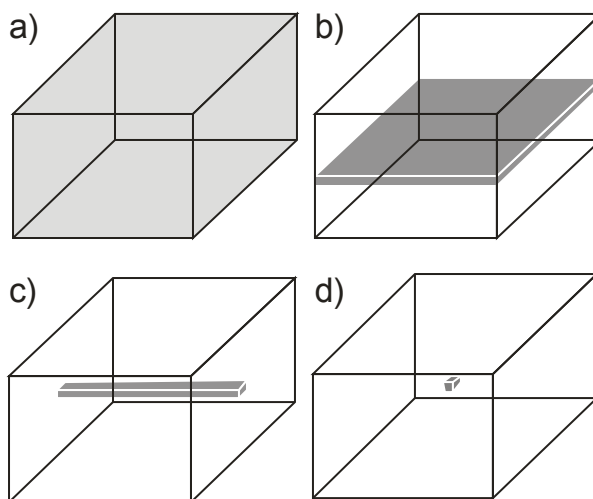


N2 - KROPKI KWANTOWE

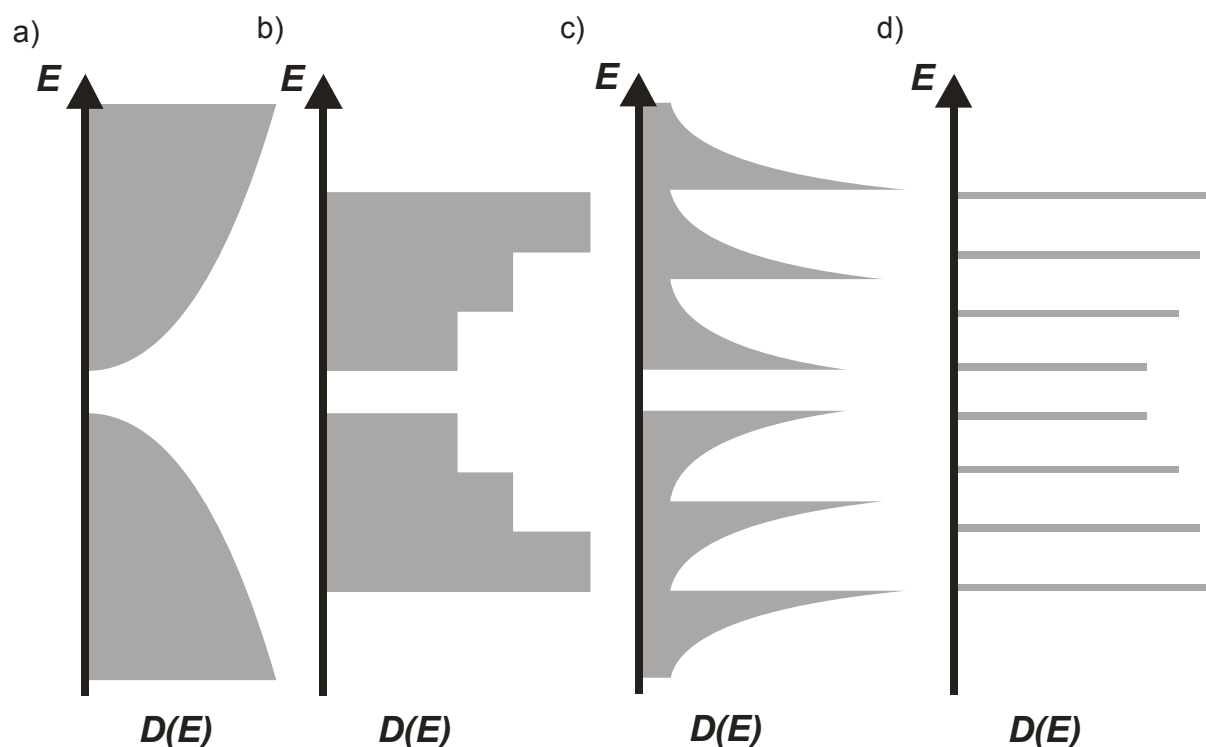
Układy niskowymiarowe

Gwałtowny rozwój technologii sprawia, że mikroelektronika zbliża się do granicy, przy której załamuje się klasyczny opis ruchu elektronu. Zmniejszając rozmiary kryształu kolejno w każdym z trzech kierunków XYZ jak pokazano na Rysunku 1, można zaobserwować szereg ciekawych zjawisk fizycznych związanych z wprowadzaniem ograniczeń swobodnego ruchu nośników ładunku typowego dla próbek masowych. W układach cienkowarstwowych o grubości rzędu nm (Rysunek 1.b)) obserwujemy, że w płaszczyźnie warstwy nośniki mogą przemieszczać się jak w kryształach (gaz elektronów swobodnych), natomiast niewielka odległość między powierzchniami ograniczającymi powoduje „związanie” elektronu w kierunku do nich prostopadłym [1]. Mamy wtedy do czynienia z dwuwymiarowym gazem elektronów swobodnych. Kwantowanie ruchu ładunków w jednym kierunku powoduje, że funkcja gęstości stanów zmienia swój charakter na schodkowy (Rysunek 2), a zmianie ulegają również inne wielkości fizyczne takie jak np. energia elektronów czy opór elektryczny. Zmniejszając rozmiary kryształu w dwóch kierunkach otrzymamy tak zwany drut kwantowy czyli nanodrut (Rysunek 1.c)), w którym elektron jest „związany” w płaszczyźnie przekroju, może jednak nadal poruszać się swobodnie wzdłuż drutu. Dla takich jednowymiarowych przewodników obserwujemy ciekawe zjawisko kwantowania przewodnictwa elektrycznego (patrz ćwiczenie IM-15). Kryształy, których rozmiar we wszystkich trzech kierunkach został zmniejszony do kilku nm nazywamy nanokryształami, kryształami zero-wymiarowymi lub kropkami kwantowymi.



