

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Fizyki

**Tomasz Fąs**

Nr albumu: 382348

**Tunelowanie między studniami  
kwantowymi umieszczonymi w  
mikrowęcie optycznej.**

**Praca licencjacka  
na kierunku FIZYKA**

Praca wykonana pod kierunkiem  
**dr hab. Jan Suffczyński**  
Zakład Fizyki Ciała Stałego

Któryś z 2019

## **Oświadczenie kierującego pracą**

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis kierującego pracą

## **Oświadczenie autora pracy**

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora pracy

## **Streszczenie**

W niniejszej pracy przedstawiono zależność intensywności tunelowania między studniami kwantowymi od przyłożonego pola magnetycznego. Wykorzystana próbka składała się ze studni kwantowych umieszczonych w mikrownęce. Udało się uzyskać tunelowanie całego ekscytonu tj. elektronu i dziury, przez barierę potencjału o szerokości 125 nm. Doświadczenie to częściowo wypełnia lukę w dziedzinie tunelowania średniodystansowego.

## **Słowa kluczowe**

mikrownęka optyczna, tunelowanie, polaryton, ekscyton, fotoluminescencja

## **Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)**

13.2 Fizyka

## **Klasyfikacja tematyczna**

Do  
ustalenia  
chyba



# Wprowadzenie

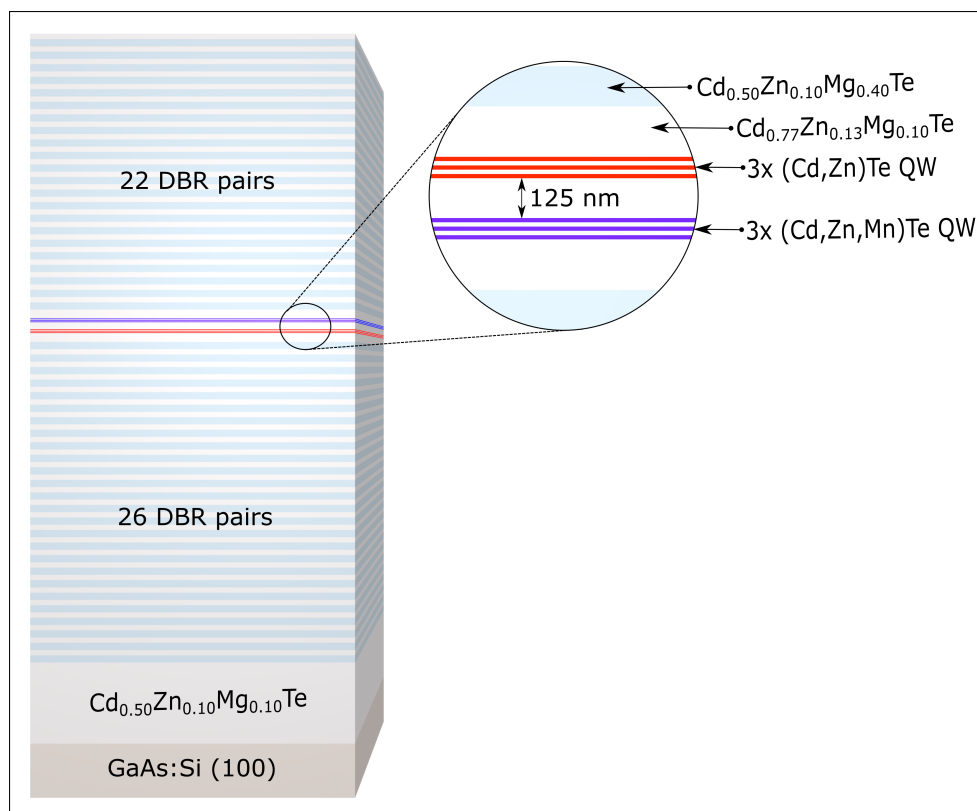
Jednym z ważniejszych efektów w mechanice kwantowej jest tunelowanie, czyli przejście cząstki z jednej studni potencjału do innej pomimo braku odpowiedniej energii, by przekroczyć barierę między nimi. Prawdopodobieństwo takiego przejścia maleje eksponencjalnie wraz z odległością między studniami. Jednakże prawdopodobieństwo przejścia można zwiększyć stosując tzw. sprzężone studnie kwantowe. Sprzężenie powoduje, że zmiana stanu jednej ze studni ma wpływ na stan drugiej. Propaguje się to na funkcje falowe zlokalizowane w studniach sprawiając, że prawdopodobieństwo tunelowania znacząco wzrasta. Dobrym przykładem zastosowania tego efektu jest praca B. Deveaund'a et. al. [1]. Aby uzyskać sprzężenie, autorzy dopasowywali do siebie szerokości studni tak, by osiągnąć zamierzony efekt. Udało im się potwierdzić istnienie zależności eksponencjalnej między intensywnością tunelowania a grubością bariery oraz zwiększyć częstość tunelowania dzięki zastosowaniu sprzężenia między studniami. Na podstawie tych danych w pracy S. A. Gurvitz et. al. [2] został podany matematyczny opis tego zjawiska. Z kolei I. Lawrence et al. [3] w pracach nad tunelowaniem wykorzystali ekscyton, czyli parę elektron-dziura, która może powstać np. w półprzewodnikach, kiedy foton wzbudzi elektron z pasma walencyjnego w pobliże pasma przewodnictwa. Taka kwazicząstka jest związana poprzez oddziaływanie kulombowskie i może swobodnie poruszać się w kryształach. Po pewnym czasie dojdzie do jej rekombinacji i emisji fotonu. W swojej pracy autorzy udowodnili, iż możliwe jest tunelowanie takiej cząstki do studni oddalonej o  $109 \text{ \AA}$ . W porównaniu z pracą B. D. (...) Ekscytony mogą powstawać również w studniach półprzewodnikowych. Można pójść jeszcze dalej w modyfikowaniu ekscytonu i wprowadzić mikrownękę optyczną, czyli obszar o rozmiarach mikrometrów ograniczony przez zwierciadła. W takiej mikrownęce mogą powstawać elektromagnetyczne fale stojące, czyli mody optyczne. Jeśli w mikrownęce zostanie umieszczona studnia półprzewodnikowa, to uwięziony foton może spowodować powstanie ekscytonu, który następnie zrekombinuje i wyemituje foton. Wyemitowany foton może ponownie doprowadzić do powstania ekscytonu, a cykl się powtórzy. Sprzężenie tego typu, między fotonem a ekscytonem, nazywa się polarytonem. To właśnie na takim sprzężeniu skupiono się w tej pracy. W mikrownęce umieszczono dwie studnie kwantowe: jedna z nich, zwana magnetyczną (MQW) silnie reagowała z polem magnetycznym, co pozwalało na kontrolę jej głębokości. Z kolei druga studnia, zwana niemagnetyczną (NMW), znacznie słabiej reagowała z polem. Studnie te były otoczone półprzepuszczalnymi zwierciadłami Bragga, umożliwiając wprowadzanie fotonów do wnętrza mikrownęki. Powstałe ekscytony mogły zrekombinować w tej samej studni, w której powstały, lub jako całość przetunelować za pośrednictwem modu optycznego do drugiej z nich i dopiero tam ponownie się połączyć. Badając fotoluminescencję próbki, można określić, czy dochodzi do tunelowania ekscytonów, czy też takowe rekombinują tam, gdzie powstały.



