

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: $\Delta p_x \sim \frac{\hbar}{\Delta x}$

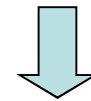
Dodatkowa energia kinetyczna związana z ograniczeniem przestrzennym elektronu

$$\Delta E = \frac{(\Delta p)^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2}$$

Dodatkowa energia powinna być większa niż energia termiczna

$$\frac{\hbar^2}{2m(\Delta x)^2} > \frac{1}{2} k_B T \quad \Rightarrow \quad \Delta x \sim \sqrt{\frac{\hbar^2}{m k_B T}}$$

Typowy półprzewodnik:
 $m^* = 0.1 m_0$ w $T = 300$ K
 $\Delta x \sim 5$ nm



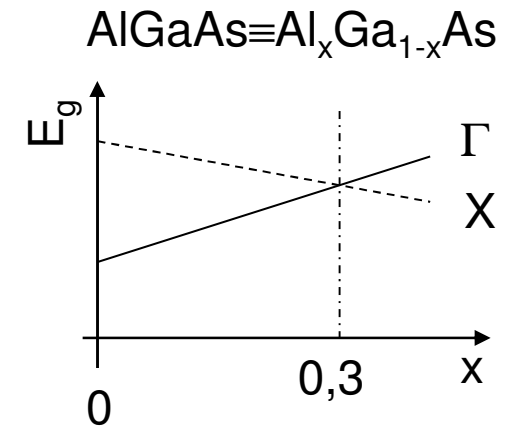
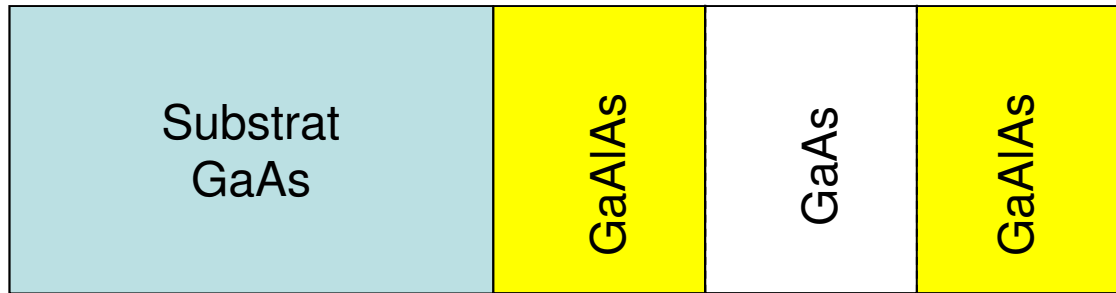
Warunek ten jest równoważny
Przyjęciu, że ograniczenie obszaru ruchu jest rzędu długości fali de Broglie

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

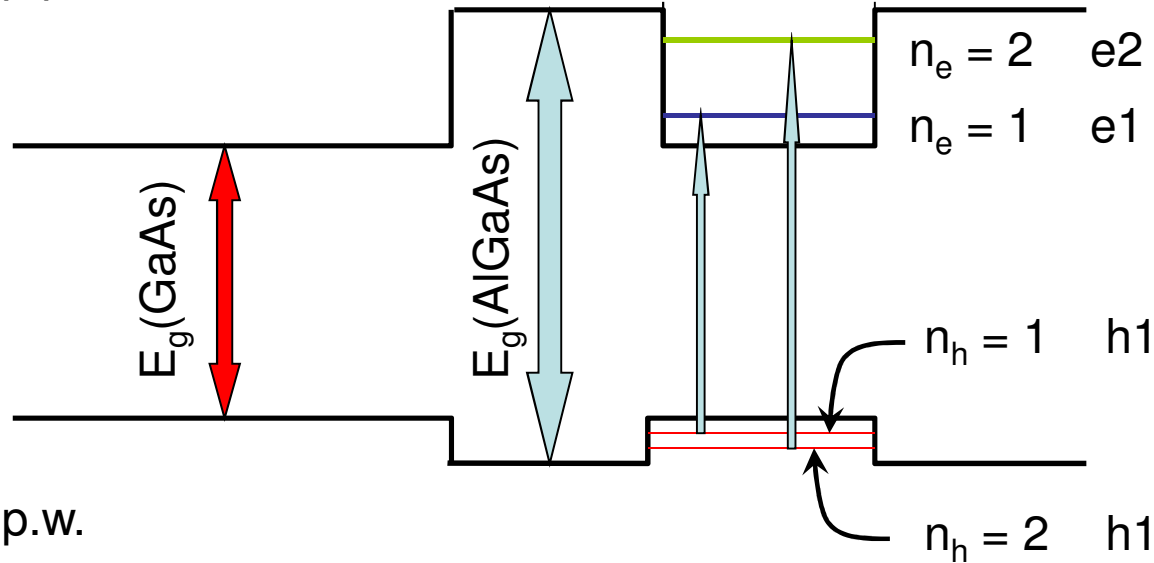
Nanotechnologia

Studnie kwantowe

Przykład struktury III-V (rodzina GaAs)



p.p.



Przejścia dozwolone:

$$\Delta n=0 \longrightarrow n_e=n_h$$

Z czego wynikają takie reguły wyboru?

Reguły wyboru dla przejść w studni kwantowej

Przybliżenie dipolowe, badamy element macierzowy przejścia typu

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

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

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

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

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

$$\langle f | x | i \rangle = \langle f | y | i \rangle \neq \langle f | z | i \rangle$$

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 $M = M_{cv} M_{nn'}$

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

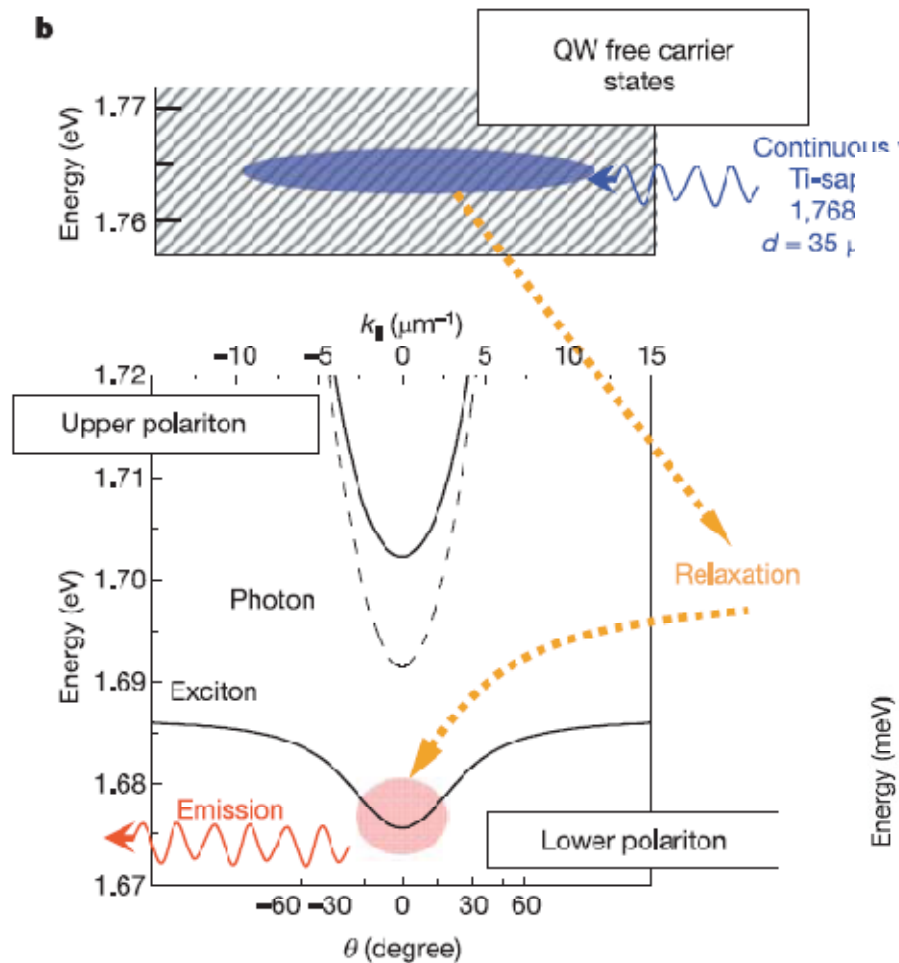
Decyduje przekrycie funkcji falowych elektronu i dziury!!!