Rysunek 1. Typy ograniczeń kwantowych: a) próbka masowa – układ trójwymiarowy, b) cienka warstwa – układ dwuwymiarowy, c) drut kwantowy – układ jednowymiarowy, d) kropka kwantowa – układ zero-wymiarowy.

Kropki kwantowe czasami są nazywane „sztucznymi atomami” ze względu na to, że widmo emitowanego przez nie światła, podobnie jak w przypadku atomów, składa się z wąskich linii o ściśle określonych długościach fali. Jak zostanie to pokazane w dalszej części, te wąskie linie emisyjne związane są z istnieniem dyskretnych poziomów energetycznych elektronów typowych dla cząstek kwantowych zamkniętych w pudle (trójwymiarowej studni potencjału).

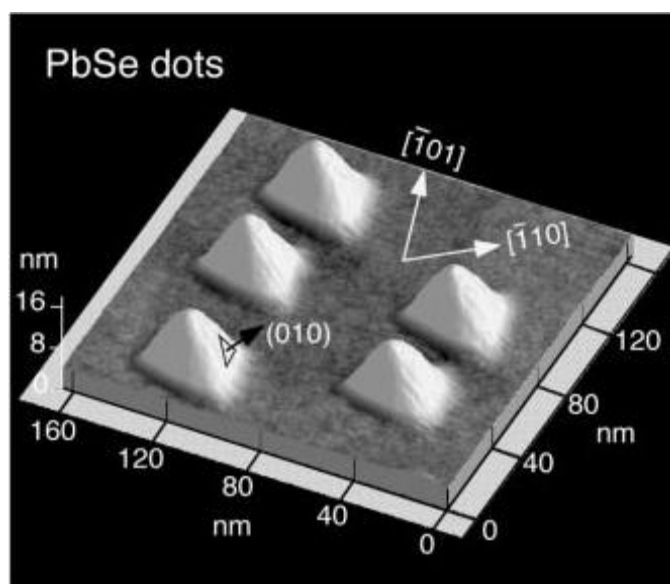


Rysunek 2. Gęstość stanów $D(E)$ w zależności od energii E w modelu elektronów swobodnych dla układów: a) trójwymiarowych (próbka masowa), b) dwuwymiarowych (cienka warstwa), c) jednowymiarowych (drut kwantowy) oraz d) zero-wymiarowych (kropka kwantowa).

Półprzewodnikowe kropki kwantowe

Nanokryształy można wytwarzać zarówno z metali jak i izolatorów, jednak największe znaczenie aplikacyjne mają obecnie układy wytwarzane z materiałów półprzewodnikowych. Istnieje kilka metod wytwarzania półprzewodnikowych kropek kwantowych, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody litograficzne [2] oraz bazujące na samoorganizacji [2-4]. Czasami te dwie strategie określa się odpowiednio „z góry na dół” (ang. top-down) oraz „z dołu do góry” (ang. bottom-up). W pierwszym przypadku proces tworzenia kropek kwantowych bazuje na technologii stosowanej w mikroelektronice. Jest to metoda kilkustopniowa: w pierwszym etapie na powierzchni półprzewodnika nakładana jest warstwa światłoczuła (fotorezyst), która następnie jest naświetlana promieniowaniem UV lub wiązką elektronową przez maskę z odpowiednio dobranym wzorem. W kolejnym etapie wywoływany jest naświetlony wzór w wyniku czego następuje odsłonięcie powierzchni zgodnie ze wzorem maski. Tak przygotowany materiał poddawany jest procesowi wytrawiania np. w roztworze (litografia mokra) lub za pomocą wiązki jonów (wytrawianie jonowe). W wyniku trawienia powstają na powierzchni półprzewodnika struktury o rozmiarach rzędu kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów.

Innym sposobem tworzenia nanokryształów jest nieco zmodyfikowana metoda epitaksjalna [2, 3, 5]. W standardowej metodzie epitaksjalnej na powierzchnię kryształu, w warunkach ultra wysokiej próżni, bardzo powoli naparowywane są kolejne warstwy atomów. Jeżeli stałe sieci krystalicznej nanoszonego w ten sposób materiału są zgodnie ze stałymi sieci podkładu, powstają jednolite warstwy o dużej powierzchni. Jeżeli jednak stałe sieciowe będą się znacznie od siebie różniły napylany materiał będzie samorzutnie tworzył na powierzchni podkładu niewielkie kryształki dążąc w ten sposób do minimalizacji energii. Przykład nanokryształów tworzonych metodą epitaksjalną pokazany jest na Rysunku 3.

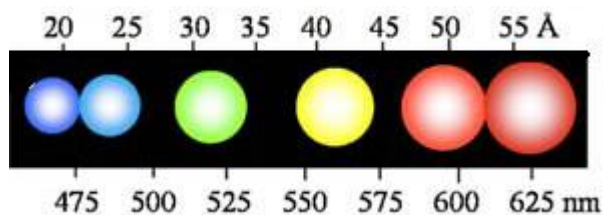


Rysunek 3. Nanokryształy PbSe samoorganizujące się na powierzchni PbTe o orientacji (111), źródło [5].

