

Badanie własności półprzewodnikowych diod świecących

Ryszard Kostecki

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Streszczenie

Praca ta zawiera przedstawienie i analizę wyników przeprowadzonego przeze mnie na drugiej pracowni fizycznej doświadczenia, celem którego było zbadanie właściwości półprzewodnikowych diod świecących pod względem ich charakterystyki prądowo-napięciowej, oraz widma światła przez nie emitowanego.

Układ doświadczalny

Charakterystykę prądowo-napięciową diod wykonałem przy pomocy zmontowanego przeze mnie układu zawierającego źródło prądu, diodę i woltomierz połączone równolegle, oraz amperomierz podłączony szeregowo.

Główny układ doświadczalny składał się ze spektrometru opartego na linijce CCD, zamontowanego na karcie podłączonej do komputera, oraz opisanego wyżej układu do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej. Przy pomocy zainstalowanego na komputerze oprogramowania (OOIBase32 v.1.0.2 firmy Ocean Optics) dokonywałem pomiarów widma światła emitowanego przez diody.

Przebieg pomiaru

1. Pomiar widma światła emitowanego przez żarówkę halogenową (światło emitowane z niej zostało użyte następnie do oświetlania papierków).
2. Pomiar widma światła odbitego i transmitowanego przez kilka różnych kolorowych papierków: granatowego, jasnoniebieskiego, żółtego, różowego i czerwonego.
3. Pomiar widma światła transmitowanego przez dwa otwory o małej (i różnej) średnicy.
4. Pomiar widma światła transmitowanego przez dwa półprzewodniki (GaAs i GaP) zainstalowane na otworach wymienionych w pkt. 3.
5. Pomiar widma światła emitowanego przez kilka różnych diod świecących: żółtą, zieloną, niebieską i czerwoną, w zależności od mocy dostarczanej do diody.
6. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diod wymienionych w pkt. 5.

Wszystkie powyższe pomiary były wykonywane w maksymalnym osiągalnym zaciemnieniu pomieszczenia laboratoryjnego, jednakowoż w celu lepszego wyeliminowania wpływu otoczenia (zwł. światła emitowanego przez monitor komputerowy) przed każdym pomiarem widma wykonywany był pomiar widma ciemności, tj. widma tła.