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

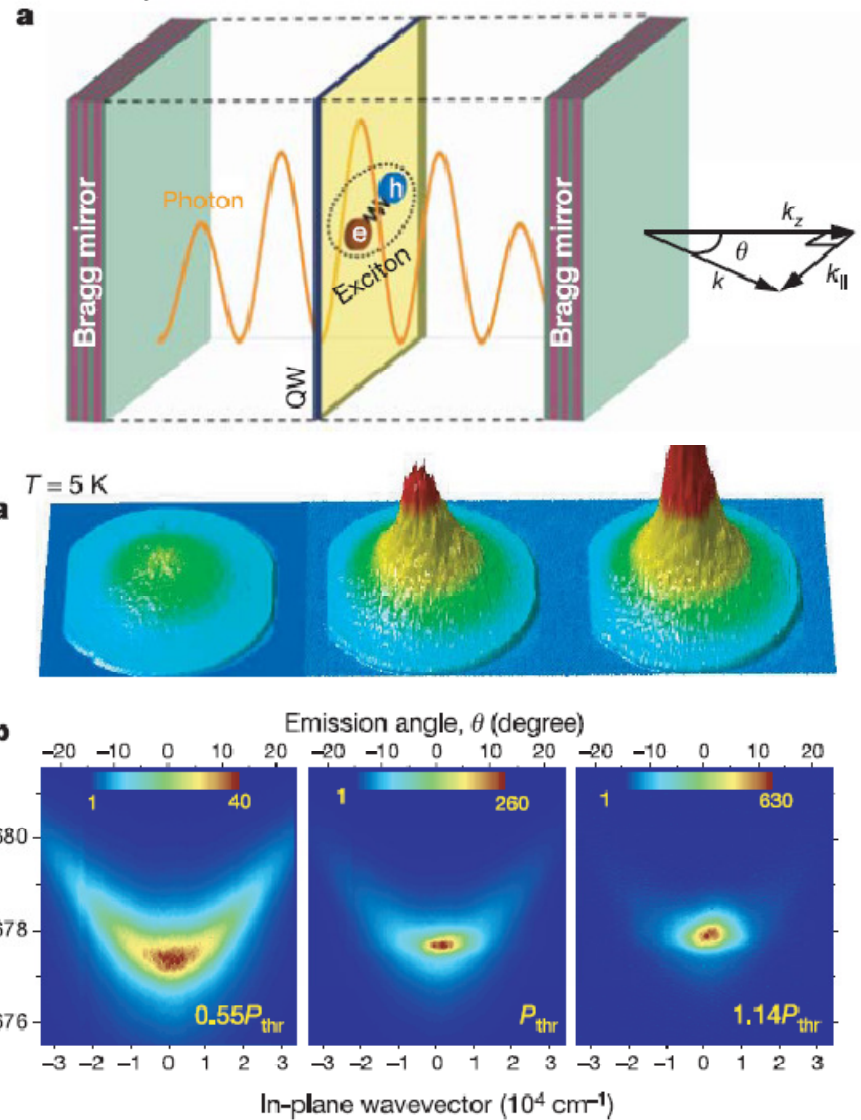
Metody badania struktur kwantowych

- 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

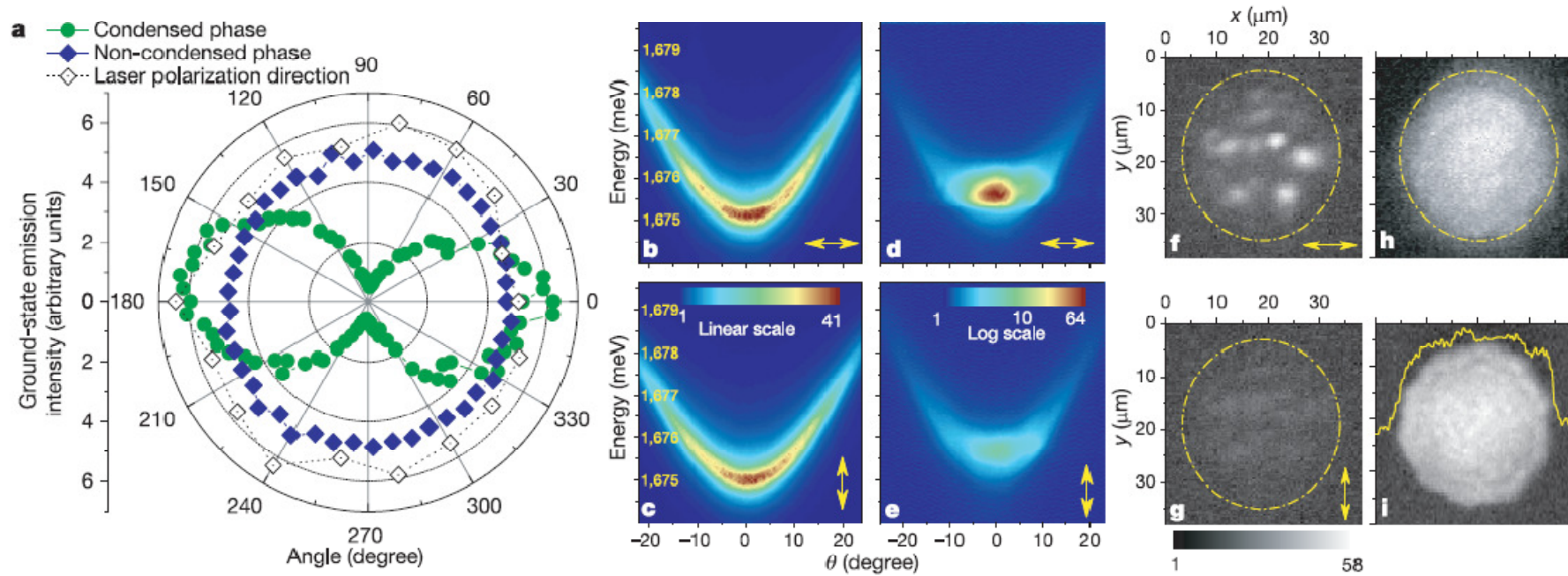
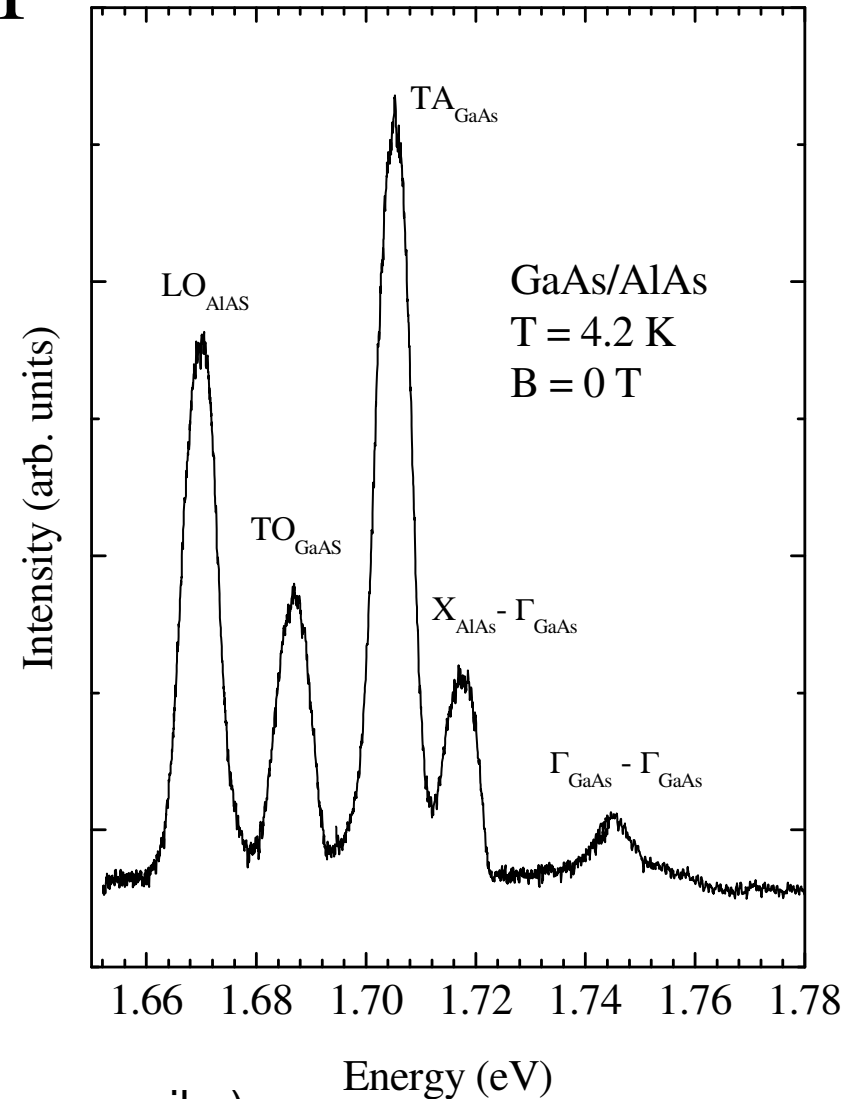
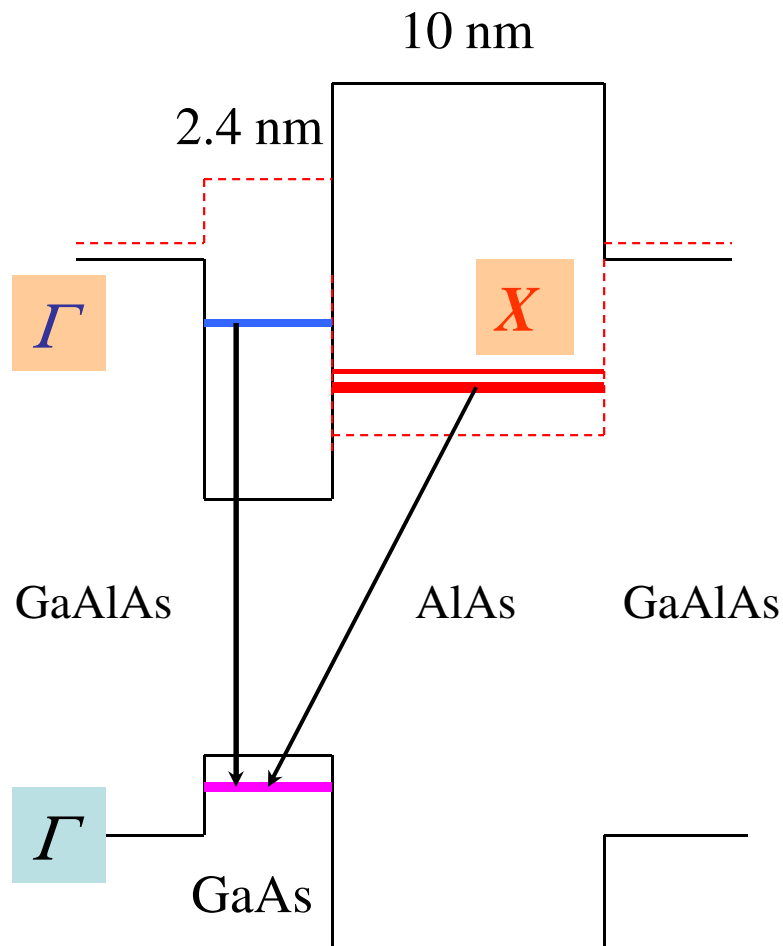


Figure 4 | Polarization properties of the polariton emission. a, The polar plot displays the intensity of the ground state emission at $k_{\parallel} = 0$ (within a 0.4° aperture) measured as a function of the angle of the linear analyser.

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

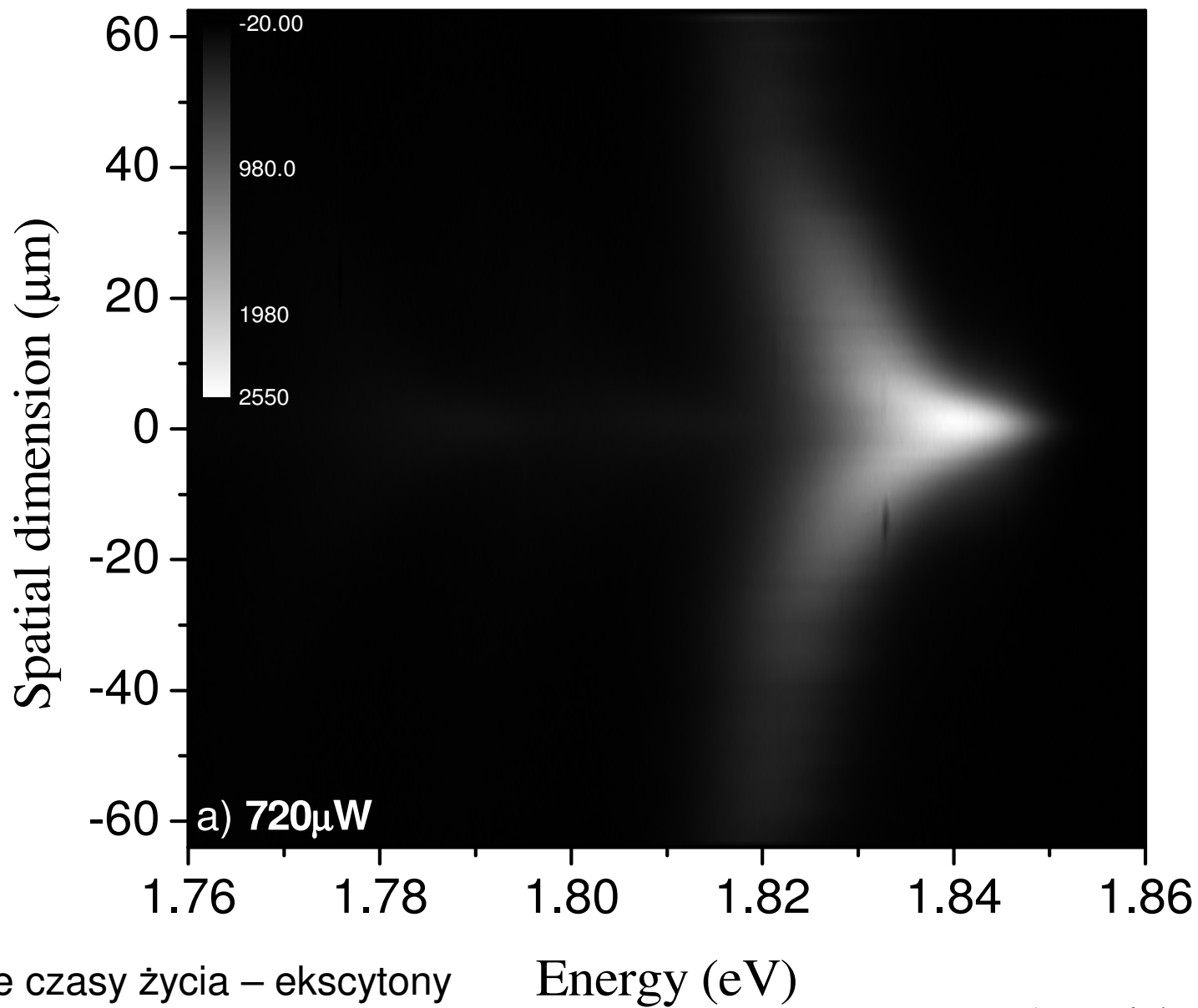
Struktury kwantowe II typu –
nadzieja na realizację kondensatu
ekscytonowego

Podwójne studnie kwantowe GaAs/AlAs typu-II



- przestrzennie rozdzielone nośniki (długie czasy zaniku)
- wzbronienie pędowe (elektrony typu X, dziury typu Γ) \rightarrow Czasy zaniku ~ 2 ms

Dyfuzja nośników studniach typu II



Długie czasy życia – ekscytony
mają czas na wędrówkę...

