

[www.mientay.vn.com](http://www.mientay.vn.com)

**MÔ PHỎNG VÀ PHÂN GIẢI PHA  
PHỔ QUANG - PHỔ NHÃN XÁC A BẮN D N InP  
VÀ CẤU TRÚC AL P D TH  
 $Al_xGa_{1-x}As$  (n)/GaAs (p)**

# NỘI DUNG TRÌNH BÀY

---

## ➤ Quang phản xạ (Photoreflectance PR)

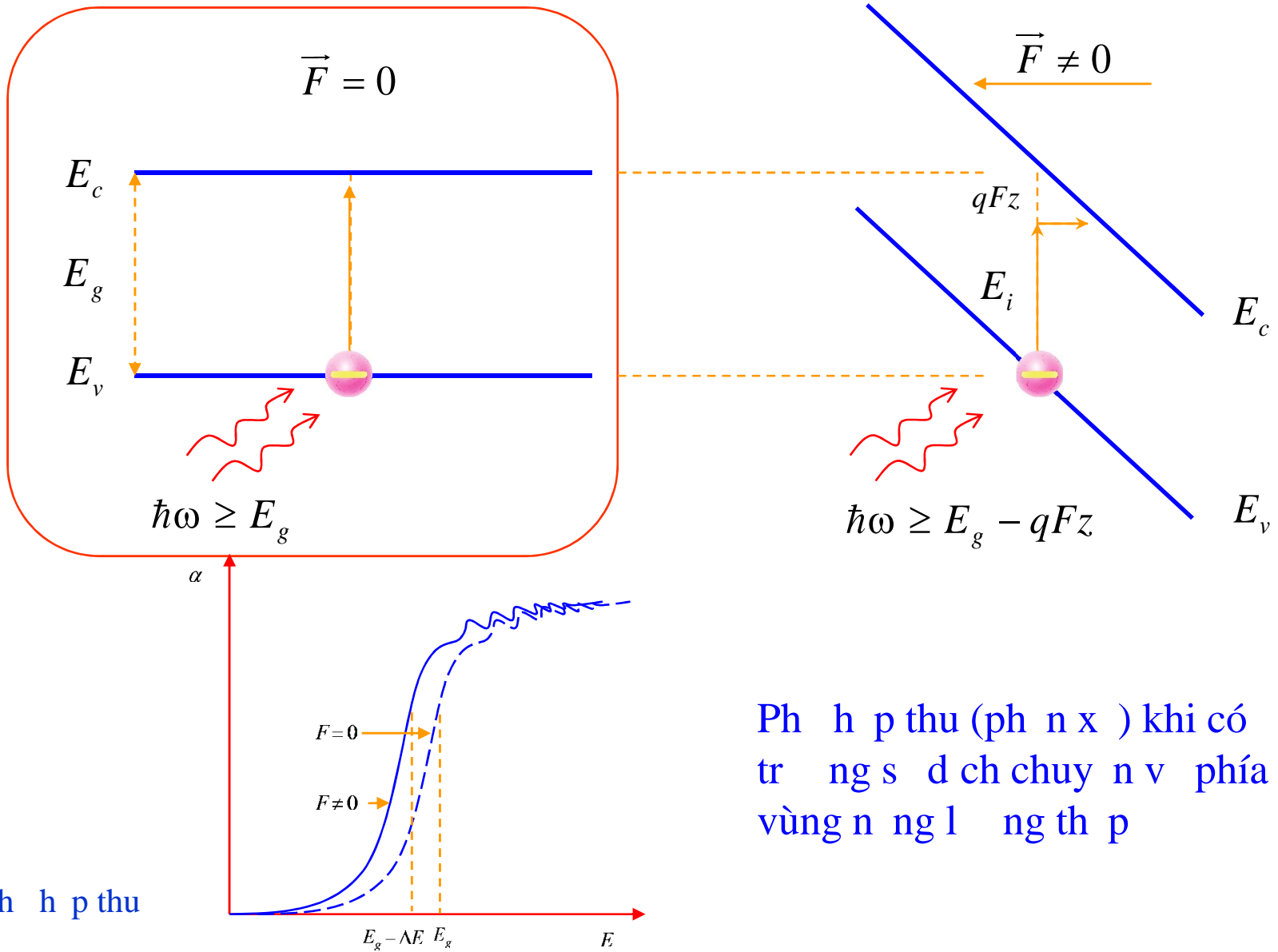
- ❖ Hiệu ứng Franz-Keldysh
- ❖ Sai lệch bremstrahlung-Tamm
- ❖ Phổ biến điệu (Modulation Spectroscopy) và phương pháp quang phản xạ

## ➤ Mô phỏng và phân giải pha phản xạ của InP

- ❖ Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)
- ❖ Thành phần Exciton
- ❖ Phổ PR của thành phần
- ❖ Phân giải pha từ phổ PR
- ❖ Phân giải phổ PR thực nghiệm
- ❖ Phổ PR của cấu trúc Al p-d
- ❖ So sánh với các kết quả thực nghiệm

## ➤ Vấn đề tiếp

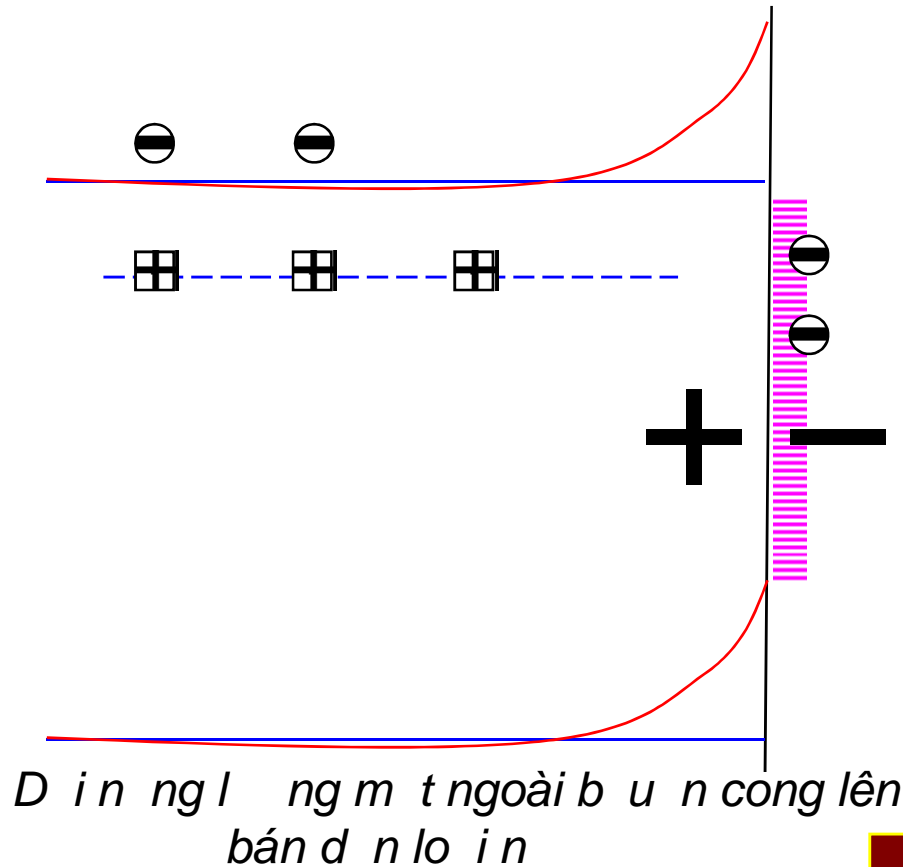
# Hiệu ứng Franz-Keldysh



Ph h p thu (ph n x ) khi có i n tr ng s d ch chuy n v phía vùng n ng l ng th p

Ph h p thu

# Sai lệch b m t – M c Tamm



## T i b m t:

- T í n h t u n ho à n b g i á n o n (m c Tamm)
- H p thu nguyên t l , sai h ã n g m ã n g (m c khác)

