).

Jednak wydaje się, że jesteśmy coraz bliżej wprowadzenia tych urządzeń do produkcji masowej i obniżenia ich ceny, co sprawi, że staną się one przydatne nie tylko do zastosowań militarnych czy naukowych, ale również do codziennego użytku. Kto wie, może opisany na początku przykład detektora promieniowania UV-B umieszczonego w zegarku nie jest taki abstrakcyjny i za kilka lat będzie on tak samo popularny, jak teraz czerwone wskaźniki laserowe, które w końcu przeszły taką samą drogę, tylko parę lat wcześniej. . .



Rozwiązanie zadania M 1076.

Przy obrocie trójkąta ABC wokół punktu A o kąt 60° , w którym punkt C przechodzi na punkt E , punkt B przechodzi na punkt D (rys.). Zatem $ED = BC = CF$.

Analogicznie dowodzimy, że $DF = EC$. Stąd wniosek, że czworokąt $ECFD$ jest równoległobokiem.

Ponadto $\angle CED = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$.

Oznaczając przez H rzut prostokątny punktu C na bok ED , otrzymujemy $2HC = EC = AC$.

Stąd $\text{pole}(ABC) = \frac{1}{2} \cdot AC \cdot BC = HC \cdot ED = \text{pole}(ECFD)$.