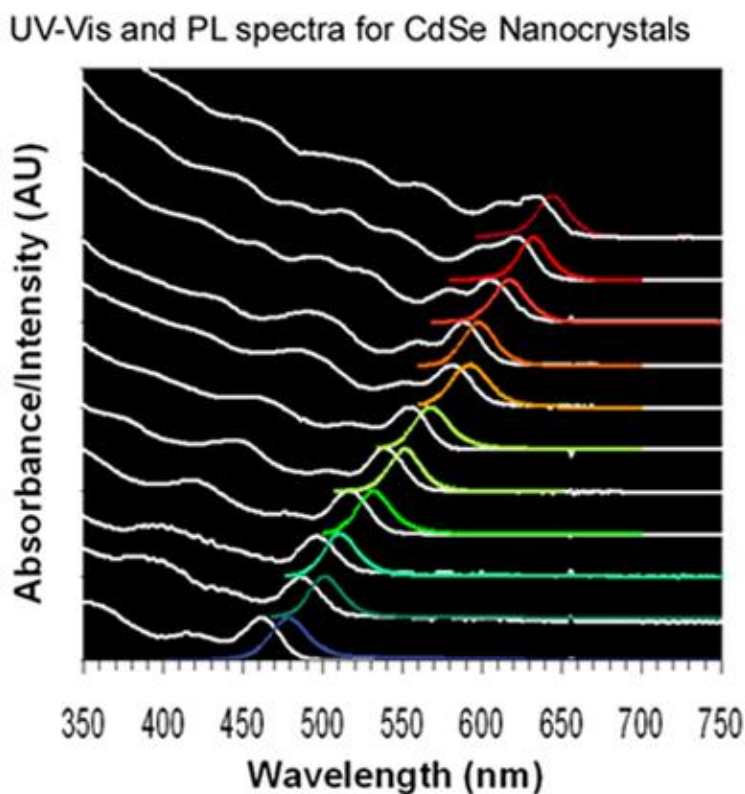
Kolejna metoda wytwarzania kropek kwantowych również bazuje na naturalnej tendencji do samoorganizacji. W syntezie koloidalnej [3, 4 i referencje], wykorzystuje się proces wzrostu kryształów półprzewodników zbudowanych z atomów grup II i VI lub III i V w roztworze. Ogrzewanie roztworu zawierającego odpowiednio dobrane surfaktanty oraz prekursory wywołuje reakcję chemiczną, w wyniku której powstają cząsteczki materiału półprzewodnika np. CdSe. W chwili gdy ich stężenie osiągnie poziom nasycenia rozpoczyna się nukleacyjny wzrost nanokryształów. Proces wzrostu kryształów można przerwać w dowolnym momencie zmniejszając temperaturę roztworu, dzięki czemu w łatwy sposób można kontrolować wielkość wytwarzanych kropek kwantowych. Metodą tą, w warunkach pokojowych, można otrzymywać duże ilości nanokryształów o dobrze określonych rozmiarach.

Niezależnie od sposobu wytwarzania struktura krystaliczna kropek kwantowych jest identyczna ze strukturą makroskopowych kryształów tego samego związku [3]. Nie jest więc zaskoczeniem, że wiele cech nanokryształów takich jak szerokość przerwy energetycznej, masy efektywne elektronów oraz dziur jest podobna do tych obserwowanych dla układów masowych. Proces emisji promieniowania jest również identyczny w obu przypadkach, to znaczy foton jest emitowany na skutek rekombinacji elektronu z pasma przewodnictwa i dziury z pasma walencyjnego, a jego energia jest równa szerokości przerwy energetycznej. Znając zatem szerokość pasma wzbronionego w próbce masowej można określić zakres widma luminescencji nanokryształów wybranego związku.

Duże zainteresowanie wykorzystaniem kropek kwantowych związane jest głównie z ich szczególnymi właściwościami optycznymi [4]. Jak wspomniano wcześniej widmo luminescencji pojedynczej kropki kwantowej przypomina nieco widmo atomowe, to znaczy charakteryzuje się występowaniem wąskiej linii o dobrze określonej energii. Energia promieniowania, innymi słowy kolor emitowanego światła, silnie zależy od wielkości kropki, co poglądowo zostało przedstawione na Rysunku 4 dla związku CdSe [4]. Ilościowa analiza widma luminescencji kropek kwantowych o różnych wielkościach, prezentowana na Rysunku 5, pokazuje rozmycie poszczególnych linii. Rozmycie to jest związane z niewielkim rozrzutem wielkości kropek w badanych roztworach.



Rysunek 4. Fluorescencja roztworów kropek kwantowych CdSe - zależność koloru od wielkości kropki źródło [4].



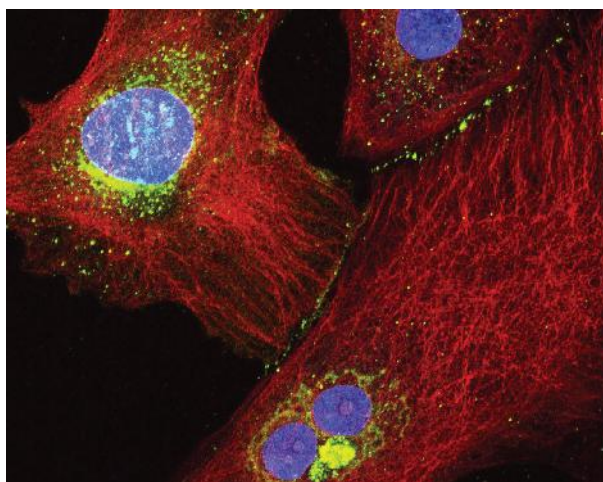
Rysunek 5. Widma absorpcji (białe) oraz fotoluminescencji roztworu (kolorowe) kropek kwantowych o różnych wielkościach. Dane ze strony producenta, firmy Nanomaterials and Nanofabrication Laboratories (<http://www.nn-labs.com/>).