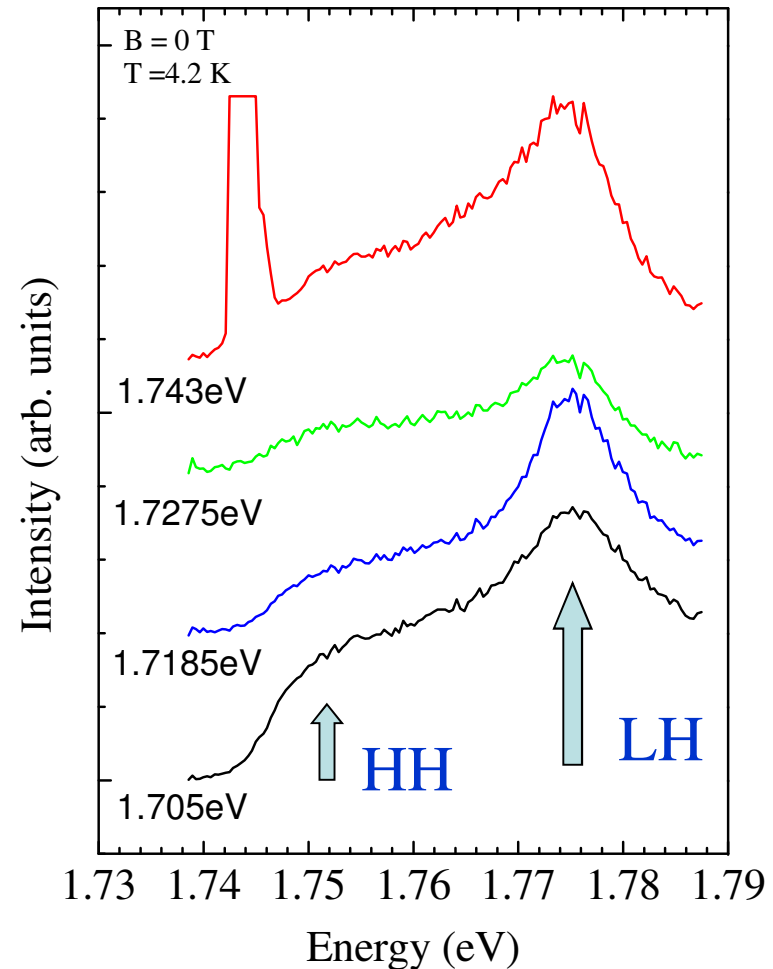
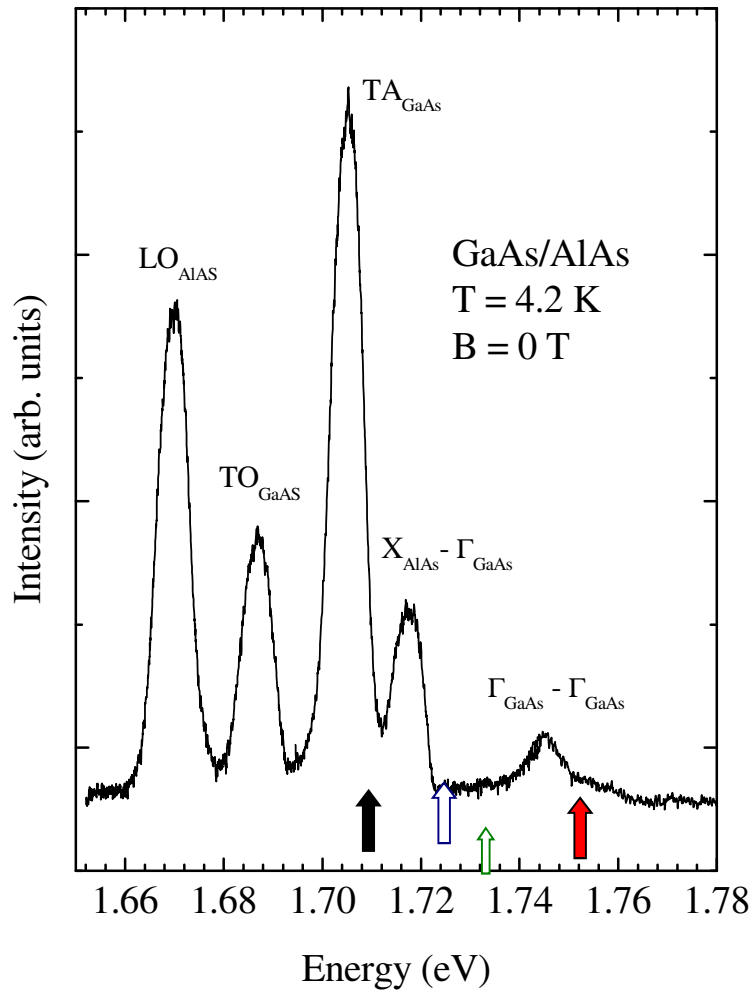
Energy (eV)

A. Lesiak, et al.

Jak zbadać stany wzbudzone układu? ➔

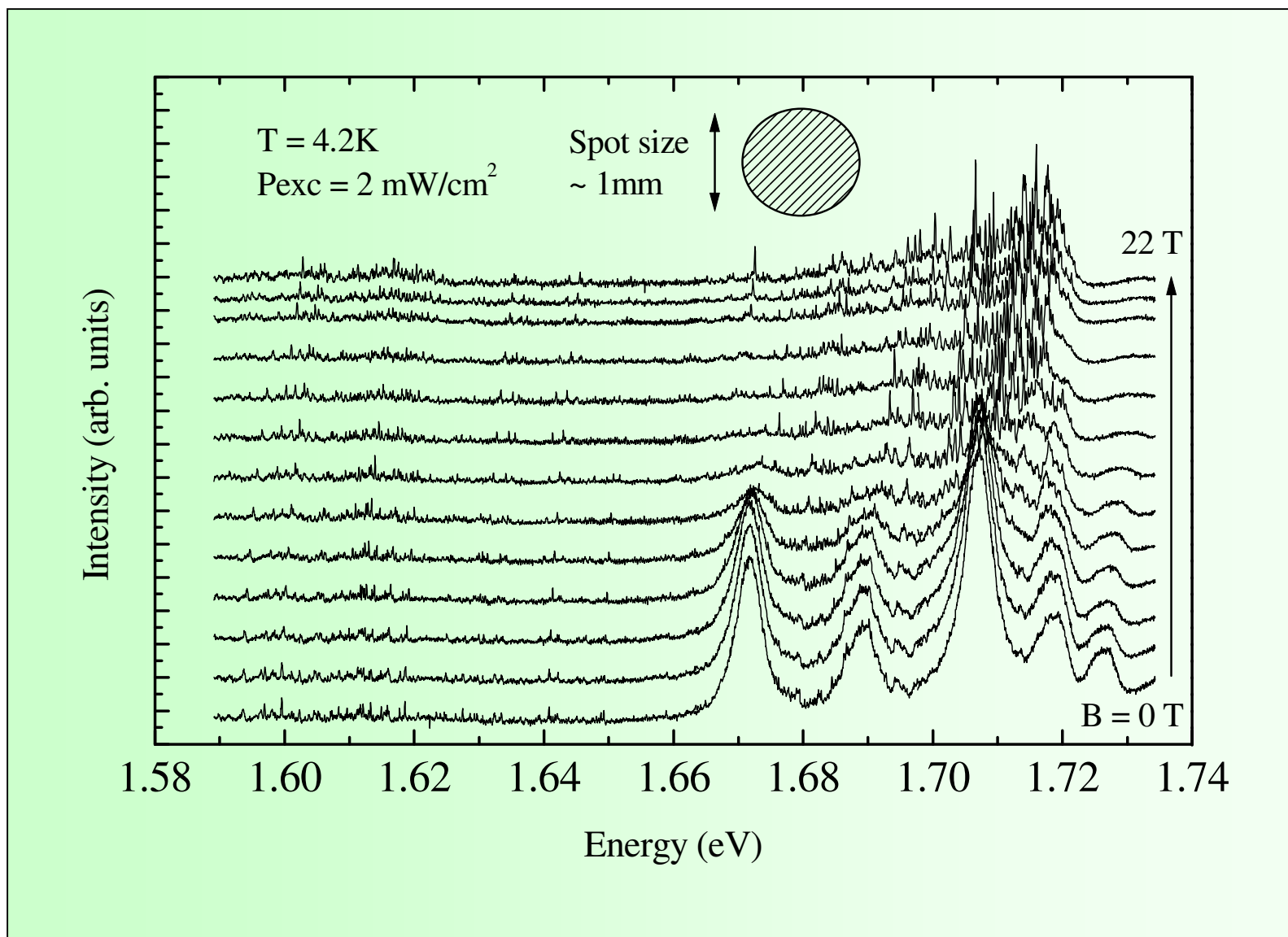
Widmo pobudzenia luminescencji!

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

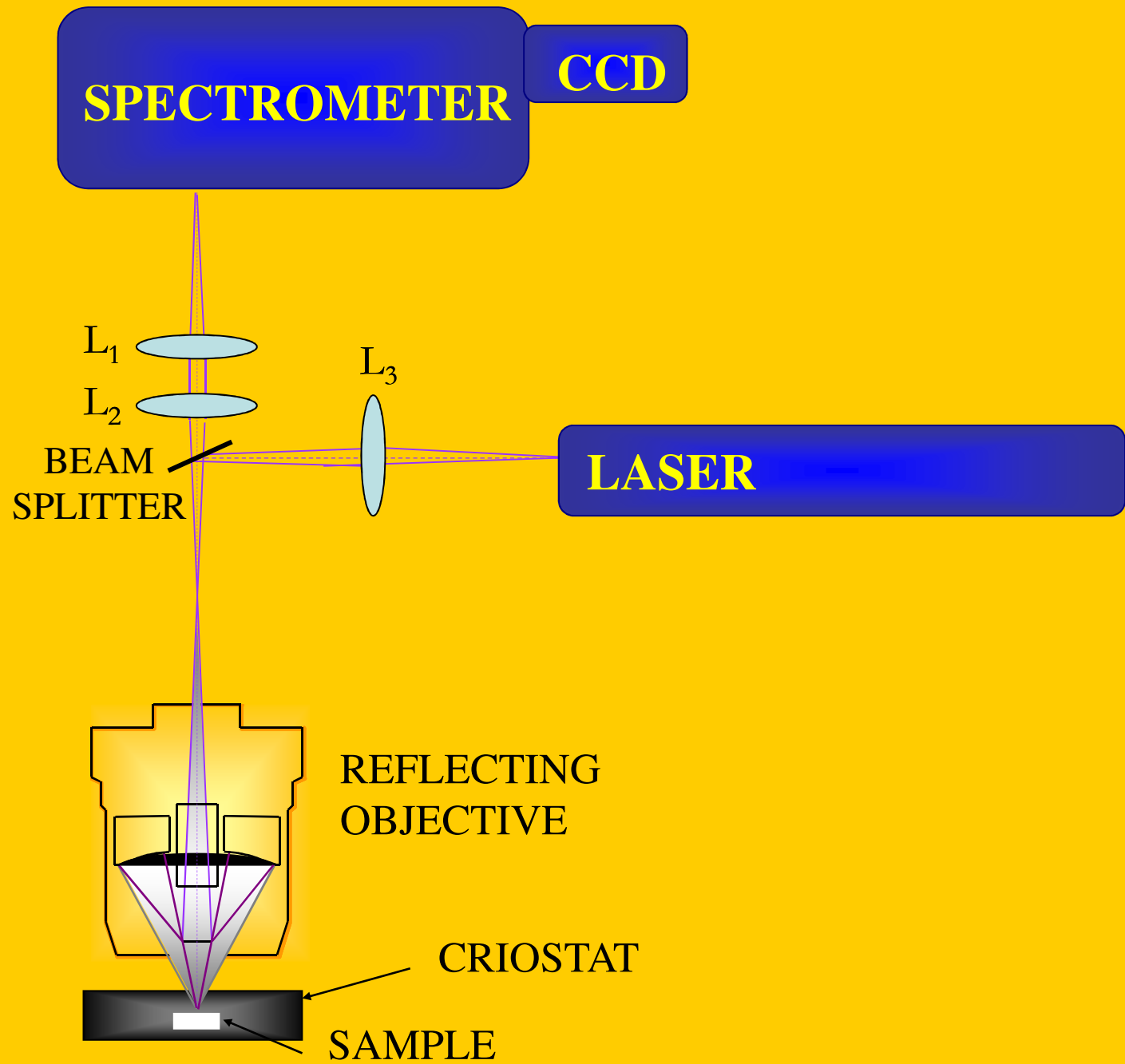


Intensywność świecenia zależy silnie od współczynnika absorpcji dla danej energii pobudzenia – metoda badania struktury energetycznej systemu!