L ý t ã n g: không có  
tr ã n g th á i m t ngo ài

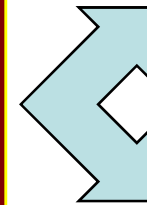
**Bán d ã n  
ph á t p**

B t electron



B t l ã n g

**Tr ã n g th á i b  
m t**  
**i n t r ã n g  
b m t**

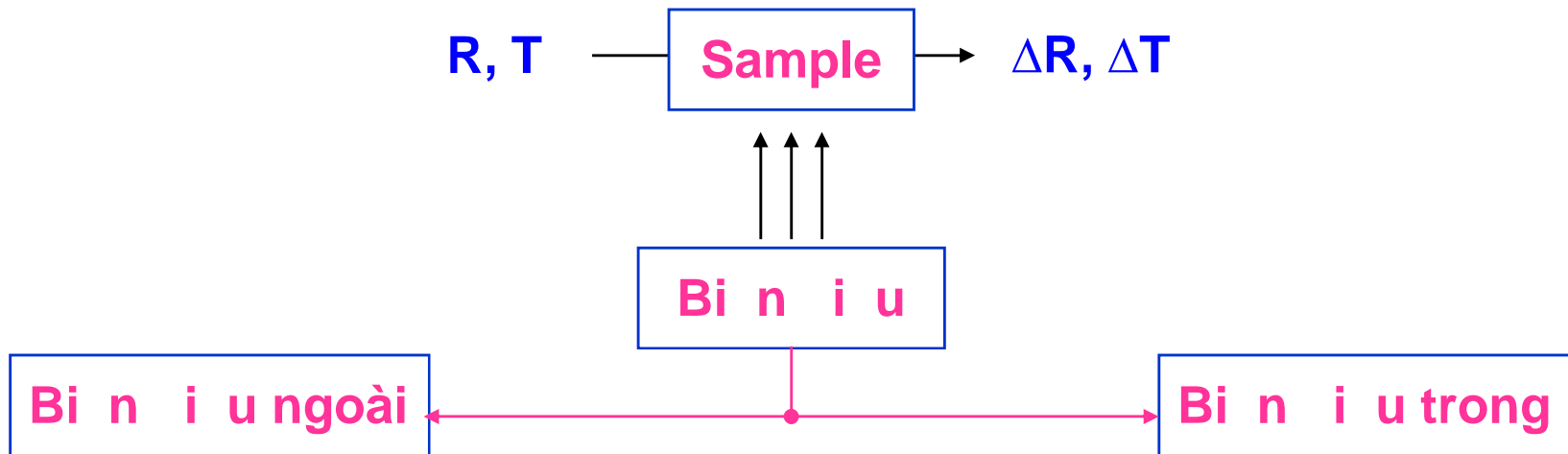


Cong lên  
(n)

Cong xu ã n g  
(p)

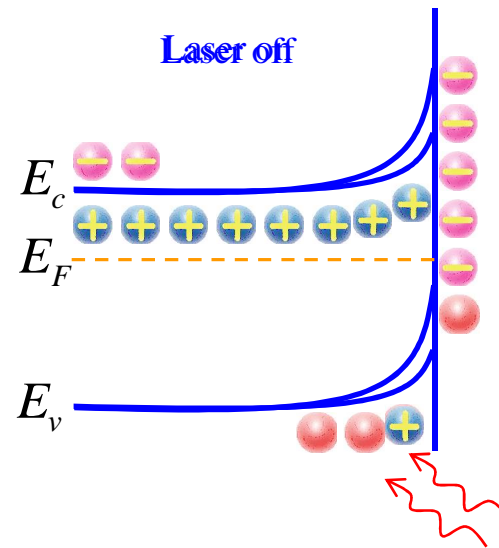
# Ph h c b i n i u (Modulation Spectroscopy)

Nh ng phép o quang v i cùng tính ch t gi ng nhau là:



- i n ph n x (Electroreflectance-ER)
- Quang ph n x (Photoreflectance-PL)
- T ph n x (Magnetoreflectance\_MR)
- Pizo ph n x (Piezoreflectance)
- Nhi t ph n x (Thermoreflectance)
- Bi n i u dài b c sóng tia t i
- Bi n i u s phân c c ánh sáng t i
- Thay i v trí trên m u
- .....

# Phản ứng pháp quang photon x



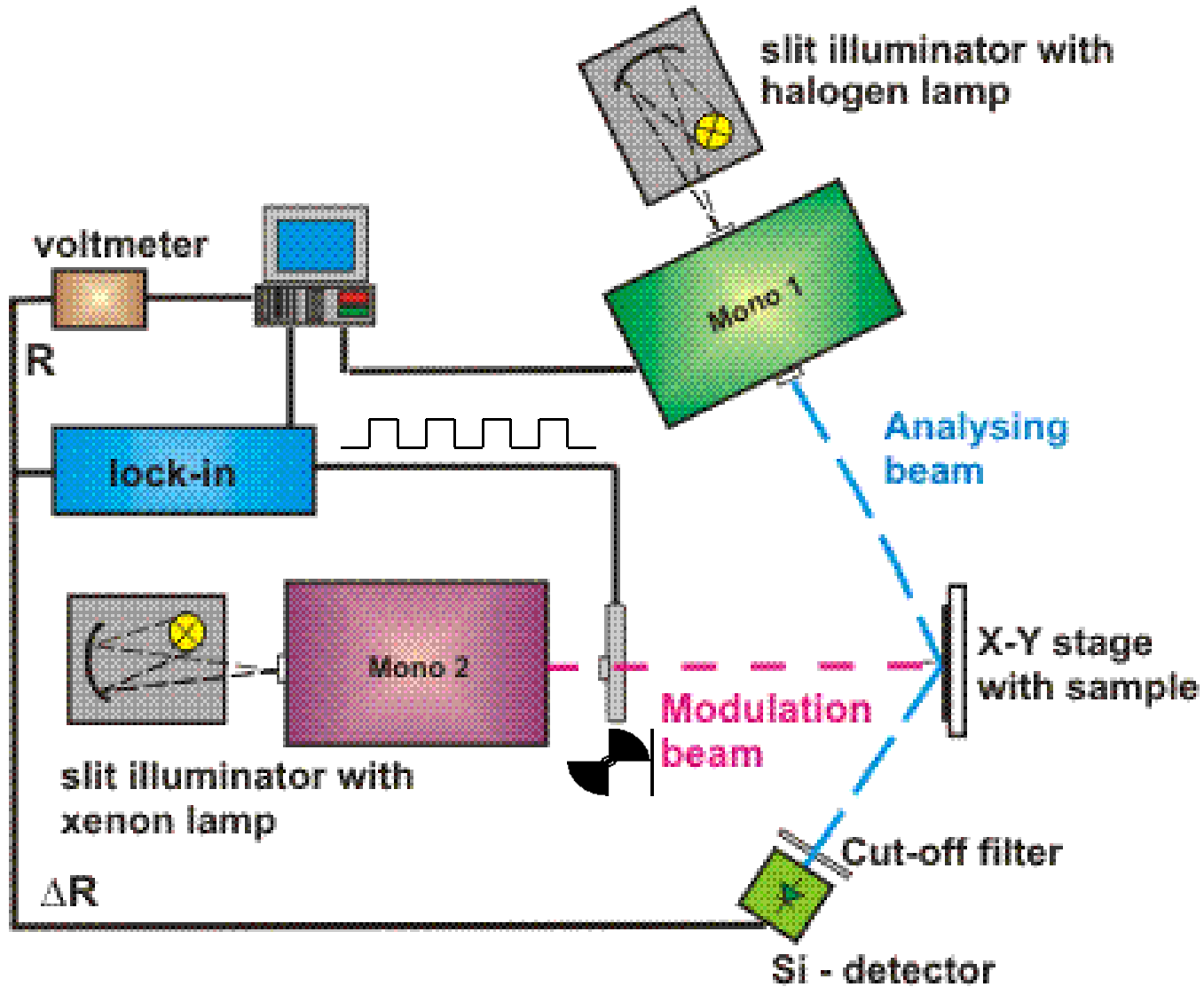
Hệ số Franz-Keldysh

$$\frac{R}{R_{\text{off}}} = \frac{R_{\text{on}} - R_{\text{off}}}{R_{\text{off}}}$$

