Współczesna fizyka ciała stałego

Struktury półprzewodnikowe o obniżonej wymiarowości

- studnie kwantowe,
- druty kwantowe,
- kropki kwantowe
-
- fulereny, nanorurki, grafen...

•

Kwantowe efekty rozmiarowe

Ograniczenie ruchu w jednym wymiarze

Zasada nieoznaczoności:

Dodatkowa energia kinetyczna związana z ograniczeniem przestrzennym elektronu



 $\Delta p_x \sim \frac{h}{\Lambda x}$

Dodatkowa energia powinna być większa niż energia termiczna



Typowy półprzewodnik:

Warunek ten jest równoważny Przyjęciu, że ograniczenie obszaru ruchu jest rzędu długości fali de Broglie

$$\Delta x \sim \lambda_{deB} = \frac{h}{p_x}$$

Nanotechnologia

Studnie kwantowe



Niebieska optoelektronika













Niebieski laser



Reguły wyboru dla przejść w studni kwantowej

Przybliżenie dipolowe, badamy element macierzowy przejścia typu

$$M = \langle f | -e\vec{r}\vec{E} | i \rangle$$
 $\vec{E} - amplituda pola elektrycznego światła$

Rozważamy padanie światła wzdłuż osi z, prostopadłe do płaszczyzny studni (x,y) Wektor polaryzacji światła znajduje się zatem w płaszczyźnie studni, stąd

$$M \sim < f |x| i > = \int \psi_f^* x \psi_i d^3 r$$

$$\psi_i = \frac{1}{\sqrt{V}} u_v(\vec{r}) \varphi_{hn}(\vec{r}) \exp(i\vec{k}_{xy}\vec{r}_{xy}) \qquad \psi_f = \frac{1}{\sqrt{V}} u_c(\vec{r}) \varphi_{en'}(\vec{r}) \exp(i\vec{k}_{xy}\vec{r}_{xy})$$

W przypadku studni kwantowej kierunki x, y są równoważne, a kierunek z jest inny!!!

$$< f |x|i > = < f |y|i > \neq < f |z|i >$$

Rozważmy przejście ze stanu dziurowego n_h do stanu elektronowego n_e Podobnie jak w przypadku 3D, dla przejść prostych $\vec{k}_{xy} = \vec{k}_{xy}$ Dzięki temu możemy napisać $M = M_{cv}M_{nn}$

$$M_{cv} = \int u_c^* x u_v d^3 r \qquad M_{nn'} = \int \varphi_{en'}^* \varphi_{en} dz \qquad \Longrightarrow \qquad \Delta n = n - n' = 0$$

Decyduje przekrycie funkcji falowych elektronu i dziury!!!

Czyli przejścia dozwolone pomiędzy stanami o tej samej symetrii!!!

Metody badania struktur kwantowych

- absorpcja
- fotoprzewodnictwo
- luminescencja
- pobudzanie luminescencji
- odbicie
- fotoodbicie, elektroodbicie
- •

Przekład: Kondensacja polaritonów



Mikrownęka – zwiększenie sprzężenia ekscyton-foton



J. Kasprzak et al. Nature 443, 409 (2006)

Polaryzacja w stanie nieskondensowanym i skondensowanym



Figure 4 | **Polarization properties of the polariton emission. a**, The polar plot displays the intensity of the ground state emission at $k_{\parallel} = 0$ (within a 0.4° aperture) measured as a function of the angle of the linear analyser.

emission intensity is the same for horizontal and vertical polarizations. Above threshold, emission from the excited states remains depolarized, but emission from the ground state is strongly linearly polarized. Note the linear

J. Kasprzak et al. Nature 443, 409 (2006)

Struktury kwantowe II typu – nadzieja na realizację kondensatu ekscytonowego



Dyfuzja nośników studniach typu II



Jak zbadać stany wzbudzone układu? \Longrightarrow

Widmo pobudzania luminescencji!

- Pobudzamy próbkę przy użyciu lasera strojonego.
- Mierzymy intensywność luminescencji odpowiadającą danej energii pobudzania



Intensywność świecenia zależy silnie od współczynnika absorpcji dla danej energii pobudzania – metoda badania struktury energetycznej systemu!

A w polu magnetycznym...





Widma mikroluminescencji (µ - PL)



Kompleksy ekscytonowe...

B. Piętka, Praca Doktorska (2007)



Jak hodujemy kropki kwantowe?

Samorganizujące się kropki kwantowe



Kropki kwantowe powstają z materiału o stałej sieci różniącej się od stałej sieci matrycy







µPL- Adam Babiński et al.



Pole magnetyczne modyfikuje funkcje falowe -daje możliwość identyfikacji stanów (efekty orbitalne, efekty spinowe)

µPL- Adam Babiński et al.

Żeby badać pojedyncze kropki...