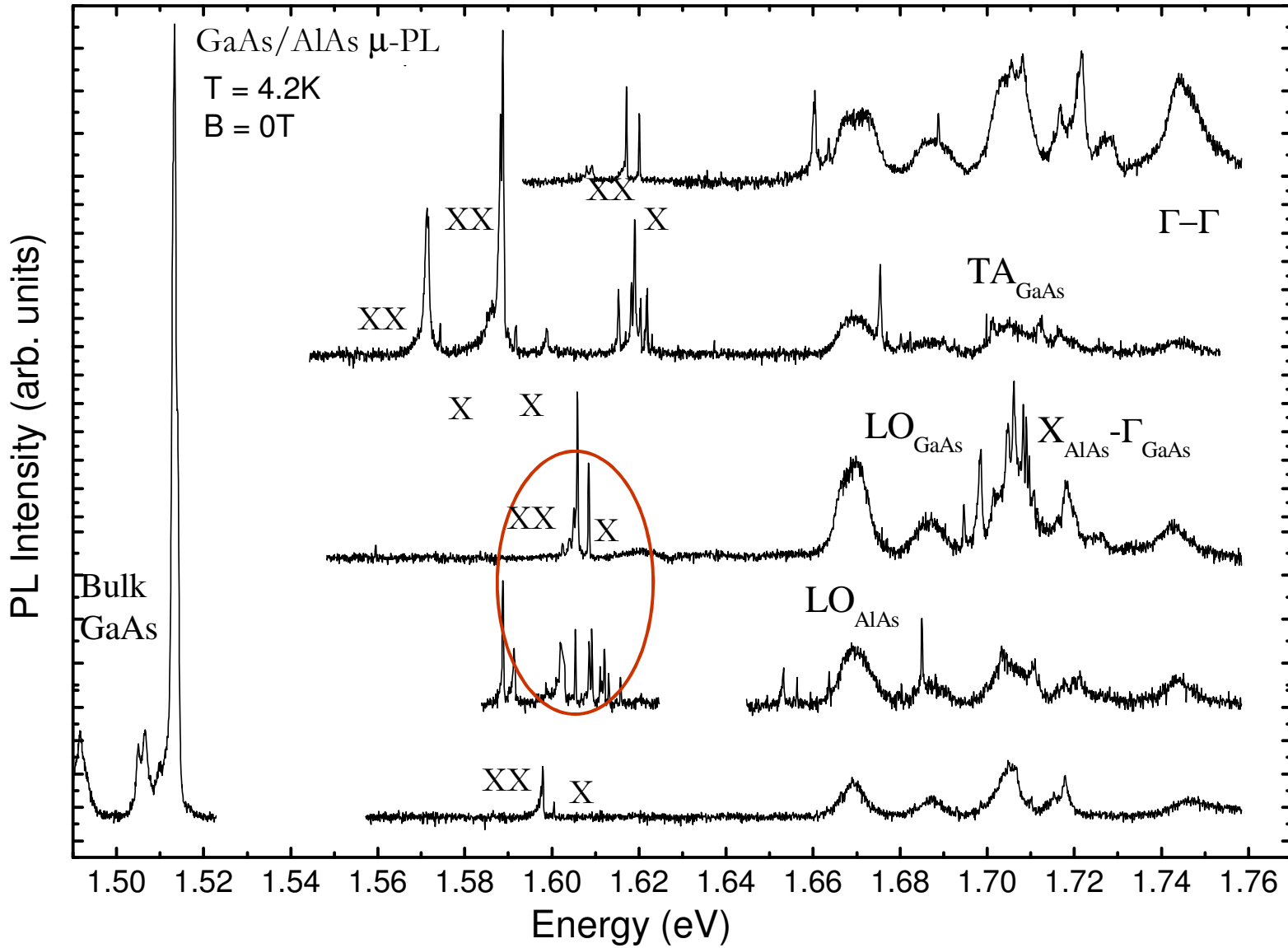
A w polu magnetycznym...



μ PL setup



Widma mikroluminescencji (μ - PL)

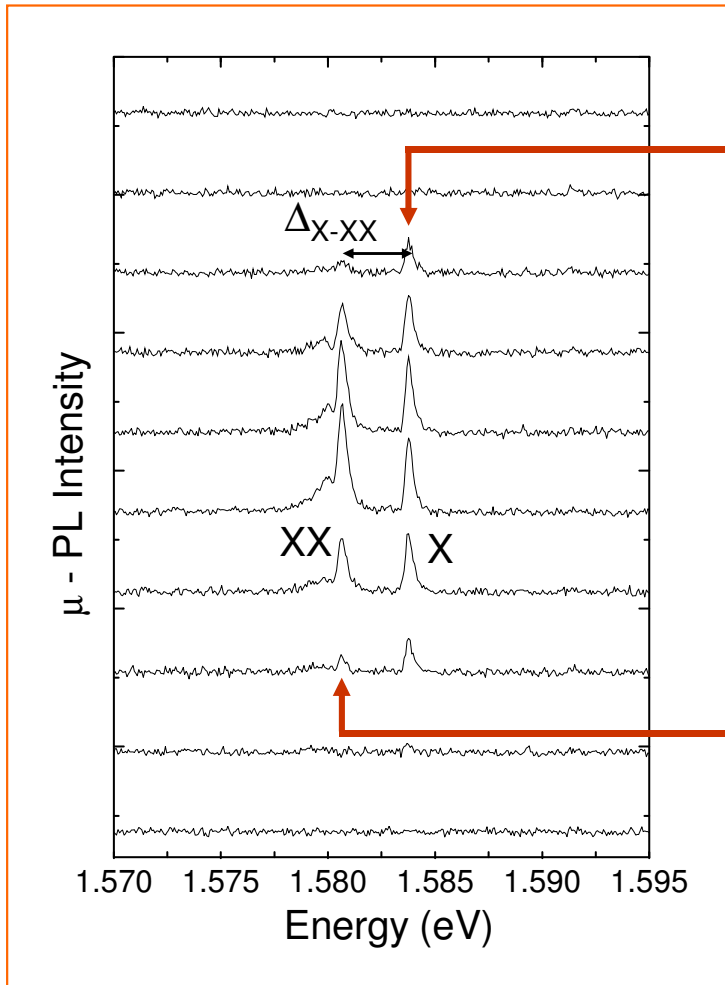


Kompleksy ekscytonowe...

B. Piętko, Praca Doktorska (2007)

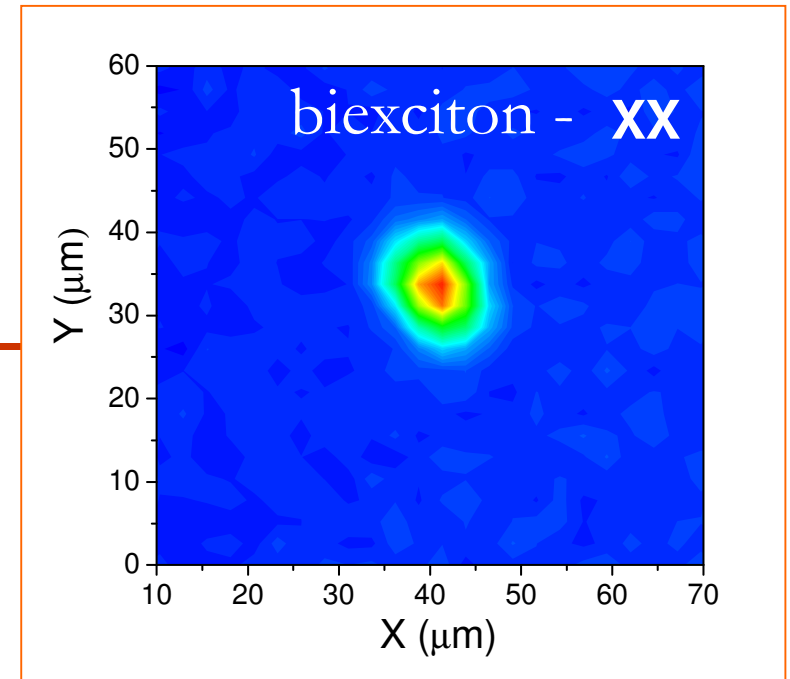
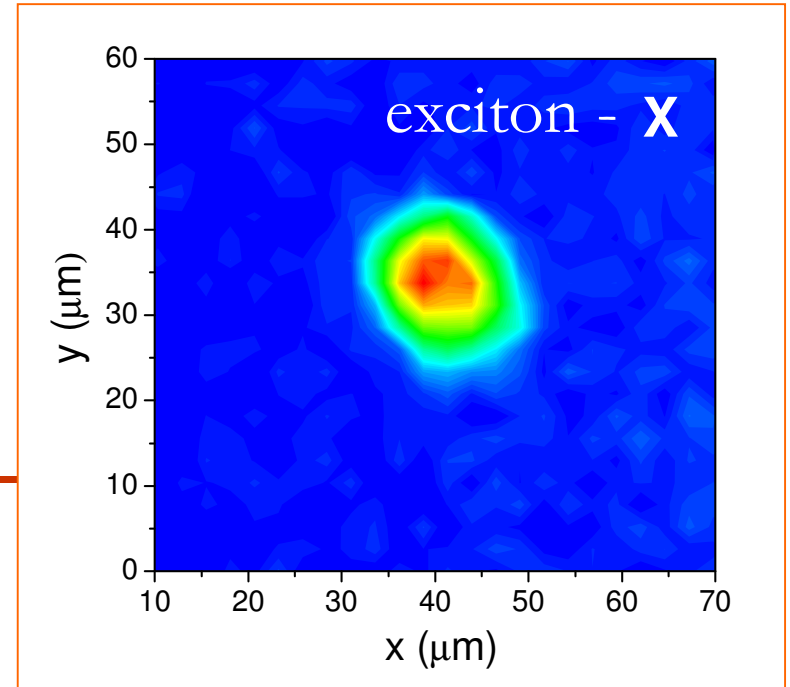
Mapowanie μ -PL