Seraphin và Bottka

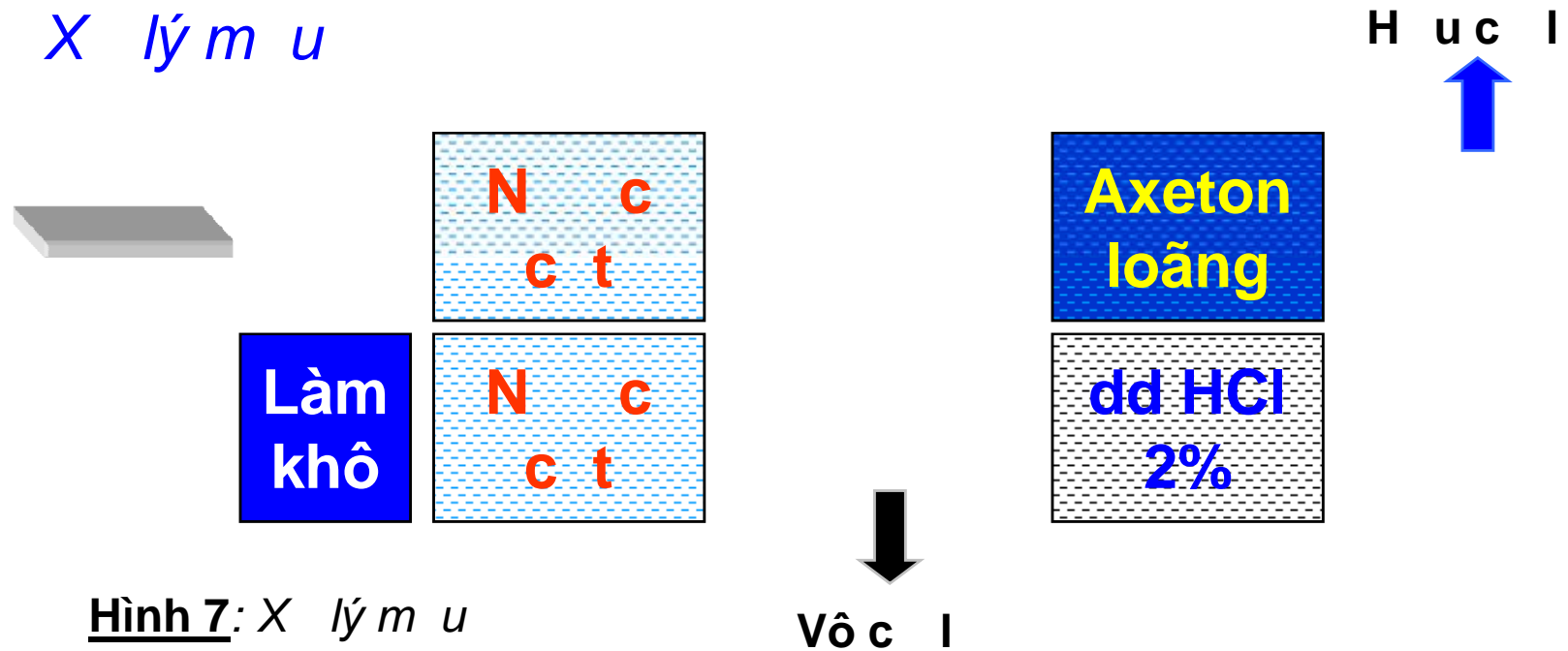
$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_s \Delta \epsilon_1 + \beta_s \Delta \epsilon_2$$

# H o quang ph n x





# H o quang ph n x



# Mô phỏng quang photon

---

# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)

Seraphin và Bottka

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_s \Delta \varepsilon_1 + \beta_s \Delta \varepsilon_2$$

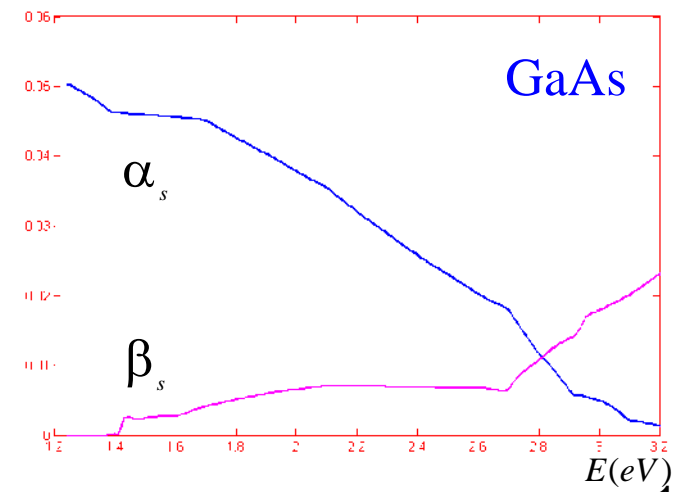
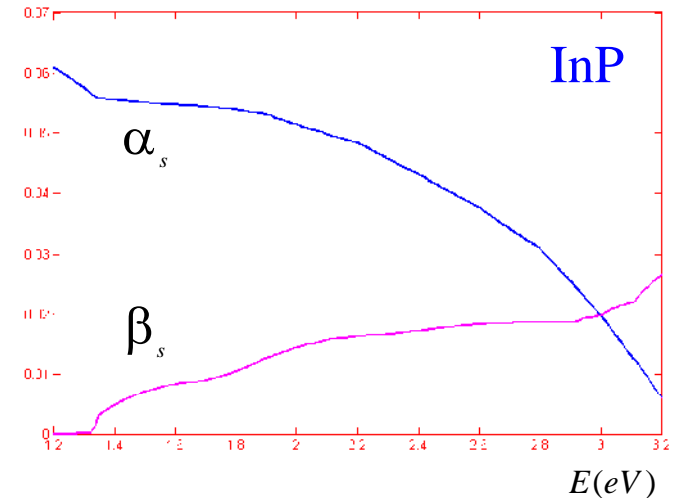
$\alpha_s, \beta_s$  là các hệ số Seraphin.

$$\alpha_s = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_1} \quad \beta_s = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon_2}$$

$$\alpha_s = \frac{2n(n^2 - 3k^2 - 1)}{c}$$

$$\beta_s = \frac{2k(3n^2 - k^2 - 1)}{c}$$

$$c = (n^2 + k^2) \left[ (n^2 + k^2)^2 + 2k^2 - 2n^2 + 1 \right]$$



## Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)

---

$\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2$  Là số biến thiên của hằng số  
 i n môi trường  $\varepsilon_1 + i\varepsilon_2$

$$\Delta\varepsilon_1(E) = \frac{\text{const}(\hbar\Theta)^{1/2}}{E^2} G(x)$$

$$\Delta\varepsilon_2(E) = \frac{\text{const}(\hbar\Theta)^{1/2}}{E^2} F(x)$$

$$F(x) = \pi \left[ \left( Ai'(x) - xAi(x) \right) \right] - (-x)^{1/2} U(-x)$$

$$G(x) = \pi \left[ Ai'(x)Bi(x) - xAi(x)Bi'(x) \right] + x^{1/2} U(x)$$

$$F'(x, \Gamma') + iG'(x, \Gamma') = 2\pi \left[ e^{-i\pi/3} Ai'(z_0)Ai'(\omega_0) + \omega_0 Ai(z_0)Ai(\omega_0) \right] -$$

$$-\left[ \frac{-x + (x^2 + \Gamma'^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2} + i \left[ \frac{x + (x^2 + \Gamma'^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2}$$