Widmo absorpcji nanokryształów wykazuje znaczne różnice w porównaniu do próbek masowych, dla których ma ono wyraźną granicę, tzw. krawędź absorpcji rozdzielającą, obszar o niskim i wysokim współczynniku absorpcji. Dla kropek kwantowych widmo absorpcji ma charakter szeregu maksimów, których wysokość rośnie wraz z energią (patrz Rysunek 5). Pierwsze maksimum absorpcji jest zawsze przesunięte względem maksimum emisji w kierunku krótszych fal, a jego położenie zależy od rozmiaru, podobnie jak dla emisji, im większa kropka kwantowa tym maksimum absorpcji przesunięte jest w kierunku dłuższych fal. Fakt, że kropki kwantowe absorbują w szerokim zakresie widma, a emitują światło o dobrze zdefiniowanym kolorze sprawia, że znakomicie sprawdzają się one jako luminofory w diodach LED, barwniki w laserach oraz jako znaczniki fluorescencyjne w mikroskopii optycznej.

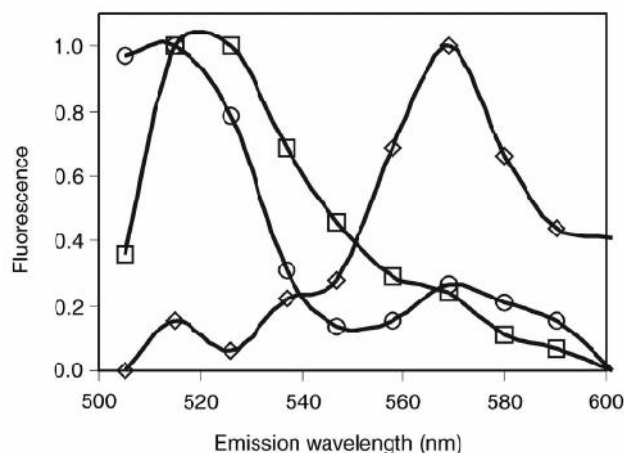
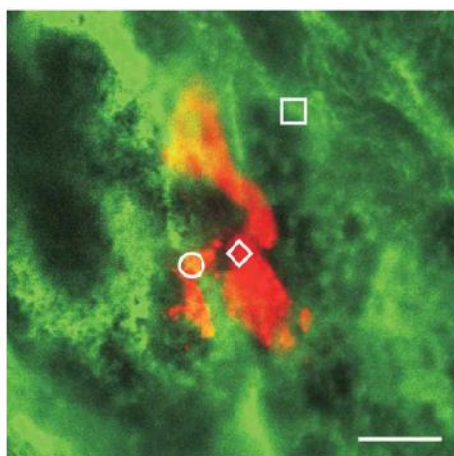
Na szczególną uwagę zasługuje możliwość stosowania nanokryształów jako znaczników fluorescencyjnych w biologii i medycynie [4, 6, 7]. Tradycyjne barwniki stosowane w badaniach tego typu charakteryzują się wąskim obszarem absorpcji i stosunkowo szerokim widmem emisji co powoduje, że należy stosować oddzielne zestawy filtrów dopasowanych do zakresu absorpcji i emisji wybranych związków. Ponadto mieszając

barwniki różnego typu należy zadbać o to, aby ich zakresy emisji i absorpcji nie pokrywały się. Wszystkich tych wad pozbawione są znaczniki bazujące na kropkach kwantowych. Łatwy wybór koloru (poprzez zmianę wielkości), wąski zakres emisji oraz możliwość wzbudzania wszystkich rodzajów barwników światłem o odpowiednio dużej energii (większej lub równej energii maksimum absorpcji najmniejszych kropek) sprawiają, że odpowiednio zmodyfikowane kropki kwantowe znajdują zastosowanie w mikroskopii fluorescencyjnej [6, 7].

Zasadniczo nanokryształy półprzewodników są nierozpuszczalne, dopiero pokrycie ich związkami powierzchniowo czynnymi (surfaktantami) sprawia, że można je przechowywać i przetwarzać w formie roztworu [4 i referencje]. Rodzaj surfaktanta determinuje rodzaj rozpuszczalnika np. toluen, woda itp. Powierzchnię kropek kwantowych można również funkcjonalizować związkami, które łączą się poprzez oddziaływania specyficzne z materiałami biologicznymi np. wybranymi białkami, czy sekwencjami zasad tworzących DNA co ma kapitalne znaczenie dla obrazowania wybranych fragmentów komórek (Rysunek 6) [6] czy też detekcji niektórych chorób (Rysunek 7)[7].



Rysunek 6. Obraz fluorescencyjny komórek płuca płodu szczura. Jako barwników użyto dwóch rodzajów kropek kwantowych o różnych rozmiarach pokrytych dwoma różnymi białkami: β -tubuliną (kolor czerwony 656nm), anty-koneksyną (kolor zielony 565nm), które wiążą się poprzez oddziaływania specyficzne z fibroblastami. Jądro komórkowe zostało utrwalone za pomocą związku Hoechst 33342 emitującego światło niebieskie, źródło [6].