Widma mierzone w różnych miejscach na próbce



$$\Delta_{X-XX} : \\ 2.2 - 3.0 \text{ meV}$$

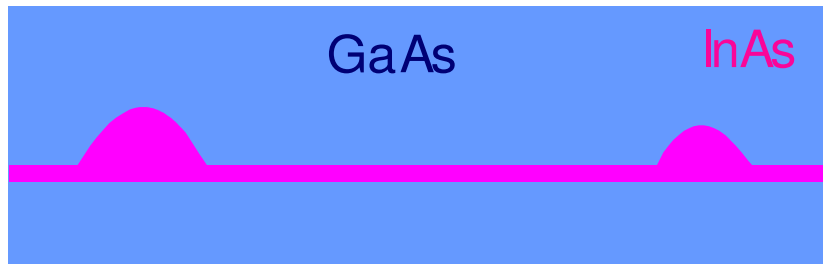
$$P_{exc} \sim 0.2 \mu W$$



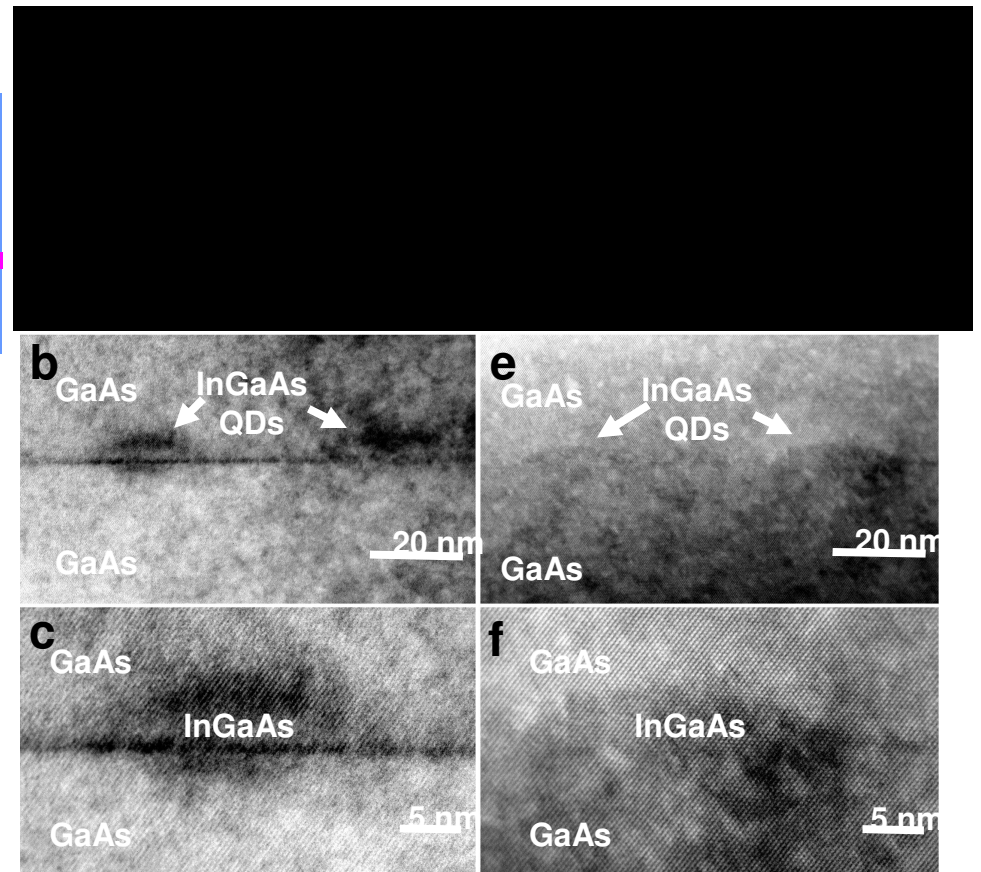
W próbce uformowały się kropki kwantowe!

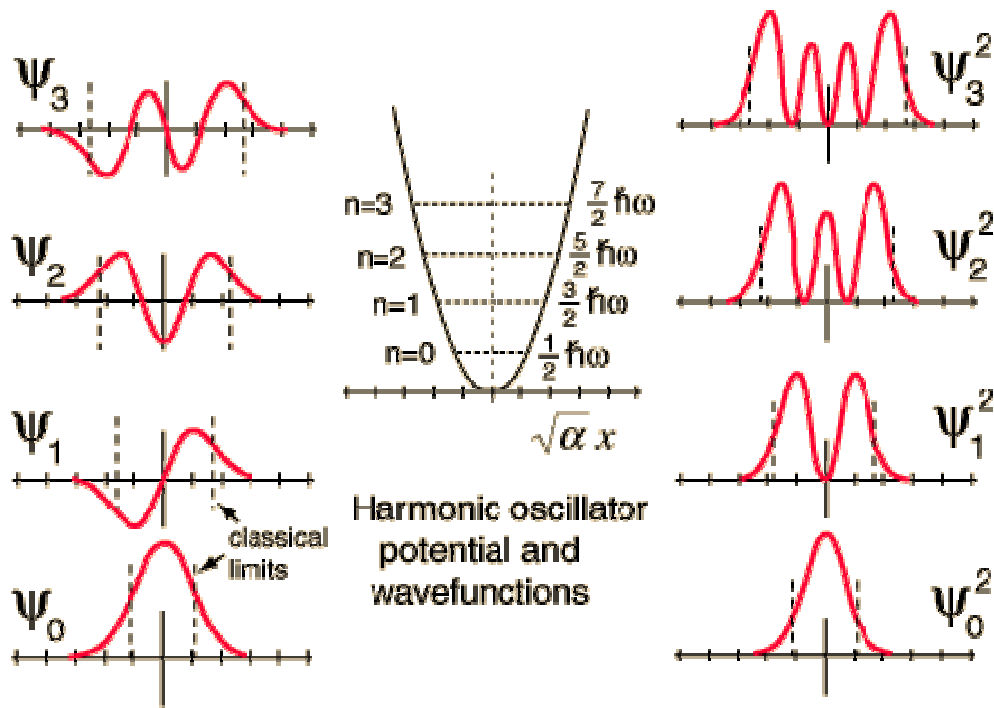
Jak zwykle hodujemy kropki
kwantowe?

Samorganizujące się kropki kwantowe

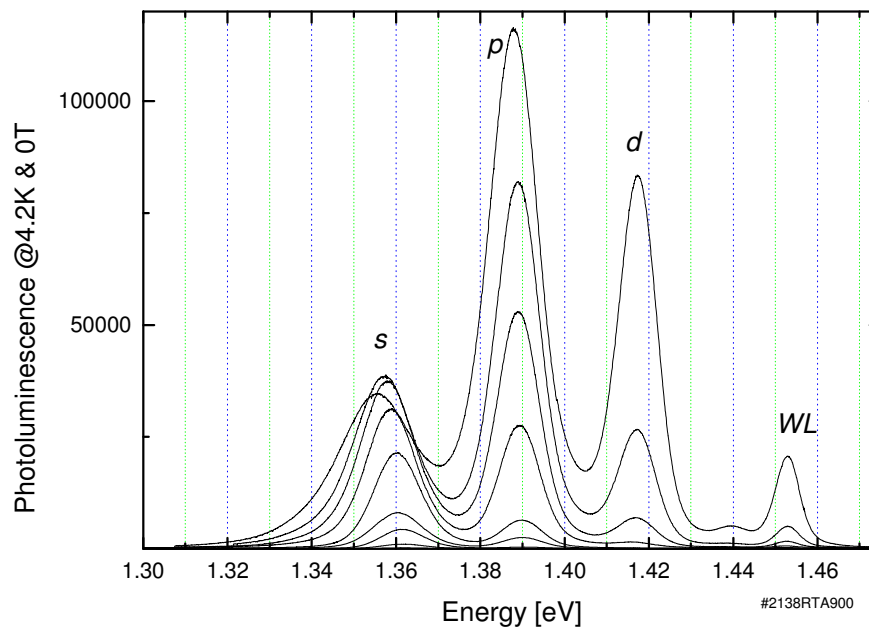
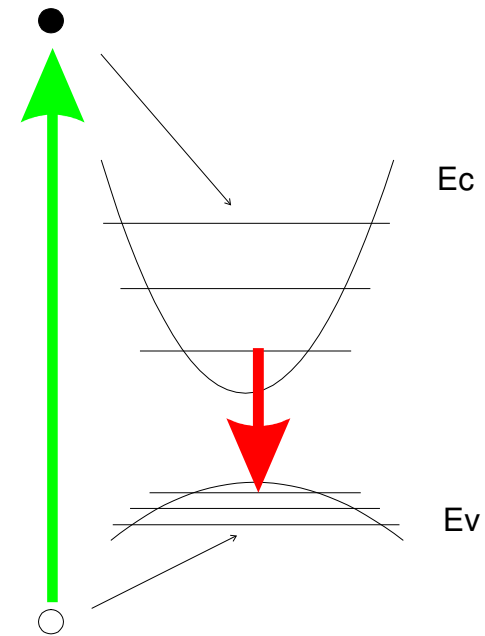


Kropki kwantowe powstają z materiału o stałej sieci różniącej się od stałej sieci matrycy