$$z_0 = x + i\Gamma'$$

$$\omega_0 = z_0 \exp(-i2\pi/3) \quad \Gamma' = \frac{\Gamma}{\hbar\Theta}$$

$$\text{const} = \frac{2^{3/2} e\mu^{1/2} E_g}{\hbar} (eV^{3/2})$$

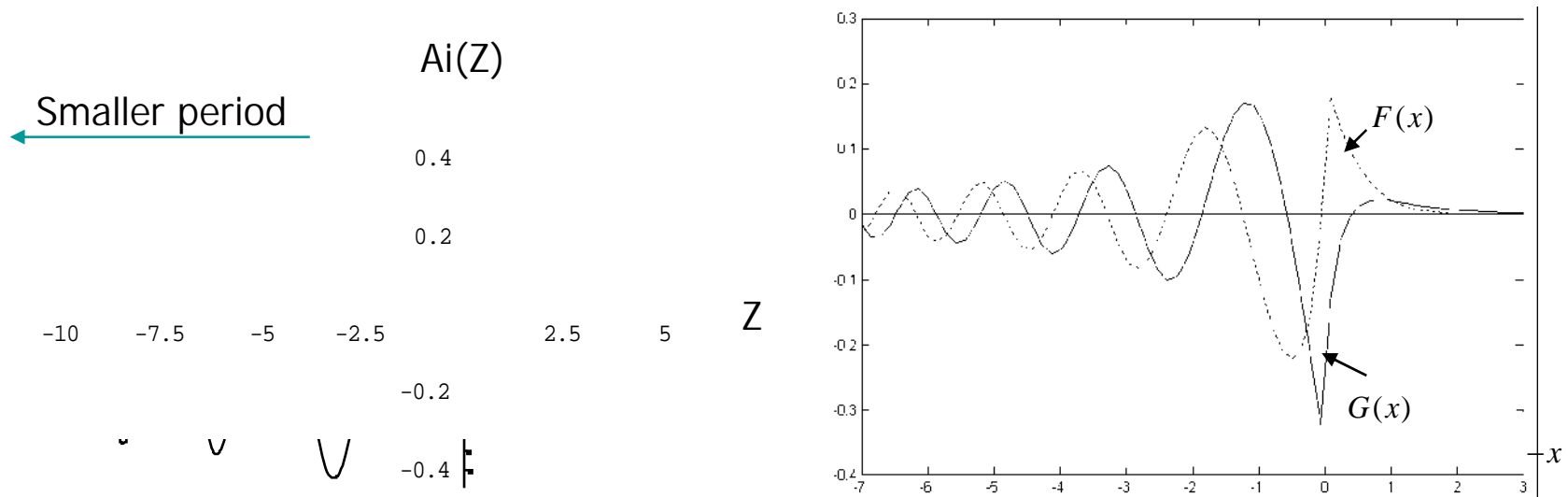
$$x = \frac{Eg - E}{\hbar\Theta}$$

$$\hbar\Theta = 2^{2/3} \hbar\Omega$$

$$\hbar\Omega = \left( \frac{q^2 \hbar^2 F^2}{8\mu} \right)^{1/3}$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)



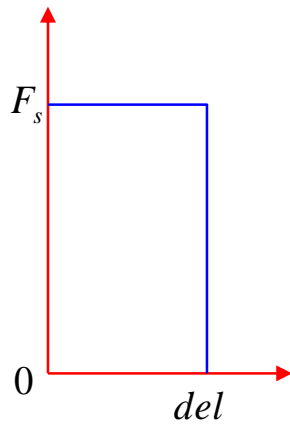
Công thức thực nghiệm của Aspnes và Studna

$$\frac{\Delta R}{R}(E) \approx \frac{1}{E^2 (E - E_g)} \exp \left[ -\frac{\Gamma \sqrt{E - E_g}}{(\hbar\Omega)^{3/2}} \right] \cos \left[ \frac{4}{3} \left( \frac{E - E_g}{\hbar\Omega} \right)^{3/2} \right]$$

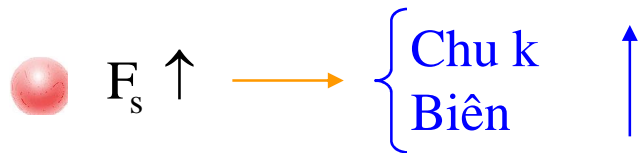
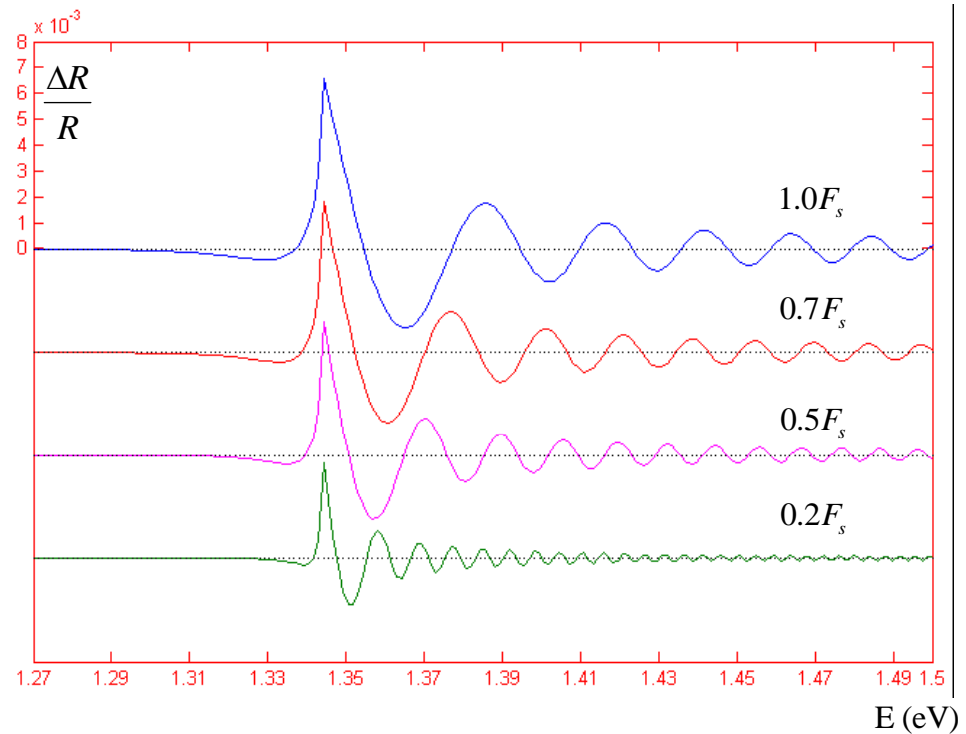
# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)

nh hình ảnh cấu trúc vùng năng lượng

Mô hình lý tưởng



điều kiện biên tại đáy giếng  
bị biến thiên theo sâu



Phản ứng của InP với điều kiện biên khác nhau

$$E_g = 1.344 \text{ eV}, F_s = 4 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}, \Gamma = 0 \text{ meV}$$

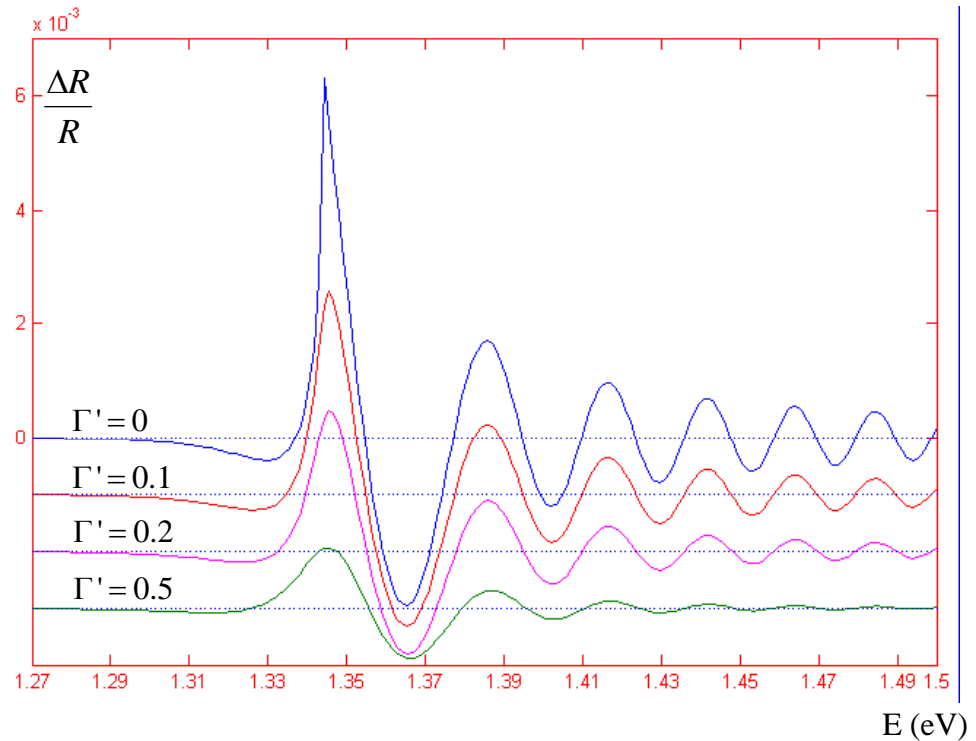
$$\frac{\Delta R}{R}(E) \approx \frac{1}{E^2(E - E_g)} \exp\left[-\frac{\Gamma\sqrt{E - E_g}}{(\hbar\Omega)^{3/2}}\right] \cos\left[\frac{4}{3}\left(\frac{E - E_g}{\hbar\Omega}\right)^{3/2}\right]$$