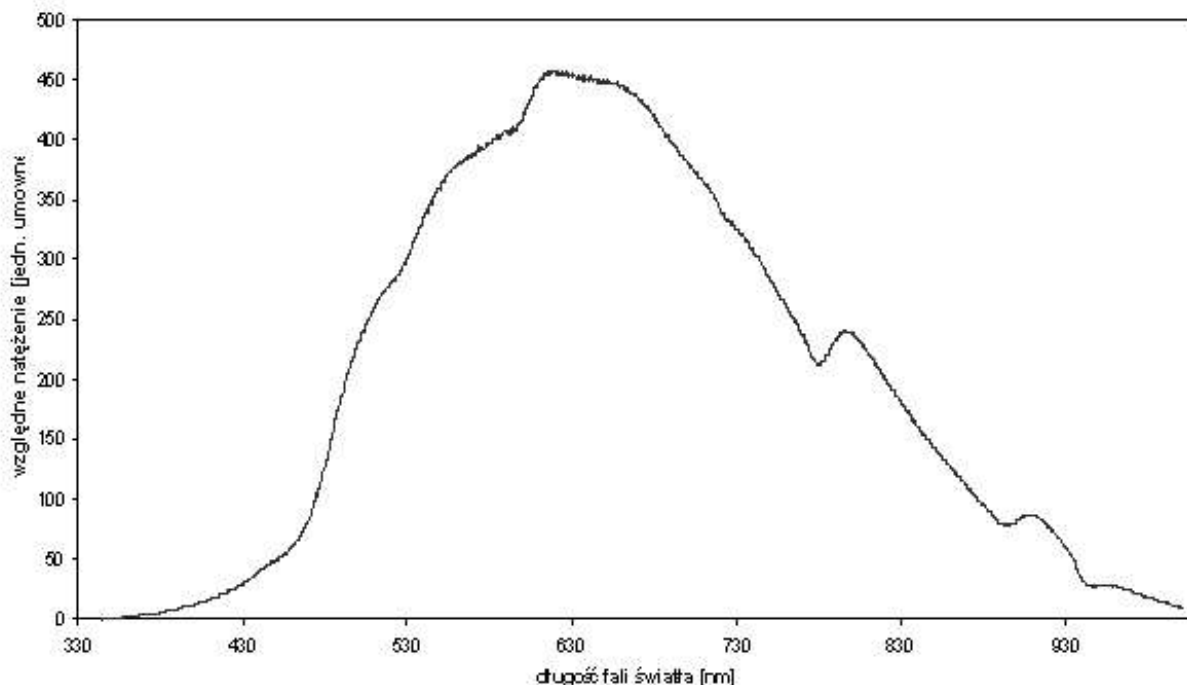
Wyniki pomiarów

Na rysunku 1 przedstawiłem wynik pomiaru¹ widma światła padającego na papierki. Na rysunkach 2.X przedstawiłem wyniki pomiarów widma światła odbitego i transmitowanego przez papierki. Rysunki 2.Xa przedstawiają widmo rzeczywiście zmierzone (zatem również docierające do oka), zaś rysunki 2.Xb przedstawiają stosunek tego widma do widma światła padającego (tj. pokazują *zmiany* w widmie światła wywołane przez obecność papierka). Na niektórych wykresach przedstawiono widmo o szerokości nieco skróconej (względem faktycznie zmierzonego), ze względu na zbyt dużą ilość szumów na tych kanałach, które zostały pominięte na rysunku.

Na rysunku 3a przedstawiłem widmo światła transmitowanego przez półprzewodniki (GaAs i GaP), zaś na rysunku 3b przestawiłem to widmo podzielone przez widmo światła padającego na półprzewodnik.

Na rysunkach 4.X przedstawiłem widmo światła emitowanego przez świecące diody półprzewodnikowe w zależności od mocy do nich dostarczonej. Na rysunkach 5.X przedstawiłem wykres całkowitego wypromieniowanego natężenia światła (czyli całki pod wykresem widma) w zależności od mocy dostarczonej do diod. Na rysunkach 6.X przedstawiłem charakterystyki prądowo-napięciowe dla tych diod. Pierwszy punkt na wykresie każdej z charakterystyk prądowo-napięciowych (licząc od lewej strony) jest jednocześnie pierwszym pomiarem o niezerowej (a dającej się zmierzyć posiadanymi urządzeniami) wartości prądu płynącego przez diodę. Wyniki pomiarów charakterystyki prądowo-napięciowej diod oraz wyniki pomiarów ich widm przedstawione są dla prądów płynących w kierunku przewodzenia. Dla prądów płynących w kierunku zaporowym odpowiedź układu (widmo, prąd) była równa zero. Charakterystyki prądowo-napięciowe przedstawione są na skali półlogarytmicznej, gdzie zlogarytmizowaniu poddana została oś pionowa.

Rysunek 1
Widmo światła padającego (emitowanego przez halogenową żarówkę)



¹ Wszystkie widma przedstawione są już po odjęciu widma promieniowania tła (laboratoryjnego).

Analiza wyników i wnioski

1. Widmo światła transmitowanego i odbitego od kolorowych papierków

Widmem przeskalowanym nazywać będę widmo światła transmitowanego lub odbitego od papierka podzielone przez widmo źródła emitującego to światło. Widmem zmierzonym będę nazywać widmo światła zarejestrowane w eksperymencie.

Jakościowa charakterystyka przeskalowanego widma światła transmitowanego dla każdego papierka z osobna nie różni się od przeskalowanego widma światła odbitego, co znaczy, że kształty tych widm są jakościowo takie same.

Poniżej opiszę kilka istotnych obserwacji dotyczących kształtów widm, ze szczególnym uwzględnieniem widma z obszaru światła widzialnego (od ok. 350nm do ok. 700nm), w celu skonfrontowania pojęcia wizualnego wrażenia koloru z tym, co mówi o tymże świetle fizyka.

Dla papierka granatowego w widmie zmierzonym światła transmitowanego widać piki: 450nm, 723nm. W widmie zmierzonym światła odbitego widać piki: 489nm i dalsze już w podczerwieni. W widmie przeskalowanym widać pik: 450nm oraz krzywą rosnącą od ok. 700nm. Długość fali 450nm rzeczywiście odpowiada w tablicy widm kolorowi granatowemu (bądź niebieskiemu, w zależności od intensywności światła).

Dla papierka jasnoniebieskiego w widmie zmierzonym światła odbitego widać piki: 518nm, 538nm, 650nm, 735nm. W widmie zmierzonym światła transmitowanego widać pik: 500nm i dalsze już w podczerwieni. W widmie przeskalowanym widać piki: 485nm, 650nm. Jest to ciekawe, bowiem obszar 480nm–540nm w na skali barw odpowiada różnym odcieniom koloru zielonego, natomiast 650nm to ewidentnie kolor czerwony. Należy zatem stwierdzić, że jest to przykład rozmiłowania się wrażenia koloru z fizyczną jego definicją.