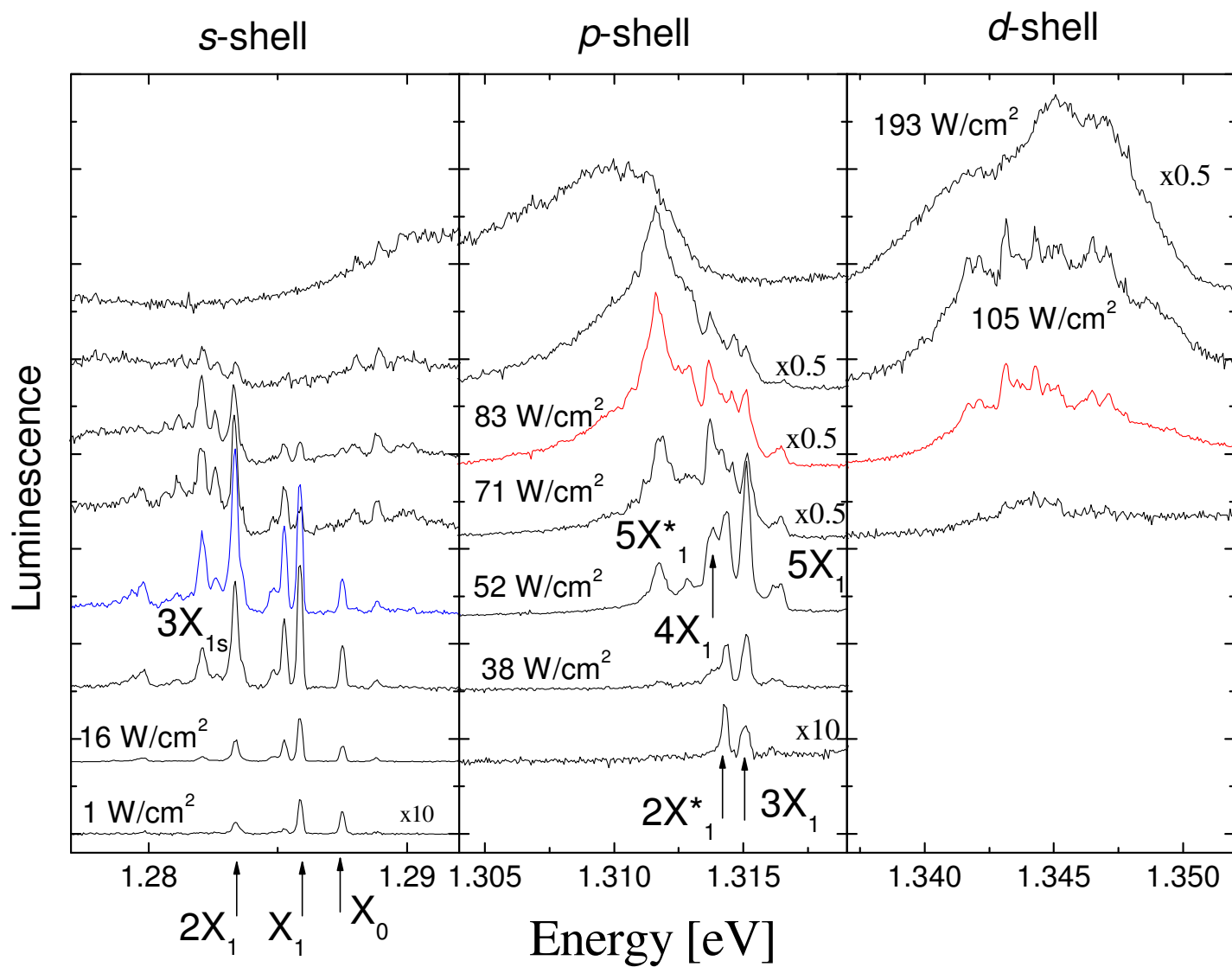


Fotoluminescencja

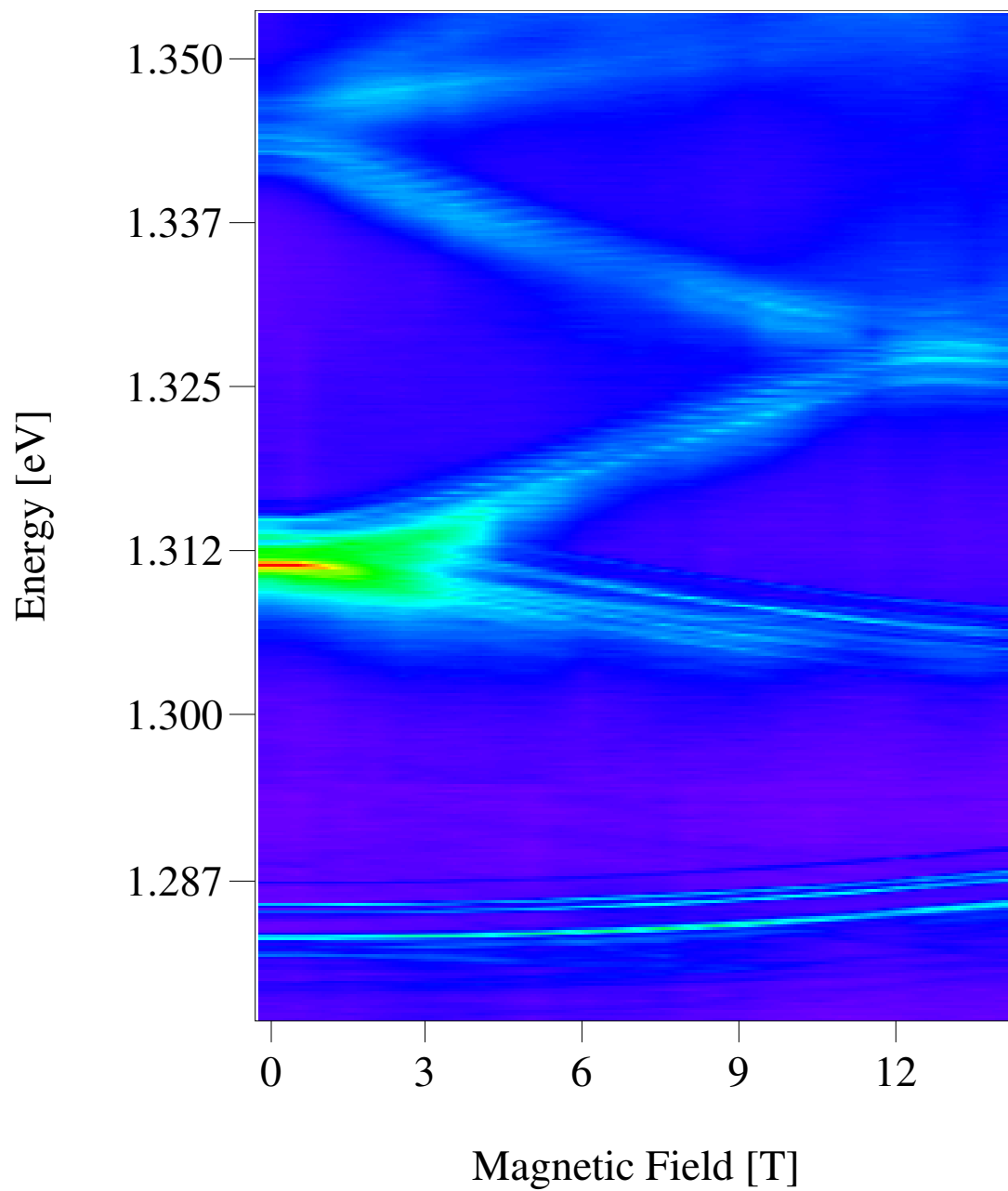


Kropki kwantowe – sztuczne atomy

PL- Adam Babiński et al.



μPL- Adam Babiński et al.



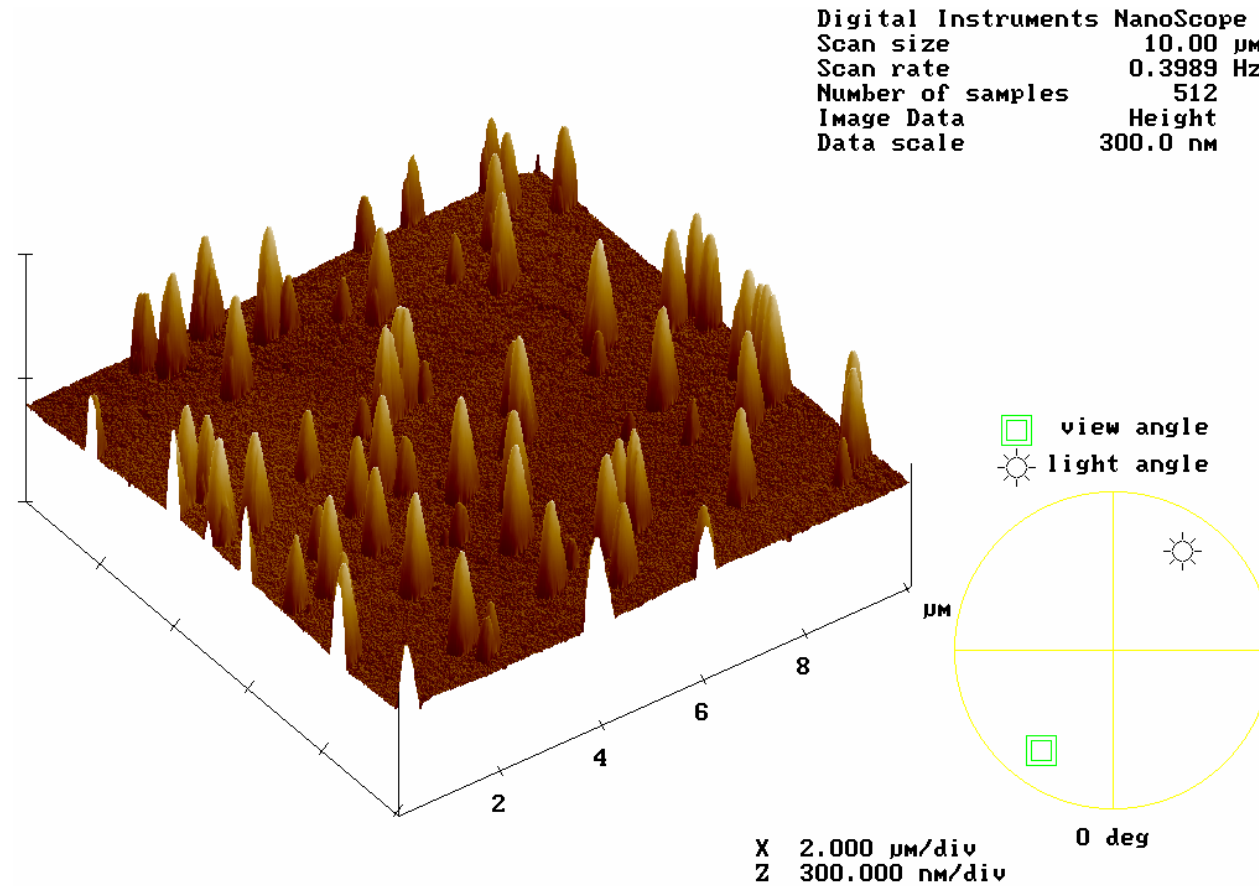
Pole magnetyczne
modyfikuje funkcje falowe
-daje możliwość identyfikacji
stanów (efekty orbitalne,
efekty spinowe)

μ PL- Adam Babiński et al.

Żeby badać pojedyncze kropki...

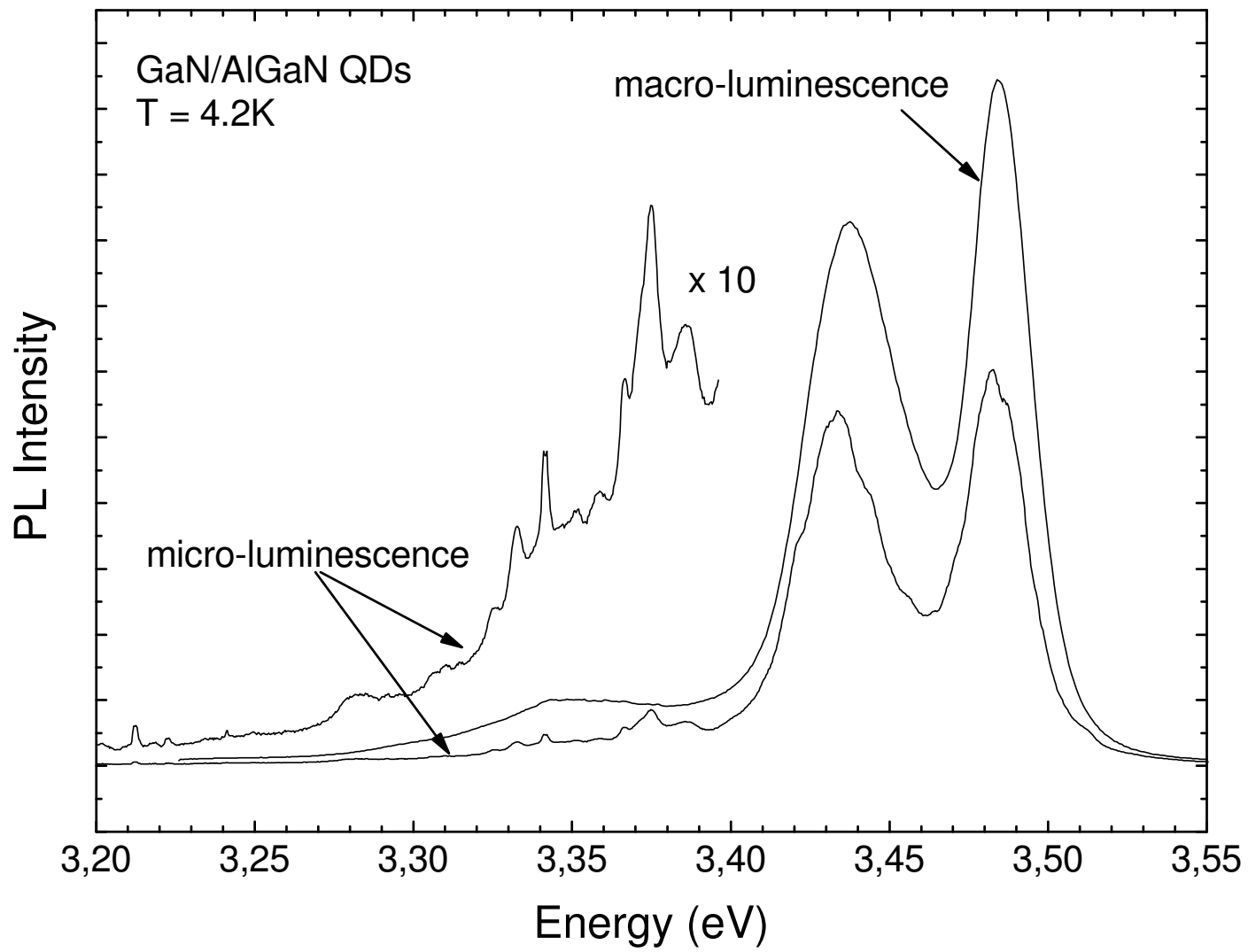
- mesy,
- maski,
- struktury z niską gęstością kropek kwantowych...