# Rozdział 1

## Próbka

Próbka została wykonana przez dr hab. Wojciecha Pacuskiego z Zakładu Fizyki Ciała Stałego. Do jej wykonania skorzystano z dwukomorowej maszyny MBE. Całość została wyhodowana na podstawce z (100) GaAs:Si. Dalej zastosowano warstwę buforową CdZnMgTe o grubości 1  $\mu\text{m}$ . Na buforze wyhodowano 26 par zwierciadeł Bragga oznaczonych jako DBR, 3 studnie kwantowe (Cd,Zn,Mn)Te o grubości 10 nm oddalone od siebie również o 10 nm, barierę z CdZnMgTe o grubości 125 nm i 3 studnie kwantowe CdZnMgTe o grubości 10 nm i odległości od siebie wynoszącej 10 nm. Całość zwięczają 22 pary zwierciadeł Bragga. Schemat próbki wraz z procentową zawartością pierwiastków znajduje się na Rysunku 1.1.



Rysunek 1.1: Schemat próbki.

Studnie tu wykorzystane są wykonane z materiału typu DMS, czyli półprzewodnika pół-magnetycznego. Materiał tego typu wykazuje właściwości zarówno półprzewodnikowe jak i

magnetyczne, pozwalając np. na kontrolę jego poziomów energetycznych przy pomocy pola magnetycznego.



## Rozdział 2

# Metody eksperymentalne

Do wzbudzania ekscytonów wykorzystano laser o długości fali 685 nm,



## Rozdział 3

# Wyniki

### 3.1. Wyniki surowe

### 3.2. Dopasowanie do modelu

Do opisu próbki można wykorzystać prosty hamiltonian:

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} \omega_{MQW} & \Omega & 0 \\ \Omega & \omega_C & \Omega \\ 0 & \Omega & \omega_{NMQW} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

gdzie  $\omega_{MQW}$ ,  $\omega_{NMQW}$  i  $\omega_C$  oznaczają kolejno energie studni magnetycznej, niemagnetycznej i modu optycznego i są zależne od wartości pola magnetycznego  $B$ , a  $\Omega$  oznacza siłę sprzężenia między studnią a modem. Jak widać, hamiltonian nie opisuje bezpośredniego przejścia z jednej studni do drugiej. Wynika to z szerokiej przerwy między studniami; bezpośredni transport jest pomijalny, jedyny wkład pochodzi od pośrednictwa modu optycznego, czyli procesu postaci rekombinacja  $\rightarrow$  powstanie ekscytonu w drugiej studni  $\rightarrow$  ponowna rekombinacja w drugiej studni.



## Rozdział 4

## Podsumowanie



Dodatek A

Może będzie potrzebne





# Bibliografia

- [1] B. Deveaud, F. Clerot, A. Chomette, A. Regreny, R. Ferreira, G. Bastard, and B. Sermage. Tunneling and relaxation in coupled quantum wells. *EPL (Europhysics Letters)*, 11:367, 02 1990.
- [2] S. A. Gurvitz, I. Bar-Joseph, and B. Deveaud. Quantum tunneling and relaxation in asymmetric coupled wells. *Phys. Rev. B*, 43:14703–14706, Jun 1991.
- [3] I. Lawrence, S. Haacke, H. Mariette, W. W. Rühle, H. Ulmer-Tuffigo, J. Cibert, and G. Feuillet. Exciton tunneling revealed by magnetically tuned interwell coupling in semiconductor double quantum wells. *Phys. Rev. Lett.*, 73:2131–2134, Oct 1994.