$\hbar\Omega = \left(\frac{q^2 \hbar^2 F^2}{8\mu}\right)^{1/3}$

# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)

nh hình ảnh các giản đồ  $\Gamma$

$\Gamma \uparrow \Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Biên} \downarrow \\ \text{Chu kỳ : không đổi} \end{array} \right.$



Ph PR của InP với thông số giản đồ khác nhau

$$E_g = 1.344 \text{ eV}, F_s = 4 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$$

$$\frac{\Delta R}{R}(E) \approx \frac{1}{E^2(E - E_g)} \exp\left[-\frac{\Gamma \sqrt{E - E_g}}{(\hbar\Omega)^{3/2}}\right] \cos\left[\frac{4}{3}\left(\frac{E - E_g}{\hbar\Omega}\right)^{3/2}\right]$$

# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)

Tính Fs và công vùng năng lượng

$$\frac{\Delta R}{R}(E) \approx \frac{1}{E^2(E - E_g)} \exp\left[-\frac{\Gamma\sqrt{E - E_g}}{(\hbar\Omega)^{3/2}}\right] \cos\left[\frac{4}{3}\left(\frac{E - E_g}{\hbar\Omega}\right)^{3/2}\right]$$

Có cấu trúc

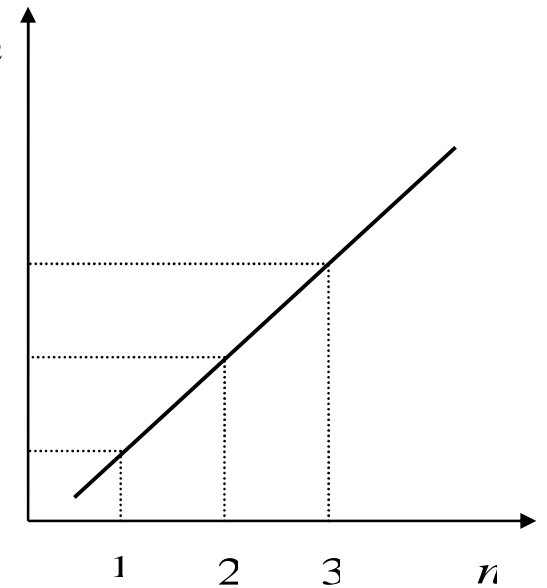
$$n\pi = \frac{4}{3}\left[\frac{E_n - E_g}{\hbar\Omega}\right]^{3/2} + \theta$$

$$\frac{4}{3\pi}(E_n - E_g)^{3/2} = (\hbar\Omega)^{3/2}n - (\hbar\Omega)^{3/2}\theta$$

Hệ số góc

$$\hbar\Omega = \left(\frac{e^2\hbar^2}{2\mu}F_s^2\right)^{1/3} \quad e\varphi_b = \frac{\epsilon\epsilon_0 F_s^2}{2n} = \frac{Q_{ss}^2}{2\epsilon\epsilon_0 n}$$

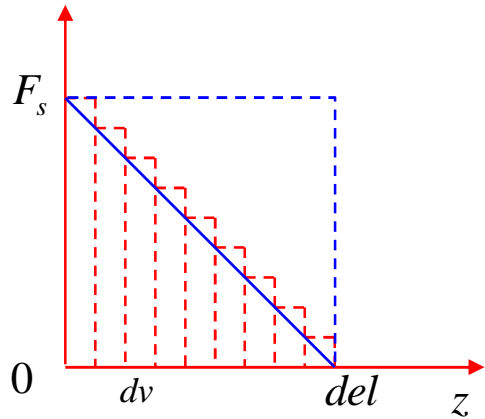
$$\frac{4}{3\pi}(E_n - E_g)^{3/2}$$





# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)

Mô hình a l p



Mô hình a l p

$$d_v = d_{el} / j$$

$$\frac{d_{el} - d_v}{F_v} = \frac{d_{el}}{F_s}$$

$$\bar{N}_v = \bar{N}(F=0, E) + \Delta \bar{N}_v(F_v, E)$$

$$\Delta \bar{N}_v = \frac{n \Delta \epsilon_{1v} + k \Delta \epsilon_{2v} - i(n \Delta \epsilon_{2v} - k \Delta \epsilon_{1v})}{2(n^2 + k^2)}$$

$$\phi_v = 2\pi \left( \frac{d_v}{\lambda} \right) (\bar{N} + \Delta \bar{N}_v) = 2\pi \left( \frac{d_v}{\lambda} \right) \bar{N}_v$$

$$\bar{r}_j = \frac{\Delta \bar{N}_j}{2\bar{N} + \Delta \bar{N}_j}$$

$$\bar{f}_0 = \frac{\bar{N}_L - (\bar{N} + \bar{r}_1)}{\bar{N}_L + (\bar{N} + \bar{r}_1)} = \frac{\bar{N}_L - \bar{N}_{v1}}{\bar{N}_L + \bar{N}_{v1}}$$

$$\bar{N}_L = 1$$

$$\bar{r}_{v-1} = \frac{\bar{f}_{v-1} + \bar{r}_v \exp(-2i\phi_v)}{1 + \bar{f}_{v-1} \bar{r}_v \exp(-2i\phi_v)}$$

$$\bar{f}_{v-1} = \frac{\Delta \bar{N}_{v-1} - \Delta \bar{N}_v}{2\bar{N} + \bar{N}_{v-1} + \bar{N}_v}$$

$$R_0 = \left[ \frac{\bar{N} - \bar{N}_L}{\bar{N} + \bar{N}_L} \right]^2$$

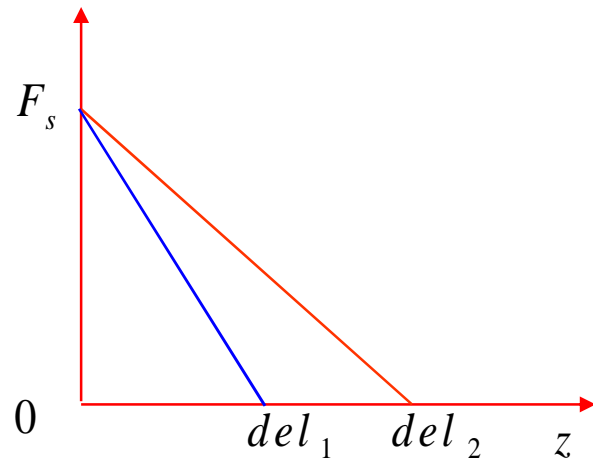
$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \frac{|\bar{r}_0|^2 - \text{Re}(R_0)}{\text{Re}(R_0)}$$