Kropki kwantowe GaN/AlGaN

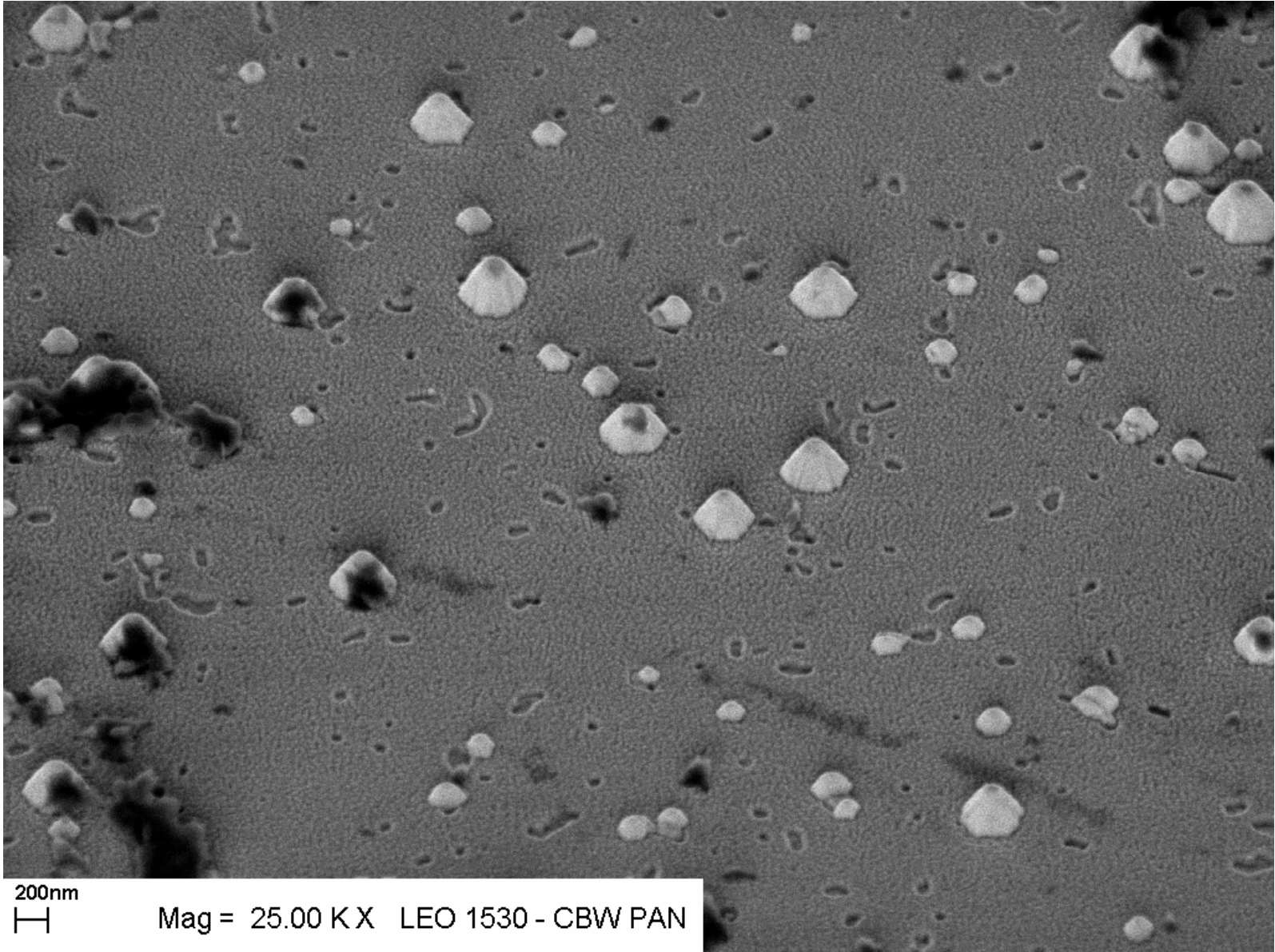


c585.000

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



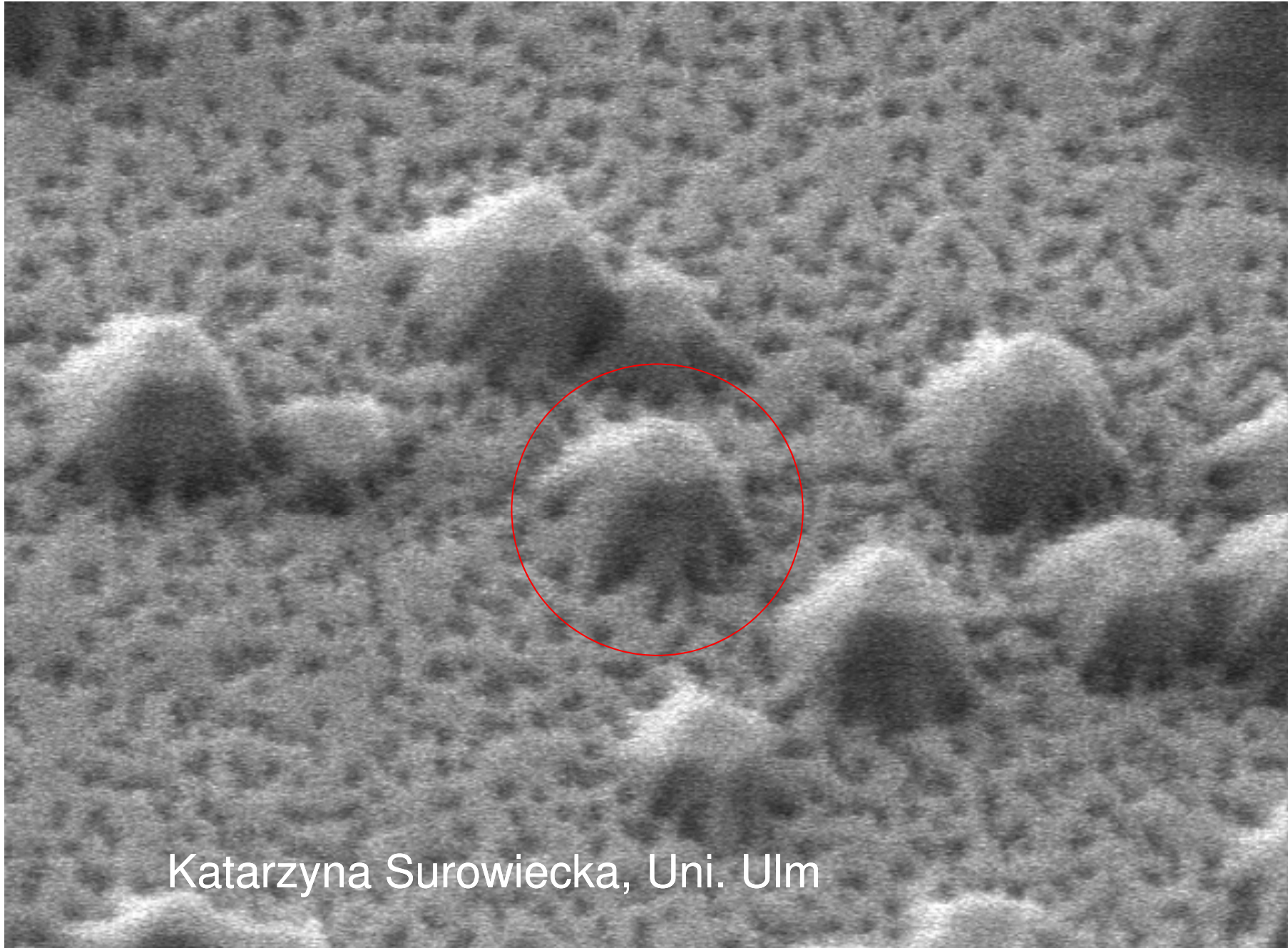
PL, μ PL- Barbara Chwalisz et al.



200nm



Mag = 25.00 K X LEO 1530 - CBW PAN

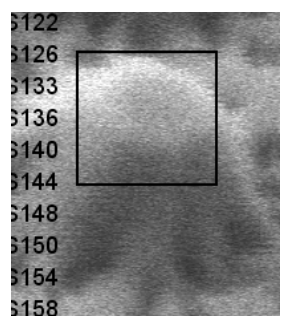


Katarzyna Surowiecka, Uni. Ulm

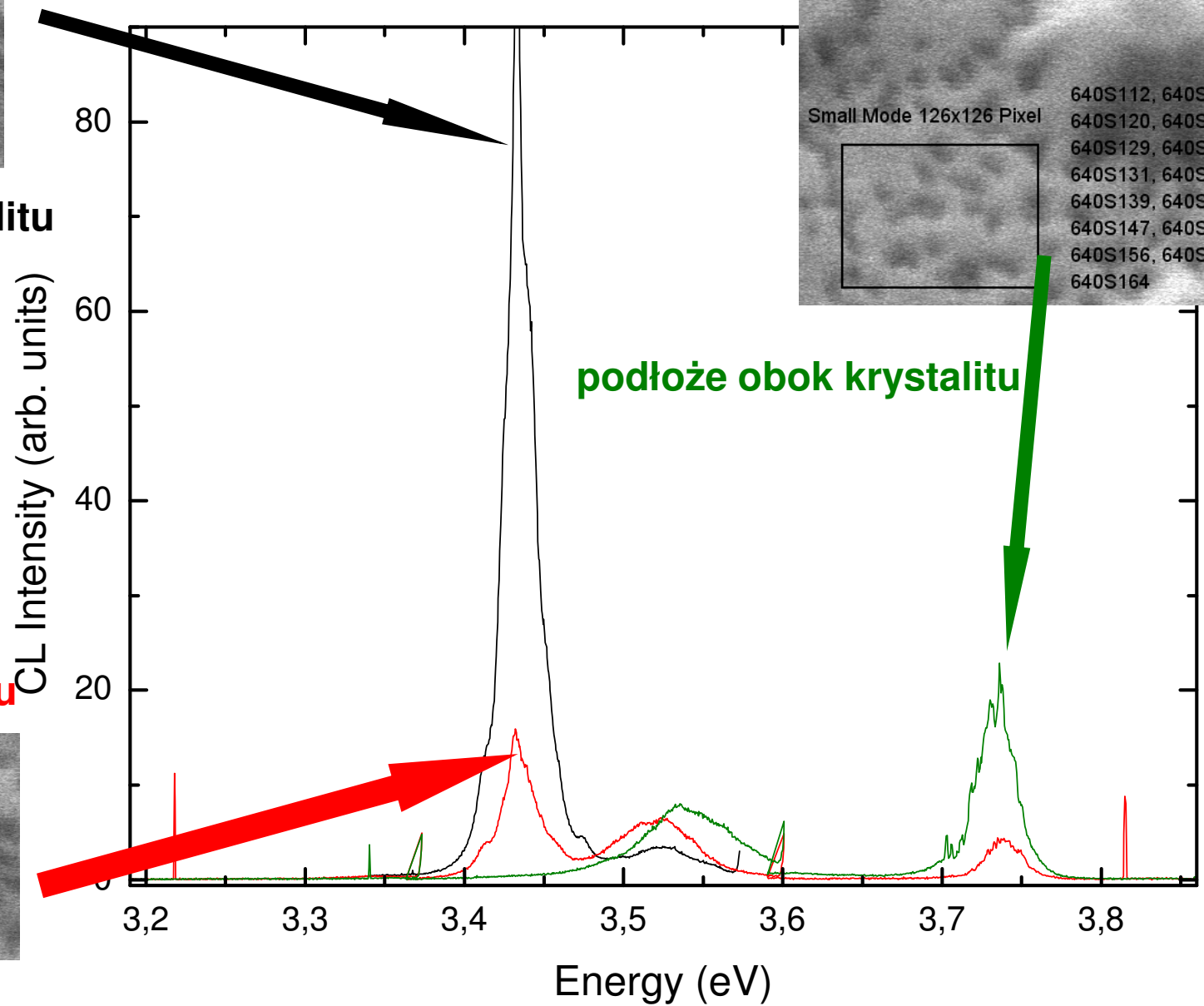
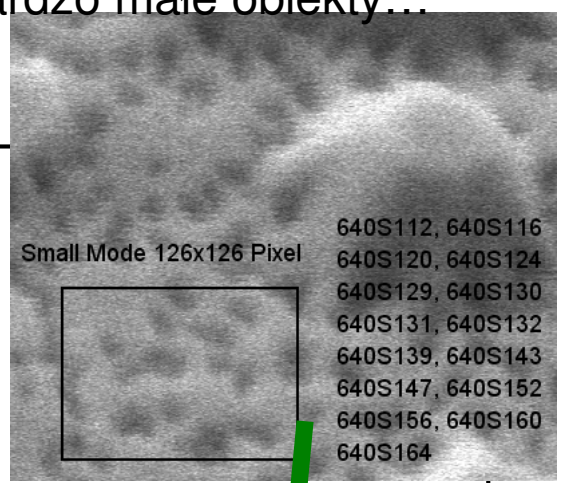
x50000 500nm 3.00kV 4mm
512 x 512 640P018.TIF

Katodoluminescencja – można wybrać bardzo małe obiekty...

