

Celem projektu doktorskiego jest przygotowanie teoretycznego opisu układów uwięzionych elektronów lub dziur we wnękach potencjału wytworzonych przez zewnętrzne pola elektryczne w czarnym fosforze.

Kilkuwarstwowy czarny fosfor to stosunkowo nowy materiał tworzony przez warstwy związane oddziaływaniem van der Waalsa, podobnie jak grafit tworzony jest przez warstwy grafenu. Separacja pojedynczych warstw czarnego fosforu jest obecnie opanowana (pojedyncza warstwa czarnego fosforu nazywana jest fosforenem). Warstwy czarnego fosforu o grubości atomowej charakteryzuje szeroka przerwa energetyczna oraz wysoka ruchliwość nośników ładunku. Z tego powodu cienkie warstwy czarnego fosforu są od 2014 roku obiektem intensywnych badań teoretycznych i doświadczalnych prowadzonych przez fizyków, chemików oraz inżynierów.

Układy z czarnego fosforu, które są obecnie produkowane i badane pod kątem zastosowań, obejmują tranzystory polowe dla elektroniki oraz nanokryształy dla optyki i optoelektroniki. Ruch nośników w nanokryształach jest ograniczony w każdym z trzech kierunków. Z tego powodu nanokryształy stanowią tzw. kropki kwantowe. Dla badań optycznych używa się zazwyczaj dużych zbiorów takich układów. Badane linie optyczne ulegają poszerzeniu ze względu na drobne nawet różnice w rozmiarach poszczególnych nanokryształów. Poszerzenie wyklucza precyzyjne zbadanie widma uwięzionego układu, które zawiera informacje o energii kinetycznej związanej zgodnie z mechaniką kwantową z lokalizacją nośników, oraz oddziaływań między nimi.

Projekt doktorski zbada pojedynczą elektrostatyczną kropkę kwantową zdefiniowaną przez przyłożenie na powierzchni cienkiej warstwy czarnego fosforu elektrod bramek. Takie układy były poprzednio badane w półprzewodnikach litych, nanorurkach węglowych czy dwuwarstwowym grafenie, z wykorzystaniem tzw. spektroskopii transportowej, która wyznacza warunki włączenia i wyłączenia przepływu prądu przez kropkę o ile uwięziony poziom energetyczny mieści się w tzw. oknie transportu między poziomami Fermiego elektrody źródła i drenu. Takie eksperymenty prowadzone są z bardzo wysoką precyzją i pozwalają na ostateczną weryfikację teorii opisujących uwięziony układ nośników.

Zadaniem doktoranta będzie ustalenie właściwości uwięzionego układu oraz opisanie związanych z nimi cech spektralnych oraz wynikających z nich widm ładowania kropki kwantowej. Temat zawiera sporo nowej fizyki dla teorii kropek kwantowych w związku z nietypowymi właściwościami badanego materiału. Warstwa fosforenu stanowi silnie połańdowaną sieć z atomami fosforu położonymi na dwóch równoległych powierzchniach. Struktura krystaliczna pojedynczej warstwy jest silnie anizotropowa, co przekłada się na anizotropię struktury elektronowej. W szczególności pasma przewodnictwa oraz walencyjne wykazują silną anizotropię w okolicach punktu gamma z masami efektywnymi w kierunku, w którym atomy fosforu układają się w linię zygzakowatą znacznie przekraczająca masę w kierunku prostopadłym, gdzie atomy fosforu układają się w linię przypominającą obrys fotela. Anizotropia pasm przewodnictwa i walencyjnego przekłada się między innymi na nieregularną strukturę poziomów Landaua w wysokim polu magnetycznym oraz jak spodziewamy się powinna wywołać anizotropię reakcji układu na oddziaływania między nośnikami.

Nowatorskość projektu opiera się na fakcie, że obecnie nie ma teoretycznej ani doświadczalnej literatury na temat elektrostatycznych kropek kwantowych w czarnym fosforze. Eksperymentu należy spodziewać się wkrótce, gdyż technologia jest w zasięgu ręki, a doświadczenie powinno dostarczyć rozstrzygających informacji na temat struktury elektronowej tego nowego i intensywnie badanego materiału. Doktorat wyjdzie naprzeciw wynikom pomiarów.