Dla papierka żółtego w widmie zmierzonym światła odbitego i transmitowanego widać szeroki pik od ok. 510nm aż do podczerwieni. W widmie przeskalowanym brak jest pików, natomiast występuje istotny (drastyczny) wzrost natężenia światła w ok. 510nm, po czym takie wysokie natężenie utrzymuje się już do podczerwieni. Tutaj zatem również występuje rozmiłowanie się wrażenia koloru z jego fizyczną definicją: wrażenie koloru żółtego daje współwystępowanie kolorów zielonego, żółtego i czerwonego. Przy czym należy stwierdzić, że otrzymuje się wrażenie koloru żółtego, mimo, iż obszar widma przypisany kolorowi żółtemu (okolice 530nm–560nm) jest istotnie mniejszy od obszaru widma przypisanego kolorowi czerwonemu (> 560nm do okolic 700nm). Niejakie potwierdzenie tego zjawiska otrzymuje się w systemie barw RGB: kolorowi żółtemu odpowiada w nim zmieszanie koloru zielonego z czerwonym w maksymalnych natężeniach (odpowiednio: 255 i 255 z zakresu 0–255).

Dla papierka różowego w widmie zmierzonym światła odbitego i transmitowanego występuje szeroki pik od ok. 600nm do aż do podczerwieni, z maksimum ok. 660nm. W widmie przeskalowanym światła transmitowanego i odbitego sytuacja wygląda zupełnie inaczej: występuje istotny pik w 430nm, spadek, po czym szybki wzrost natężenia od ok. 580nm do ok. 630nm, po czym wysoka wartość natężenia utrzymuje się aż do podczerwieni. Zachodzi tu zjawisko podobne do przypadku papierka żółtego, przy czym obszar „sumowania się wrażenia po kolorach” następuje od 580nm (czyli od koloru pomarańczowego do podczerwieni), nie zaś od 510nm, oraz występuje dodatkowo pik w okolicach koloru granatowego (zgodnie ze skalą barw). I znowu potwierdzenie tego zjawiska można odnaleźć w skali kolorów RGB: kolorowi różowemu odpowiada bowiem w niej konfiguracja (222, 65, 218) natężeń kolorów czerwonego, zielonego i niebieskiego.

Dla papierka czerwonego w widmie zmierzonym światła odbitego i transmitowanego występuje nagły skok w okolicach 580nm, po czym bardzo duże natężenie (o maksimum w okolicach 650nm) utrzymuje się aż do podczerwieni. Dla widma przeskalowanego światła odbitego i transmitowanego również następuje drastyczny skok natężenia w okolicach 580nm, jednakowoż po tym skoku nie następuje spadek, nawet w podczerwieni. Dla papierka czerwonego występuje zatem zgodność wrażeń wzrokowych z fizycznym widmem.

Jak zinterpretować pojawiającą się selektywnie rozbieżność wrażeń koloru z fizyczną jego definicją? Spośród kilku teorii wyjaśniających widzenie barw przez oko ludzkie najpowszechniej uznana jest teoria trójskładnikowa, wyjaśniająca barwne widzenie istnieniem w oku trzech rodzajów receptorów – czopków (lub zawartej w nich substancji światłoczułej). Jedną z tych substancji – według autorów teorii – reaguje na światło czerwone, o długości fali 670nm, druga – na światło zielonożółte, o długości fali 525nm, trzecia – na światło fioletowe, o długości fali 460nm. W wyniku podrażnienia z różnym natężeniem jednego, dwu lub wszystkich rodzajów czopków przez fale światła o odpowiedniej długości – substancje te rozkładają się (cząsteczki chemiczne absorbują kwanty światła), a produkty ich rozkładu drażnią zakończenia nerwu wzrokowego. Podrażnienie, przenosząc się do ośrodka wzrokowego kory mózgowej, wywołuje tam wrażenie barwy. Każdy rodzaj czopków ma ponadto swoją charakterystykę absorpcji widma (zatem przykładowo 525nm trzeba raczej traktować jako maksimum piku absorpcji dla danego typu czopka, nie zaś jako jedyną absorbowaną przez ten czopkę energię). Dopiero wzajemna superpozycja tych charakterystyk daje wrażenie barwy, a superpozycja ta jest, jak wynika z dokonanych pomiarów, wysoce nietrywialna.

2. Widmo światła transmitowanego przez półprzewodniki GaAs oraz GaP

Na rysunkach 3a oraz 3b widać progowy skok widma światła transmitowanego przez te półprzewodniki. Miejsce skoku odpowiada szerokości przerwy energetycznej w tych półprzewodnikach, zgodnie ze wzorem: $E=hc/d$, gdzie h to (niekreślona) stała Plancka, c to prędkość światła, zaś d to długość fali światła (czyli miejsce na wykresie widma, w którym następuje skok).