... i oglądać widma świecenia

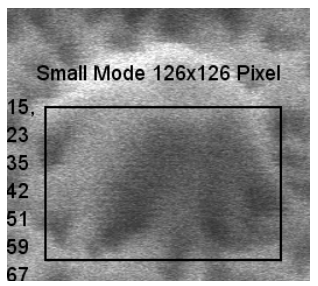


góra krystalitu

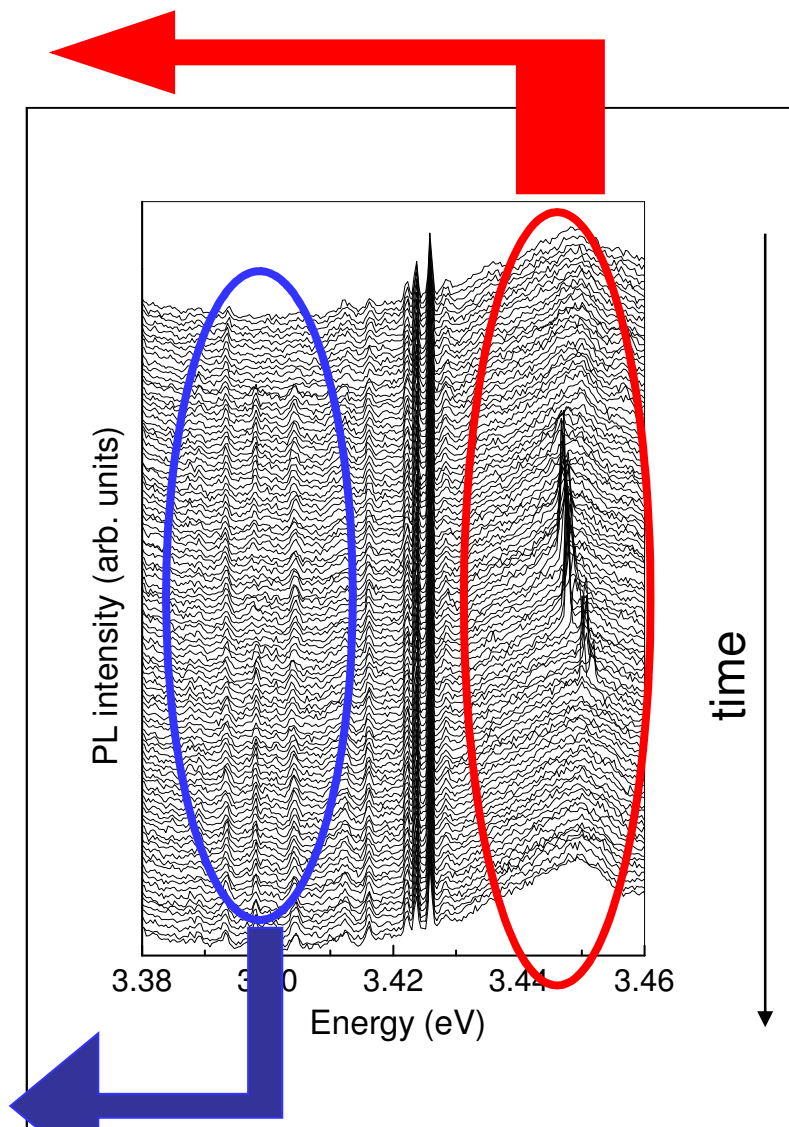
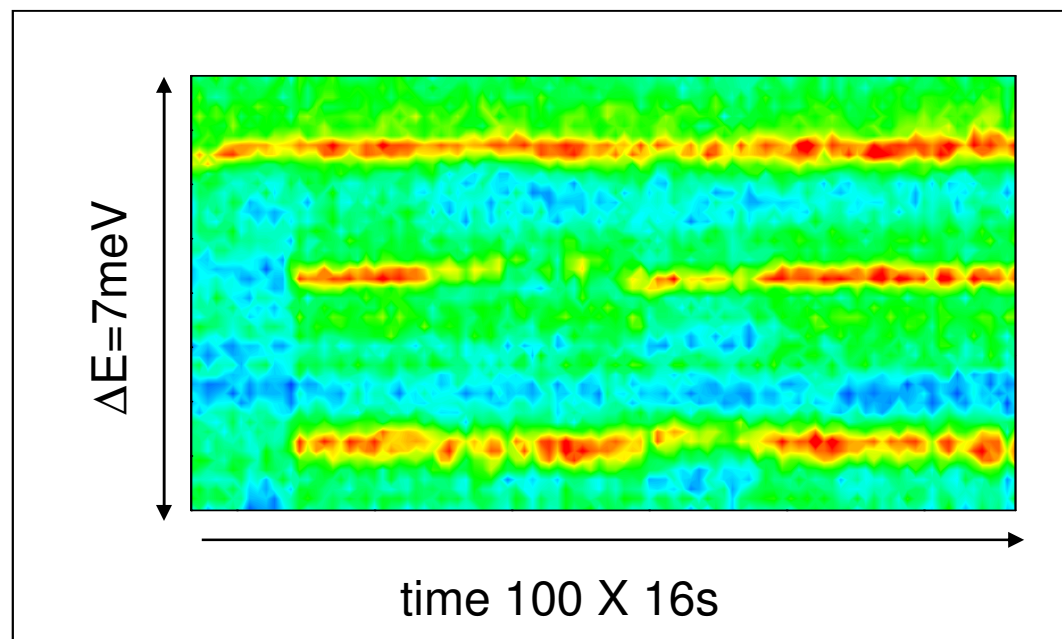
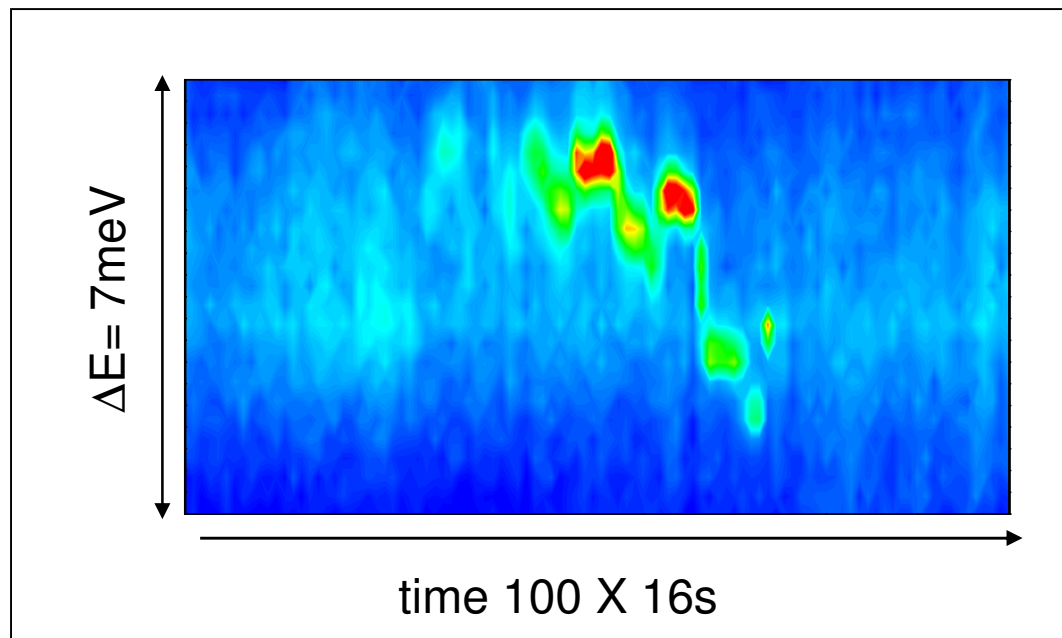


podłoże obok krystalitu

bok krystalitu



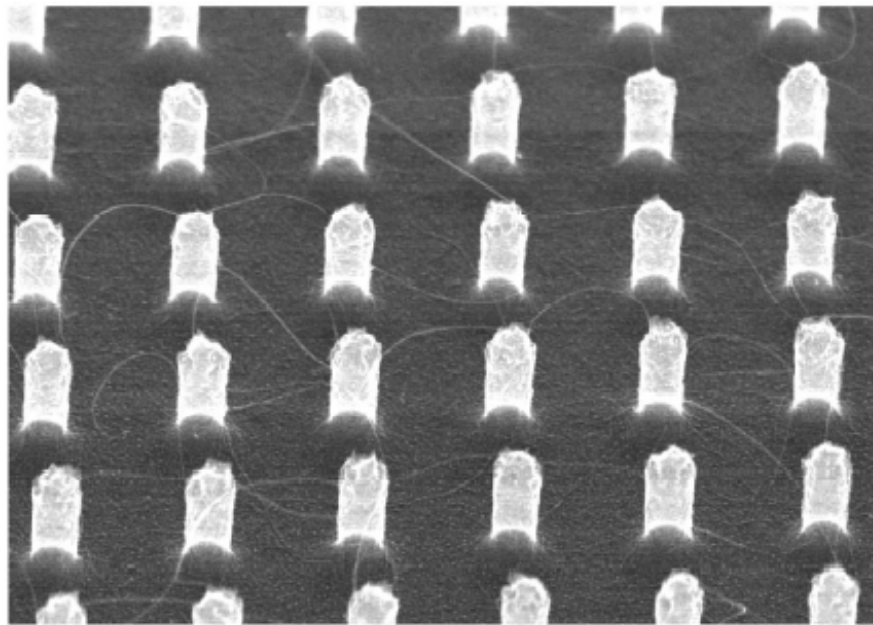
Zmiany intensywności i energii emisji...



K. Surowiecka (2005)

**Lokalne fluktuacje pola
Elektrycznego powoduj \acute fluktuacje
Intensywno \acute ci i energii emisji kropek!**

Nanotechnologia może sprawić, że wiediel zaświeci? **Nanorurki....**



— 1 μm

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.

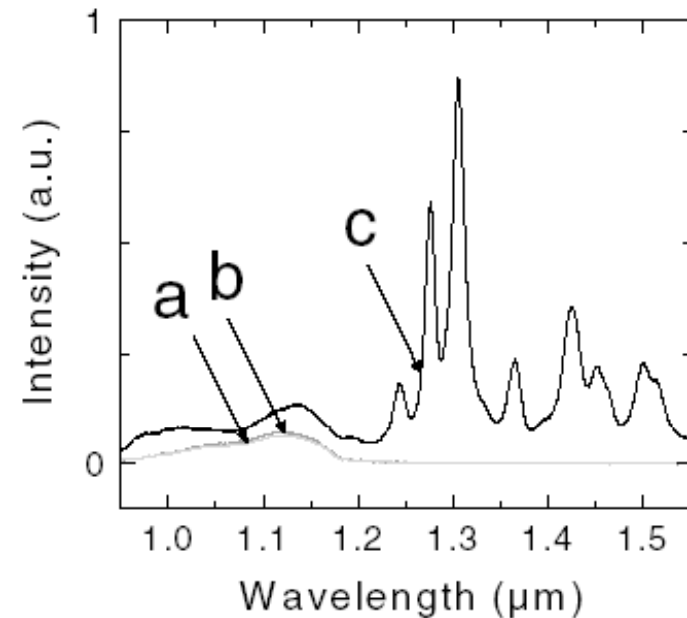


FIG. 2. Photoluminescence spectra: (a) from the pillar areas of an argon-only control sample; (b) on flat areas of a methane CVD sample with abundant nanotubes; (c) on pillar areas of methane CVD samples with bridging nanotubes. Spectra were taken at room temperature in air with the μPL configuration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