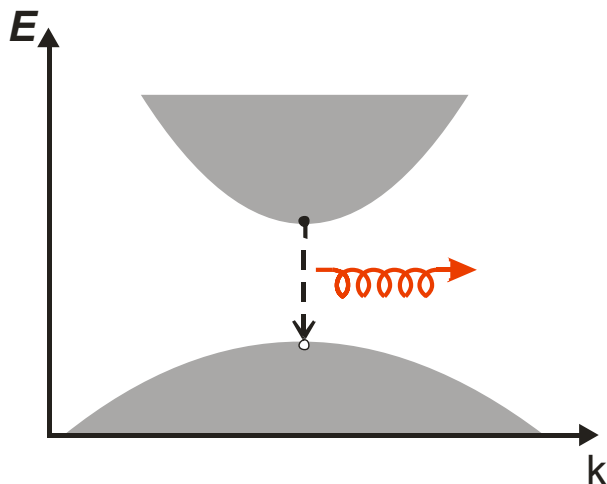
Rysunek 7. a) Zdjęcie z mikroskopu fluorescencyjnego tkanki płuca zabarwionej na zielono (fluoresceina) z widocznymi komórkami rakowymi oznakowanymi za pomocą kropek kwantowych (510nm) oraz pomarańczowego znacznika Orange Cell Tracker b) analiza widma emitowanego przez wybrane fragmenty tkanki oznaczone na zdjęciu a) za pomocą symboli kwadrat, diament, kółko; źródło [7].

Poziomy energetyczne kropek kwantowych

Proces absorpcji lub emisji światła przez kryształ półprzewodnika związany jest z wykreowaniem lub rekombinacją pary elektron-dziura. W przypadku półprzewodników z tzw. prostą przerwą energetyczną (Rysunek 8) energia emitowanego kwantu światła jest równa [3]:

$$\hbar\nu = E_g + E_e + E_h, \quad (1)$$

gdzie E_g to szerokość przerwy energetycznej, a E_e i E_h to energie elektronu i dziury.



Rysunek 8. Schemat procesu rekombinacji promienistej elektronu i dziury w półprzewodniku z prostą przerwą energetyczną.

Jak wspomniano wcześniej struktura krystaliczna nanokryształów jest identyczna ze strukturą kryształów makroskopowych możemy zatem przyjąć, że równanie (1) będzie opisywało proces luminescencji kropek kwantowych pod warunkiem, że prawidłowo wyznaczone zostaną energie elektronu i dziury. W najprostszym przybliżeniu można założyć, w oparciu o teorię masy efektywnej, że elektron i dziura są cząstkami o masach efektywnych m_e^* oraz m_h^* poruszającymi się w pudełku o boku L odpowiadającym wielkości nanokryształu.

Na początek rozważmy przypadek jednowymiarowy. Równanie Schrödingera:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} = E \psi(x), \quad (2)$$

wraz z warunkami brzegowymi:

$$\psi(x=0) = \psi(x=L) = 0, \quad (3)$$

opisuje ruch cząstki o masie m w jednowymiarowej studni potencjału o szerokości L .

Ogólne rozwiązanie równania (2) ma postać:

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx}, \quad (4)$$

gdzie k jest wektorem falowym, związanym z energią następującą relacją:

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (5).$$

Uwzględniając warunki brzegowe (3) otrzymujemy:

$$\psi(x=0) = 0 \Leftrightarrow A = -B \Rightarrow \psi(x) = C \sin(kx), \quad (6)$$

$$\psi(x=L) = 0 \Leftrightarrow k_n = \frac{n\pi}{L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

Z równań (7) i (5) wynika, że energia cząstki w jednowymiarowej studni potencjału może przyjmować jedynie dyskretne wartości:

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2} \quad (8).$$

W przypadku trójwymiarowego sześciennego pudełka rozwiązanie równania Schrödingera jest iloczynem funkcji falowych opisanych równaniem (6), a energia najniższego stanu jest sumą energii kinetycznej w każdym z trzech kierunków i wynosi:

$$E_1 = \frac{3h^2}{8mL^2} \quad (9).$$

Podstawiając do równania (9) masy efektywne elektronu m_e^* oraz dziury m_h^* otrzymamy równania na energię stanów podstawowych tych cząstek. Łącząc równania (1) oraz (9) otrzymamy wzór opisujący zależność między rozmiarem a energią światła emitowanego przez półprzewodnikowe kropki kwantowe:

$$h\nu = E_g + \frac{3h^2}{8m_e^*L^2} + \frac{3h^2}{8m_h^*L^2} \quad (10).$$

Opisany powyżej model, jakkolwiek pozwala na wyjaśnienie zależności między kolorem luminescencji a wielkością kropek kwantowych jest pewnym uproszczeniem. Rzeczywiste nanokryształy nie zawsze są małymi sześcianikami, bardzo często ich kształt bliższy jest kuli. Rozwiązanie równania (2) w trzech wymiarach w układzie sferycznym również prowadzi do wniosku, że energia stanu podstawowego elektronu i dziury zależy od rozmiaru kropki jak $1/L^2$, zmienia się jedynie współczynnik proporcjonalności. W modelu sferycznie symetrycznej kropki kwantowej energia promieniowania emitowanego w następstwie rekombinacji dziury i elektronu wynosi [8]:

$$h\nu = E_g + \frac{h^2}{8m_e^*L^2} + \frac{h^2}{8m_h^*L^2} \quad (11).$$

W bardziej szczegółowych rozważaniach uwzględnia się dodatkowo poprawki związane z tworzeniem przez elektron i dziurę stanu związanego tzw. ekscytonu, wprowadza to dodatkowy człon do równania (11) proporcjonalny do $1/L$ [8]. Najtrudniejszy do zamodelowania jest problem rzeczywistego potencjału odczuwanego przez nośniki ładunku przy brzegach kropek kwantowych. Model nieskończonej bariery w naturalny sposób pomija oddziaływania środowiska (np. rozpuszczalnika), czy też wpływ modyfikacji powierzchni nanokryształów. Wszystkie te czynniki uwzględnia się czasami jako poprawki wyższych rzędów w równaniu (11) [3].