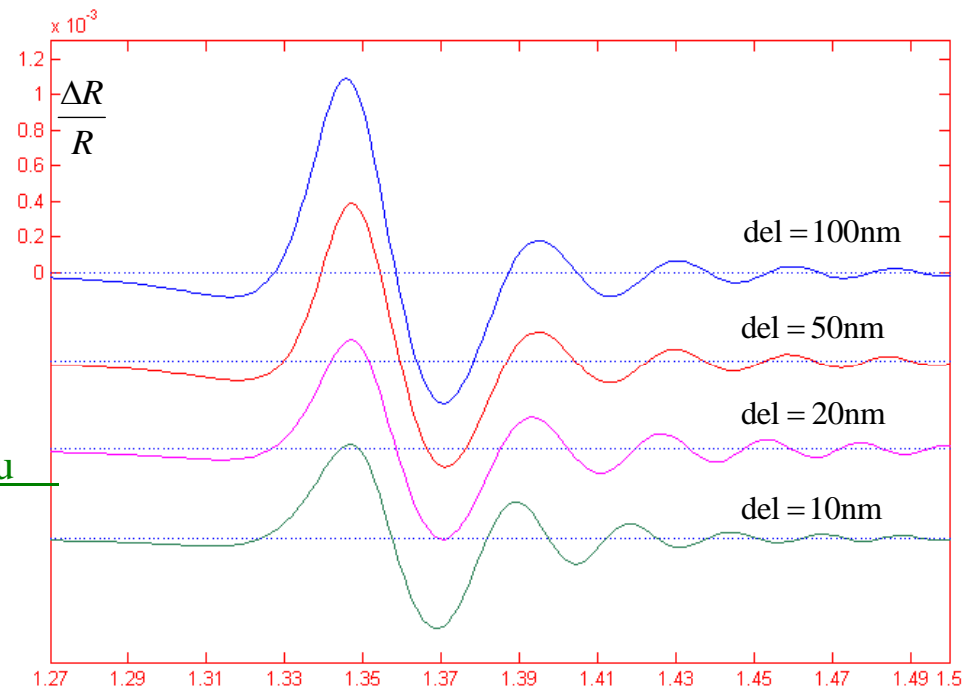
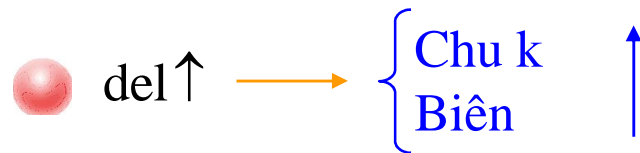
Mô ph ng ph PR



# Thành phần dao động Franz-Keldysh (FKO)



điện trường biến thiên với tần số khác nhau



Phản xạ của InP khi điện trường thay đổi  
điện trường biến thiên

$$E_g = 1.344\text{eV}, F_s = 4 \times 10^6 \text{Vm}^{-1}, \Gamma = 11.35\text{meV}, dv = 2\text{nm}$$

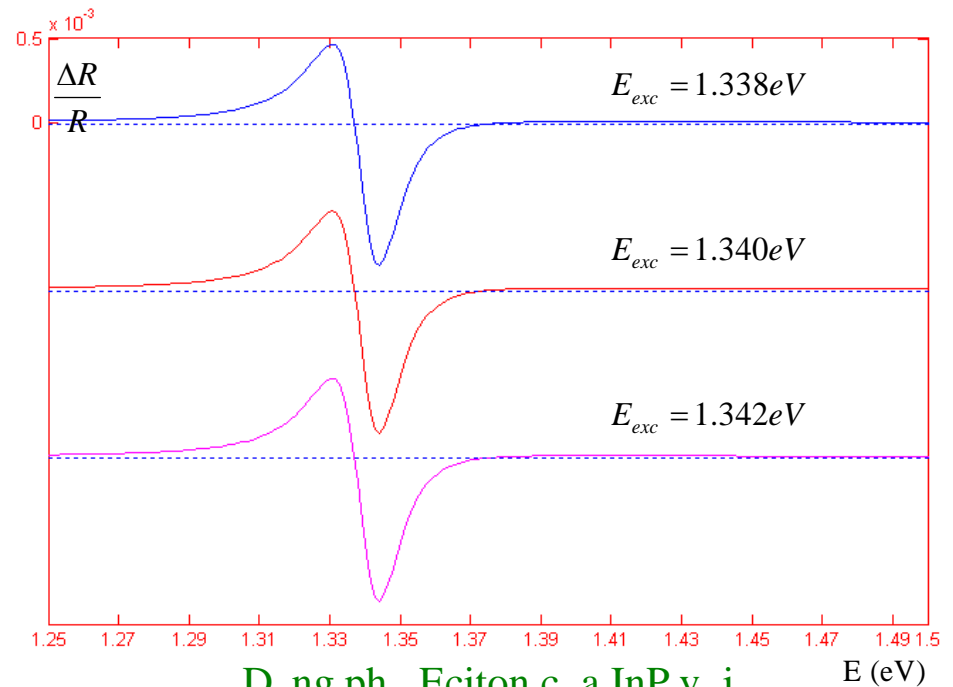
## Thành phần dao động Exiton

$$\left(\frac{\Delta R}{R}(E)\right) = C \cdot \Gamma^{-n} \left[ \frac{(E - E_{exc})^2}{\Gamma^2} + 1 \right]^{-n/2} \cdot \cos\left(-n \cdot \arccot \cot \left[ \frac{E - E_{exc}}{\Gamma} \right] + \varphi\right)$$

Phổ Exiton và hình ảnh Exiton thay đổi:

$E_{exc} \uparrow$

Phân bố chuyển vị  
phía năng lượng cao



Đường phổ Exiton của InP với  
năng lượng Exiton thay đổi  
 $\Gamma = 11 \text{ meV}, \theta = 120^\circ$

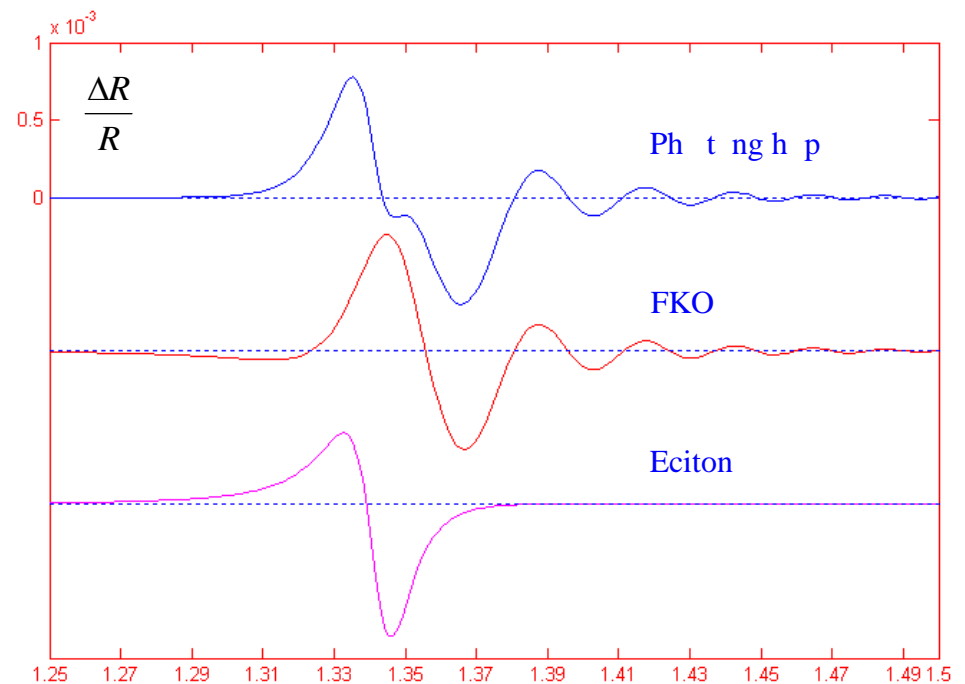
# Ph PR a thành ph n

Ph PR là ph t ng h p c a các thành ph n ph riêng l

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_{j=1}^n \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_j$$



$$\frac{\Delta R}{R} = \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{FKO} + \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{EXC}$$