- "mesy",
- maski,
- struktury z niską gęstością kropek kwantowych...

Kropki kwantowe GaN/AlGaN



Wzrost– K. Pakuła, AFM - Rafał Bożek, IFD UW



PL, µPL- Barbara Chwalisz et al.









Nanotechnologia może sprawić, że węgiel zaświeci? Nanorurki....



FIG. 1. Scanning electron micrograph of nanotubes on pillars. An array of silicon pillars is shown from an angle ($\sim 30^{\circ}$). Single walled nanotubes are clearly seen bridging the pillars. On close inspection, some tubes lying on the surface below can also be seen.



FIG. 2. Photoluminescence spectra: (a) from the pillar areas of an argon-only control sample; (b) on flat areas of a methane CVD sample with abundant nanotubes; (c) on pillar areas of methane CVD samples with bridging nanotubes. Spectra were taken at room temperature in air with the μ PL configuration (see text), using a HeNe laser (633 nm) at 1.7 mW, with a 2 μ m diameter spot.

J. Lefebvre et al. PRL, 90, 217401-1 (2003)

Lampy elektronowe



Pierwsze tranzystory...

Julius Edgar Lilienfeld (ur. we Lwowie) – tranzystor polowy Kanada, 1925





Pierwszy tranzystor, ostrzowy germanowy był wielkości dłoni... (grudzień1947 r.)

John Bardeen, William Shockley, Walter Brattain Bell Labs, 1948 r. (Nobel 1956)

http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor#History

Tranzystor polowy

+

2.5 V 2 V 1.75 V

1.5 V 1.25 V — 1 V

- 0.75 V 0.5 V 0.25 V 0 V



0

1

2

3

4

5

 $V_{ds}(V)$

6

7

8

9

10



Nanotechnologia

Core i7-9xx Extreme Edition (2010)

800 000 000 tranzystorów, 2, 4, 8 rdzeni

technologia 45 nm - 32 nm

Zegar max 3,33 GHz

9 warstw

Moc ok. 65 W $\,$





AMD Athlon II X2 B24 (2010)

450 000 000 tranzystorów; 2,3,4 rdzenie

technologia 45 nm.

Zegar max 2,8 – 3,1 GHz

11 warstw

Moc 65 W -140 W





Granice miniaturyzacji?



Myślimy, że tranzystor jest zbudowany tak.



25 nm MOSFET Produkcja od 2008



4,2 nm MOSFET Produkcja ???

Asen Asenov, Glasgow

David Williams Hitachi-Cambridge

Najszybszy tranzystor na grafenie 300-GHz



L Liao et al. Nature 467, 305 (2010)

IBM pierwszy układ scalony w oparciu o tranzystor z grafenu...



B) Schemat montażowy



Yu-Ming Lin et al., Wafer-Scale Graphene Integrated Circuit

10 JUNE 2011 VOL 332 SCIENCE

Brak przerwy energetycznej – problem dla grafenowej elektroniki cyfrowej...

Inne materiały warstwowe



Pojedyncze warstwy

Konkurencję dla grafenu wykujemy ze skał? Tak, jeśli...



Prace nad MoS₂ prowadzone są również na Wydziale Fizyki UW

MoS₂ - konkurencja dla grafenu



B. Radisavljevic et al., Nature naotechnology (2011)

Epitaksja z wiązek molekularnych MBE – Molecular beam epitaxy



Alfred Yi Cho – ojciec MBE

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

VOLUME 41, NUMBER 7

JUNE 1970

Morphology of Epitaxial Growth of GaAs by a Molecular Beam Method: The Observation of Surface Structures

А. Ү. Сно

Bell Telephone Laboratories, Incorporated, Murray Hill, New Jersey 07974

(Received 24 December 1969)

MBE – zasadnicze elementy



- źródła wycelowane w podłoże
- przesłony źródeł
- niezależne grzałki źródeł i podłoża
- wysoka próżnia

MBE – zasadnicze elementy



MBE – zasadnicze elementy



Frank Tsui, University of North Carolina

Oscylacje RHEED



pascal-co-ltd.co.jp

Istotne cechy techniki MBE



 Możliwość wytwarzania struktur wielowarstwowych złożonych ze związków o różnych strukturach elektronowych, np. GaAs – AlGaAs (band-gap engineering =

inżynieria przerwy energetycznej)

- dobra kontrola ostrości interfejsu (zmiana składu możliwa w jednej warstwie atomowej), możliwość otrzymywania pojedyńczej warstwy atomowej (1 ML)
- możliwość otrzymywania supersieci (np. GaAs-AlGaAs-GaAs- itd.) o okresie od kilku Å.
- różne możliwości domieszkowania, np. dla (AI)GaAs w szerokim zakresie
- stosunkowo niskie temperatury wzrostu
- możliwości kontroli wzrostu przy pomocy RHEED, próżniomierzy, spektroskopii optycznej
- ultra wysoka próżnia (UHV)

T. Słupiński

Po co UHV - ultra wysoka próżnia?