Część eksperymentalna

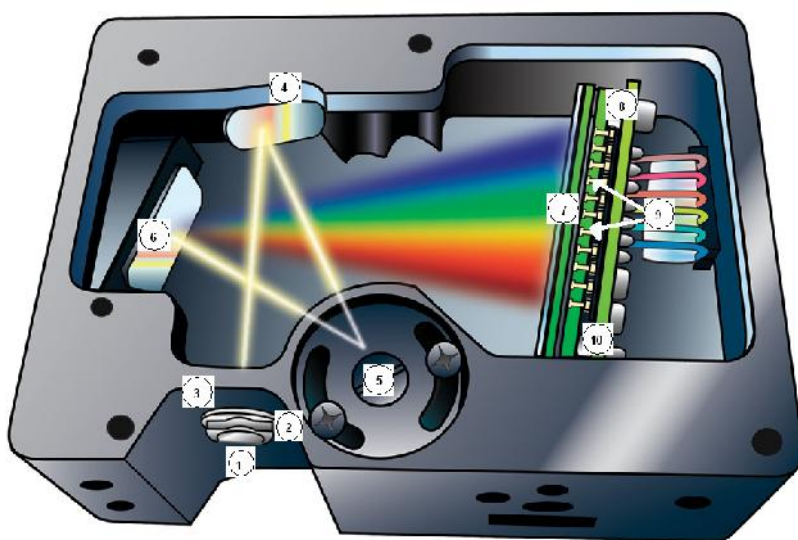
Celem ćwiczenia jest zbadanie widma absorpcji i emisji roztworów kropek kwantowych o różnych wielkościach oraz dwóch znaczników fluorescencyjnych rodaminy i fluoresceiny. Służy do tego układ składający się z: spektrometru z linijką CCD, źródła światła białego do pomiarów absorpcji – lampa halogenowa, źródła światła wzbudzającego fotoluminescencję – lampa ksenonowa, światłowodów, uchwytów na próbki.

Budowa i zasada działania spektrometru z linijką CCD

Zasada działania miniaturowego spektrometru z linijką CCD jest podobna jak w przypadku spektrometrów tradycyjnych, w których światło przechodzące przez szczelinę wejściową pada na element dyspersyjny - siatkę dyfrakcyjną lub pryzmat, a po rozszczepieniu przechodzi przez szczelinę wyjściową gdzie jest rejestrowane za pomocą detektora. Wyboru długości fali dokonuje się poprzez obrót elementu dyspersyjnego względem kierunku obserwacji. Zamiast jednej szczeliny wyjściowej, można zastosować szereg niewielkich fotodetektorów o szerokości porównywalnej do szerokości szczeliny tradycyjnego spektrometru czyli linijkę CCD. Takie rozwiązanie pozwala na jednoczesną rejestrację

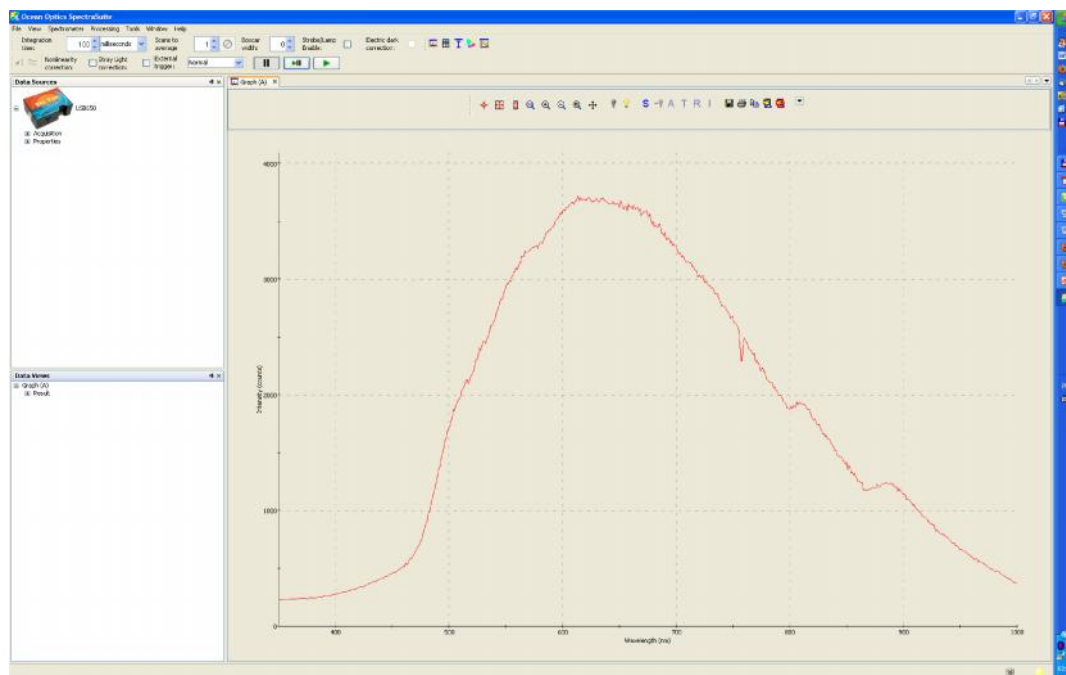
natężenia światła o różnych długościach fali co przyspiesza proces pomiarowy, pozwala na eliminację elementów ruchomych oraz miniaturyzację całego urządzenia.