Ph PR a thành ph n

E (eV)

# Phân giải pha phức PR thành phần

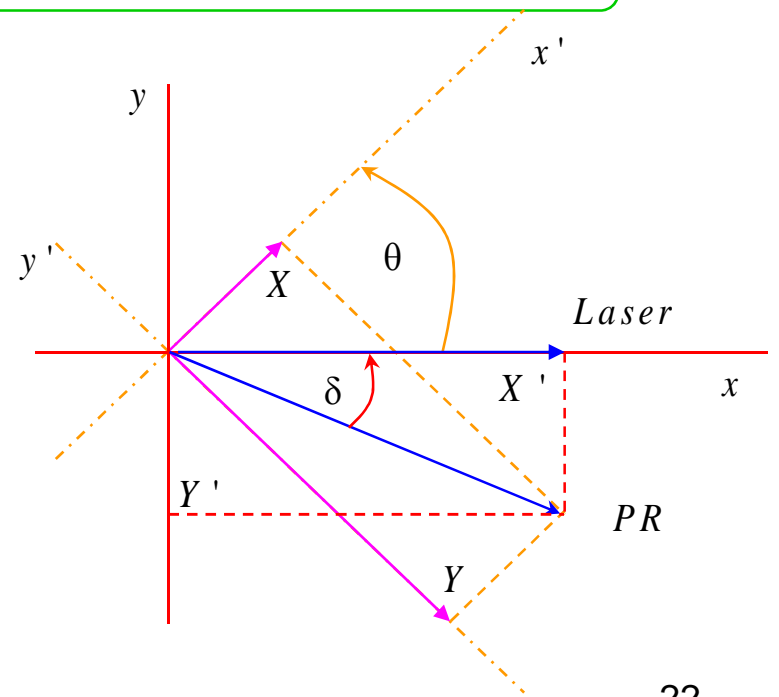
Thí nghiệm  $\longrightarrow$  Có sự pha trộn trong pha PR giữa tín hiệu PR và tín hiệu laser

$$\frac{\overline{\Delta R}}{R}(E, F_s, \tau, \omega) = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta R_j}{R}(E, F_s) \frac{2}{\pi(1 + \omega^2 \tau_j^2)} (1 - i\omega\tau_j) \quad (2.4.1)$$

$\tan(\theta + \delta_j) = -\omega\tau_j \longrightarrow$  Góc trộn pha của thành phần

$$\begin{cases} X(E) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\Delta R}{R}(E)_j \cos(\delta_j + \theta) \right] \\ Y(E) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\Delta R}{R}(E)_j \sin(\delta_j + \theta) \right] \end{cases} \quad (2.4.2)$$

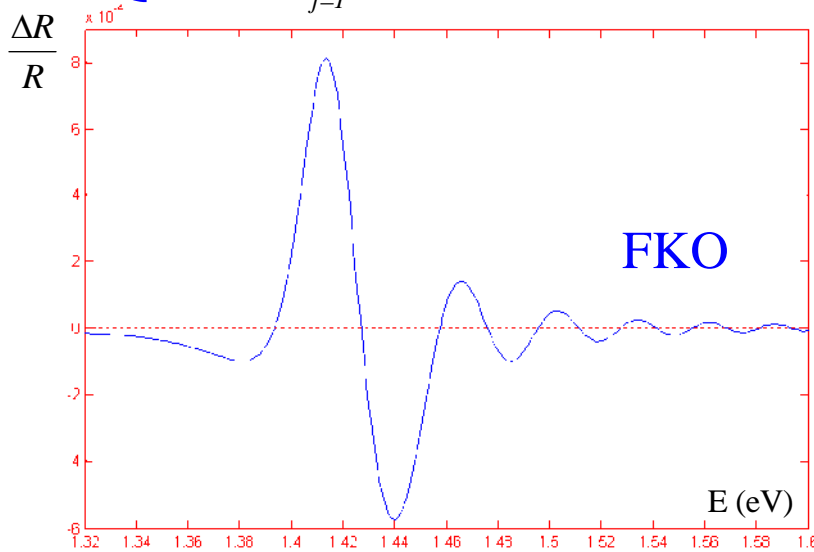
Ph PR thu được trên hai kênh của lock-in



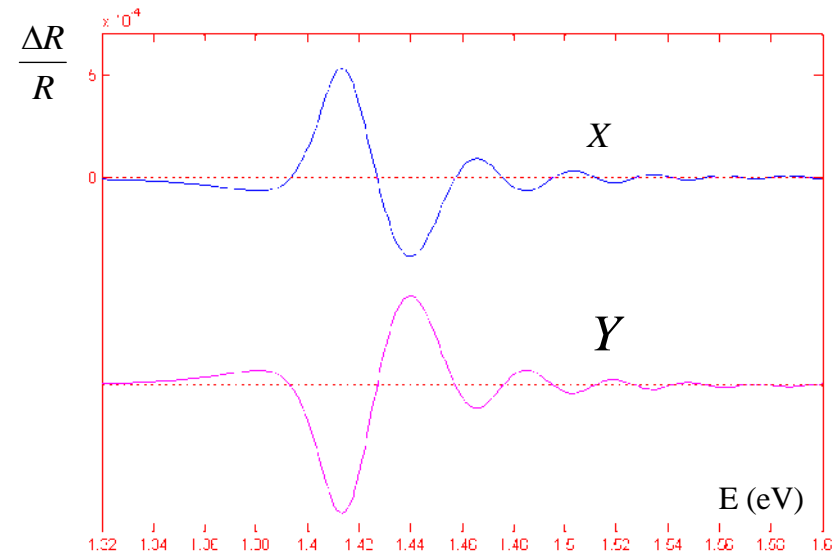
# Phân giải pha phổ PR đa thành phần

## Phổ PR 1 thành phần

$$\begin{cases} X(E) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\Delta R}{R}(E)_j \cos(\delta_j + \theta) \right] \\ Y(E) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\Delta R}{R}(E)_j \sin(\delta_j + \theta) \right] \end{cases} \quad j = 1 \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} X(E) = \frac{\Delta R}{R}(E) \cos(\delta + \theta) \\ Y(E) = \frac{\Delta R}{R}(E) \sin(\delta + \theta) \end{cases}$$



Phổ PR của GaAs một thành phần



Hai kênh X, Y thu được từ lock-in

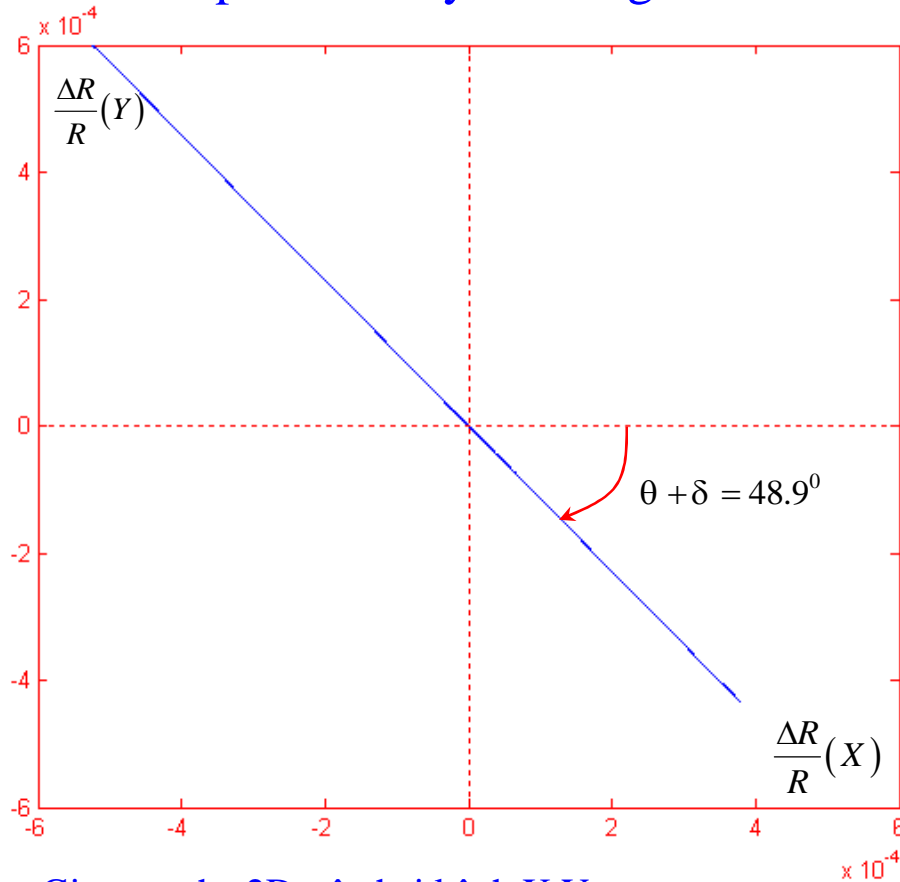
$$E_g = 1.412 \text{ eV}, F_s = 3.44 \times 10^6 \text{ V/m}, \Gamma = 12 \text{ meV}, d_{el} = 100 \text{ nm}, j = 100, \theta = -45^\circ, \delta = -3.9^\circ$$