UHV: p < 10⁻⁹ Tr

760 Torów (Tr, mmHg) to 1 atmosfera

1 Tr = 1 mmHg = 133,32 Pa

• Droga swobodna atomów od źródła do podłoża (ale dla p = 10^{-9} Tr droga swobodna to aż 50 km)

Czystość warstw

to jest zasadniczy powód pompowania

MBE – historia podwyższania ruchliwości elektronów



Hodowanie próżni



- Wielostopniowe wprowadzanie podłoży do komory wzrostu
- Wygrzewanie

Warstwy epitaksjalne - supersieci





Solotronika - elektronika oparta na pojedynczych atomach



Kropka kwantowa z pojedynczym jonem magnetycznym



Laboratorium Ultraszybkiej Magnetospektroskopii Nanostruktur Półprzewodnikowych

Laboratorium Epitaksji z Wiązek Molekularnych (MBE)

Cele solotroniki:

- Zapis
- Przetwarzanie
- Przesyłanie
- Odczyt





informacji przy użyciu pojedynczych domieszek i defektów w półprzewodnikach.

Tranzystory i pamięci na jednym atomie, oraz elementy komputera kwantowego.



Sterowanie właściwościami

- Elektrycznymi
- Optycznymi
- Magnetycznymi pojedynczych domieszek

Nasza tegoroczna praca



NATURE COMMUNICATIONS | 5:3191 | DOI: 10.1038/ncomms4191 | www.nature.com/naturecommunications

ARTICLE

Received 24 Jul 2013 | Accepted 2 Jan 2014 | Published 27 Jan 2014

DOI: 10.1038/ncomms4191

OPEN

Designing quantum dots for solotronics

J. Kobak^{1,*}, T. Smoleński^{1,*}, M. Goryca¹, M. Papaj¹, K. Gietka¹, A. Bogucki¹, M. Koperski¹, J.-G. Rousset¹, J. Suffczyński¹, E. Janik¹, M. Nawrocki¹, A. Golnik¹, P. Kossacki¹ & W. Pacuski¹

¹Institute of Experimental Physics, Faculty of Physics, University of Warsaw, Hoża 69, Warsaw 00-681, Poland. * These authors contributed equally to this work. Correspondence and requests for materials should be addressed to W.P. (email: Wojciech.Pacuski@fuw.edu.pl).

- · Pierwsza optyczna obserwacja pojedynczego jonu kobaltu w kropce kwantowej
- Wydłużenie czasu pamięci opartej na pojedynczym jonie magnetycznym



Wzrost kropek kwantowych



Nowe MBE na Wydziale Fizyki UW (w budynku warsztatów IFD)





CdTe + Co lub Mn



Wzrost kropek kwantowych



Nowe MBE na Wydziale Fizyki UW (w budynku warsztatów IFD)





CdSe + Mn



Kropki kwantowe



Zdjęcie TEM - J. Borysiuk



Rozdzielczość przestrzenna mikroskopu <1µm





Widma fotoluminescencji kropki kwantowa z pojedynczym jonem magnetycznym



magnety cznego



Kobak et al., Nature Communications

Mikrostruktura i kropka z 1 jonem Mn



Article

pubs.acs.org/crystal

Micropillar Cavity Containing a CdTe Quantum Dot with a Single Manganese Ion

W. Pacuski,^{*,†,‡} T. Jakubczyk,^{†,‡} C. Kruse,^{†,⊥} J. Kobak,[‡] T. Kazimierczuk,[‡] M. Goryca,[‡] A. Golnik,[‡] P. Kossacki,[‡] M. Wiater,[§] P. Wojnar,[§] G. Karczewski,[§] T. Wojtowicz,[§] and D. Hommel[†]

[†]Institute of Solid State Physics, University of Bremen, PO Box 330 440, D-28334 Bremen, Germany [‡]Institute of Experimental Physics, Faculty of Physics, University of Warsaw, Hoża 69, PL-00-681 Warsaw, Poland [§]Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, al. Lotników 32/46, PL-02-668 Warsaw, Poland

ABSTRACT: We report on the method of fabrication of a photonic microstructure that contains a single magnetic ion. Exactly one manganese ion was introduced into a self-assembled CdTe quantum dot, which was located in a ZnTe based micropillar cavity. The multistep fabrication procedure includes molecular beam epitaxy growth, optical characterization, and focused ion beam etching. Realization of the structure was confirmed by the observation of spectroscopic exciton lines split by six due to the exchange interaction with a manganese ion. The



cavity mode was tuned to the quantum dot emission energy by a variation of the temperature. The presented technology is developed to be applied in optoelectronics based on solitary dopants.