Schemat spektrometru USB4000 stosowanego w ćwiczeniu przedstawiony jest na Rysunku 9. Światło do spektrometru wprowadzane jest za pomocą światłowodu przyłączonego w punkcie (1), przechodzi ono następnie przez szczelinę wejściową (2) oraz filtr ograniczający sygnał wejściowy tak by odpowiadał zakresowi pomiarowemu spektrometru (3). Odbite od zwierciadła (4) światło pada następnie na siatkę dyfrakcyjną (5) i po rozszczepieniu i uformowaniu przez zwierciadło skupiające (6) rejestrowane jest za pomocą szeregu fotodetektorów (8 - linijka CCD). Odpowiednia kalibracja przyrządu umożliwia pomiar natężenia światła w funkcji długości fali. Zastosowanie dodatkowego osprzętu pozwala na badanie transmisji, absorpcji oraz fluorescencji zarówno w przypadku próbek stałych jak i ciekłych.



Rysunek 9. Budowa spektrometru z linijką CDD: (1) konektor do światłowodu, (2) szczelina wejściowa, (3) filtr ograniczający zakres analizowanego widma, (4) zwierciadło, (5) siatka dyfrakcyjna, (6) zwierciadło skupiające, (7) miniaturowe soczewki skupiające stosowane opcjonalnie w przypadku spektrometrów z dużą szczeliną wejściową, (8) linijka CCD, (9) i (10) opcjonalne filtry dedykowane do wybranych zakresów pomiarowych.

Spektrometr USB4000 sterowany jest wyłącznie z poziomu oprogramowania SpectraSuite dostarczonego wraz z urządzeniem (oryginalna instrukcja obsługi dostępna jest na komputerze przy ćwiczeniu). Program umożliwia zarówno rejestrację pojedynczego widma, korektę sygnału ze względu na prąd ciemny detektora, jak również wyznaczanie współczynników transmisji, odbicia oraz absorpcji w funkcji długości fali światła. Interfejs programu SpectaSuite jest typowy dla aplikacji pracujących pod kontrolą systemu MSWindows, z tradycyjnym menu oraz paskiem narzędzi. Na Rysunku 10 przedstawione jest okno główne programu podzielone na trzy części, po lewej stronie podawane są informacje na temat spektrometru i jego parametrów pracy (Data sources), poniżej widoczny jest opis parametrów wykresów (Data views) wyświetlanych w zakładkach prawego, największego panelu (Graph(A)).



Rysunek 10. Wygląd okna głównego programu SpectraSuite.

Wykonanie pomiarów

Pomiar absorbancji światła

Natężenie światła $I(\lambda)$ o wybranej długości fali λ przechodzącego przez ośrodek o grubości dx zmienia się zgodnie z prawem:

$$\frac{dI(\lambda)}{dx} = -I(\lambda)\alpha(\lambda), \quad (12)$$

gdzie $\alpha(\lambda)$ jest współczynnikiem absorpcji.

Całkując równanie (12) otrzymujemy wzór na natężenie światła przechodzącego przez próbkę o grubości d :

$$\int_0^d \frac{dI(\lambda)}{I(\lambda)} = - \int_0^d \alpha(\lambda) dx \rightarrow \ln(I(d)) - \ln(I_0) = -\alpha(\lambda)d, \quad (13)$$

gdzie I_0 jest natężeniem światła padającego na próbkę.

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$\frac{I(d)}{I_0} = \exp(-\alpha(\lambda)d) \quad (14).$$

Miarą ilości światła zaabsorbowanego przez próbkę o zadanej grubości jest absorbancja $ABS(\lambda)$, czasami nazywana gęstością optyczną, definiowana wzorem:

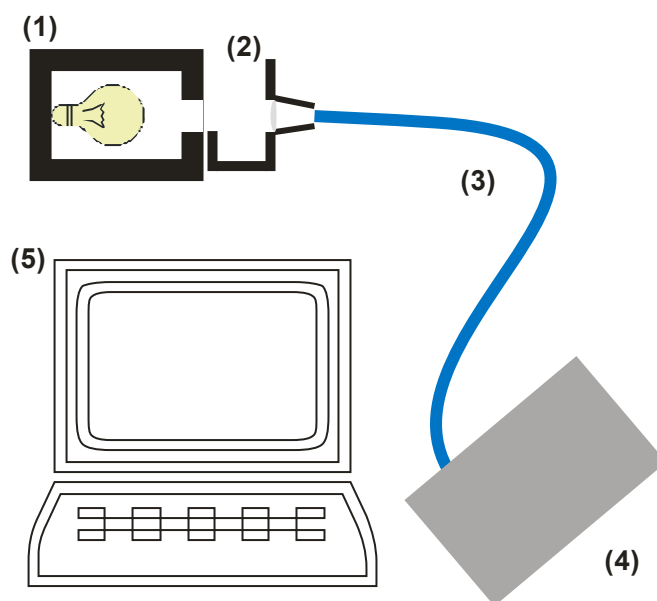
$$ABS = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (15).$$

Schemat układu eksperymentalnego służącego do wyznaczania absorbancji w roztworach przedstawiony jest na Rysunku 11. W eksperymencie tym światło białe emitowane przez lampę halogenową przechodzi przez uchwyt do kuwet i następnie światłowodem doprowadzane jest do spektrometru.