Jak wynika z analizy wykresów, zmierzone miejsce skoku wynosi (530 ± 7.2) nm dla GaAs oraz (555.5 ± 7.4) nm dla GaP, co daje następujące wartości szerokości przerwy energetycznych: (2.341 ± 0.032) eV dla GaAs oraz (2.333 ± 0.031) eV dla GaP².

Podane w tablicach wartości szerokości przerwy energetycznych wynoszą 2.25eV dla GaP oraz 1.43eV dla GaAs. Otrzymany przez mnie wynik szerokości przerwy energetycznej dla GaP zgadza się, w przedziale potrójnego błędu pomiarowego, z wartością tablicową. Całkowicie zagadkową pozostaje jednak tak duża różnica pomiędzy wartością tablicową a zmierzoną dla GaAs (różnią się o prawie 64% wartości tablicowej).

3. Widmo światła emitowanego przez diody

Podstawową obserwacją jest zjawisko przesuwania się, dla każdej z diod z osobna, maksimum widma w zależności od wzrostu mocy dostarczonej do diody: dla diody czerwonej zjawisko to zachodziło od 657nm do 667nm, dla diody niebieskiej od 486nm do 453nm, dla diody zielonej od 563nm do 575nm, zaś dla diody żółtej od 587nm do 590nm. Przy czym trzeba zauważyć, że w przypadku diody żółtej drobny dalszy wzrost przyłożonego napięcia spowodował drastyczny skok maksimum rozkładu z 590nm do 610nm (co wizualnie uczyniło z tejże diody żółtej diodę czerwoną). Dla wszystkich badanych diod, prócz niebieskiej, wzrost mocy dostarczonej do diody powodował przesuwanie się ich barwy ku czerwieni. Dla diody niebieskiej proces zachodził w drugą stronę (ku fioletowi).

Całkowite wypromieniowane natężenie okazało się być dla każdej diody funkcją rosnącą dostarczonej do diody mocy, funkcją w pierwszym (grubym) przybliżeniu liniową, w drugim zaś przybliżeniu – wysycającą się (okolice potencjalnego wysycenia nie można było zbadać dokładniej ze względu na zjawisko „płynięcia”, tj. szybkich (względem czasu dokonywania pojedynczego pomiaru) zmian charakterystyki prądowo-napięciowej układu).

4. Charakterystyka prądowo-napięciowa diod

Dla diody żółtej zależność logarytmu natężenia prądu płynącego przez nią (I) od przyłożonego napięcia (U) jest liniowa. Dla pozostałych diod: zielonej, niebieskiej i czerwonej widać osłabienie tej zależności poniżej liniowości – jest to przejawem wpływu pasożytniczej rezystancji materiału diody oraz wpływu przegrzania materiału diody z powodu nadmiernego wydzielania przez nią ciepła.

² Błędy tych wartości zostały obliczone zgodnie ze wzorem na propagację małych błędów.

Podsumowanie

W wyniku analizy danych otrzymanych w doświadczeniu można stwierdzić następujące fakty:

1. Wrażenie koloru obiektów rzeczywistych, zarówno w świetle transmitowanym, jak i w świetle odbitym, nie jest w sposób prosty przekładalne na fizyczny parametr, jakim jest długość fali światła monochromatycznego i odpowiadające mu wrażenie barwy.
2. Otrzymana wartość szerokości przerwy energetycznej dla półprzewodnika GaP wyniosła (2.333 ± 0.031) eV, co jest zgodne z wartościami tablicowymi. Otrzymana wartość szerokości przerwy energetycznej dla półprzewodnika GaAs wyniosła (2.341 ± 0.032) eV, co nie jest zgodne z wartościami tablicowymi.
3. Widmo światła emitowanego przez diody półprzewodnikowe zależy od płynącego przez nie prądu (a zatem od mocy dostarczonej), przy czym przy zmianie tego prądu zachodzi charakterystyczne zjawisko przesuwania się maksimum widma oraz całości rozkładu ku czerwieni (dla diod czerwonej, zielonej i żółtej), lub ku fioletowi (dla diody niebieskiej).
4. Natężenie światła emitowanego przez diody w funkcji mocy dostarczanej do nich jest funkcją rosnącą, wysycającą się.
5. Zależność prądu płynącego przez diodę od przyłożonego do niej napięcia jest na skali półlogarytmicznej ($\log I$) nieco słabsza od liniowej.

Literatura

- C. Kittel** *Tablice Astronomiczno-Fizyczne*, wydanie I, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 1995,
Jerzy Ginter *Wstęp do fizyki ciała stałego*, wydanie III poprawione, PWN, Warszawa 1974,
H. Ibach, H. Lueth *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, wydanie I, PWN, Warszawa 1979,
Janina Chlebińska *Fizyka ciała stałego*,
Anatomia i fizjologia człowieka, wydanie III, WSiP, Warszawa, 1978.