Pomiaru zależności absorbancji od długości fali światła dokonuje się w trzech krokach:

- rejestracja sygnału ze spektrometru bez oświetlenia (Dark Spectrum), w tym celu należy wcisnąć przycisk  widoczny w pasku narzędzi okna Graph(A);
- rejestracja widma lampy po przejściu przez pustą kuwetę, przycisk ;

- rejestracja widma światła przechodzącego przez kuwetę z roztworem kropek kwantowych.



Rysunek 11. Schemat układu eksperymentalnego do badania absorpcji roztworów. (1) źródło światła białego – lampa halogenowa, (2) uchwyt na kuwetę, (3) światłowód, (4) spektrometr, (5) komputer sterujący pracą spektrometru.

Oprogramowanie SpectraSuite umożliwia analizę danych i wyświetlenie wyniku w formie zależności absorpcji od długości fali światła w czasie trwania pomiarów, w tym celu należy wybrać opcję *Absorbance* z menu *Processing Mode*, które jest dostępne w menu *Processing* lub wcisnąć przycisk **A** z paska narzędzi widocznym w oknie Graph(A). Ważne jest, aby wszystkie trzy widma rejestrowane były przy tych samych czasach całkowania oraz ilości średniowanych pomiarów, dlatego przed przystąpieniem do właściwych pomiarów należy dobrać oba parametry tak aby maksymalny sygnał rejestrowany po przejściu światła przez pustą kuwetę nie był większy niż zakres pomiarowy oraz aby w obszarze krótkich fal niepewność pomiarowa pojedynczego punktu była niewielka. Wielkość sygnału zależy od czasu całkowania przetwornika CCD, który ustawia się w okienku *Integration time*

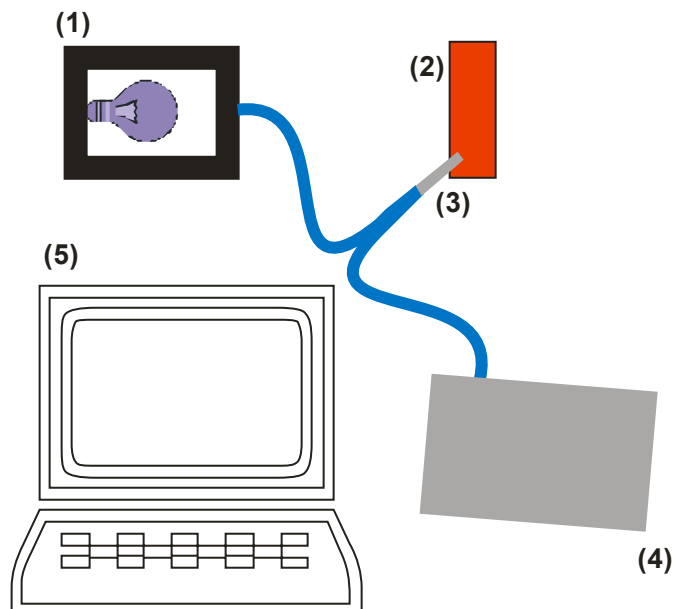
widocznym poniżej menu głównego. Niepewność pomiaru natężenia światła rejestrowanego przez pojedynczy detektor liniiki CCD można zmniejszać zwiększając ilość pomiarów, które następnie są średniowane. Parametr ten ustawia się w okienku *Scans to average* widocznym obok okienka *Integration time*, aby wyłączyć średniowanie wystarczy wcisnąć przycisk

Pomiar widma fotoluminescencji

Schemat układu do pomiarów fotoluminescencji przedstawiony jest na Rysunku 12. Roztwór oświetlany jest światłem z lampy ksenonowej pracującej w trybie impulsowym za pomocą specjalnej sondy światłowodowej, ta sama sonda rejestruje jednocześnie światło emitowane z próbki. Aby rejestrowany sygnał był odpowiednio silny sondę należy umieścić możliwie blisko roztworu. Pamiętać należy również o tym, że powierzchnia kuwety odbija częściowo padające na nią światło dlatego sonda nie może patrzeć prostopadle na jej powierzchnię ponieważ sygnał odbity będzie zaburzał obserwację widma fotoluminescencji.

Przy rejestracji sygnału należy włączyć wyzwalanie lampy ksenonowej zaznaczając opcję

Strobe/Lamp enable  dostępna w pasku narzędzi widocznym poniżej menu głównego.



Rysunek 12. Schemat układu do pomiarów fotoluminescencji. (1) lampa kenonowa, (2) kuweta z roztworem, (3) sonda światłowodowa do badania światła odbitego, (4) spektrometr, (5) komputer sterujący pracą spektrometru.

Bibliografia

- [1] H. Ibach, H. Th „*Fizyka ciała stałego*” PWN, Warszawa 1996.
- [2] R. W. Kelsall, I. W. Hamley, M. Geoghegan „*Nanotechnologie*” red. przekładu K. Kurzydłowski PWN, Warszawa 2008.
- [3] E. L. Wolf „*Quantum Nanoelectronics*” WILEY-VCH, Weinheim 2009.
- [4] V. Biju, T. Itoh, A. Anas, A. Sujith, M. Ishikawa *Amal. Bioanal. Chem.* **391** (2008) 2469.
- [5] G. Springholz,* V. Holy, M. Pinczolits, G. Bauer, *Science* **282** (1998) 734.
- [6] T. J. Deerinck, *Toxicologic Pathology*, **36** (2008) 112.
- [7] E. B. Voura, J. K. Jaiswal, H. Mattoussi, S. M. Simon, *Nature Medicine* **10** (2004) 993.
- [8] L. Brus, *J. Phys. Chem.* **90** (1986) 2555.