Phân giải pha



# Phân giải pha ph PR a thành ph n

Gi n pha 2D truy n th ng



Gi n pha 2D trên hai kênh X,Y

Gi n pha 2D ph PR m t thành ph n có d ng tuy n tính

Xây d ng gi n pha 3D





# Phân giải pha ph PR a thành ph n

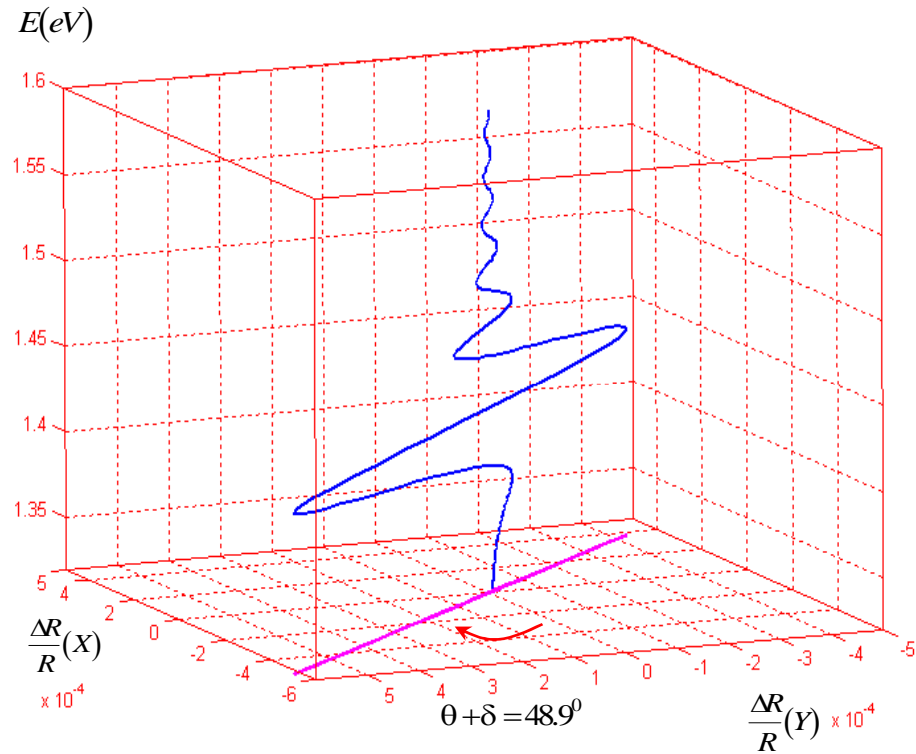
Gi n pha 3D

$$X(E) = \frac{\Delta R}{R}(E) \cos(\delta + \theta)$$

$$Y(E) = \frac{\Delta R}{R}(E) \sin(\delta + \theta)$$

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \sqrt{X^2(E) + Y^2(E)} \quad (2.4.1)$$

Ph PR trên gi n pha  
n m trên m t m t ph ng



gi n pha 3D hai kênh X, Y, và tr c E

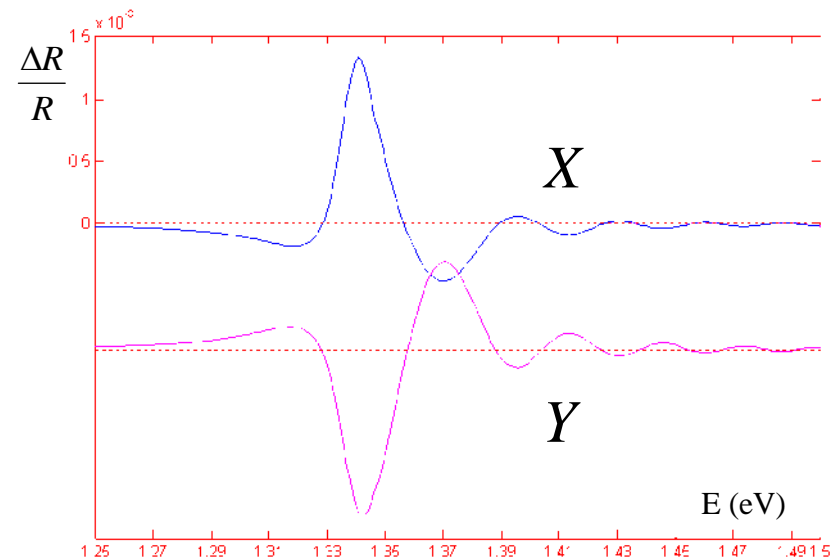
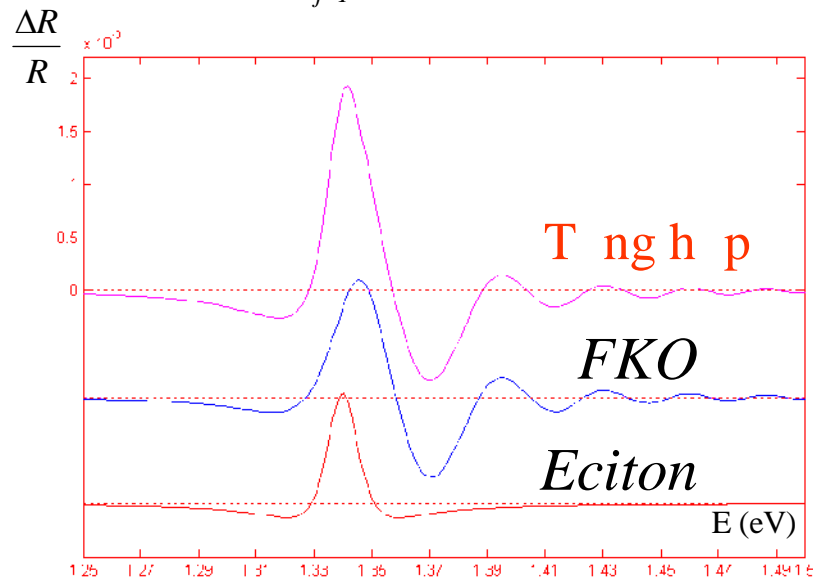
→ C s phân giải pha ph PR a thành ph n

# Phân giải pha ph PR a thành ph n

## Ph PR 2 thành ph n

$$\begin{cases} X(E) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\Delta R}{R}(E)_j \cos(\delta_j + \theta) \right] \\ Y(E) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\Delta R}{R}(E)_j \sin(\delta_j + \theta) \right] \end{cases}$$

$$j = 2 \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} X_{1,2}(E) = \frac{\Delta R}{R}(E)_{1,2} \cos(\delta + \theta) \\ Y_{1,2}(E) = \frac{\Delta R}{R}(E)_{1,2} \sin(\delta + \theta) \end{cases}$$



## Ph PR 2 thành ph n c a InP

## Ph PR trên 2 kênh X, Y

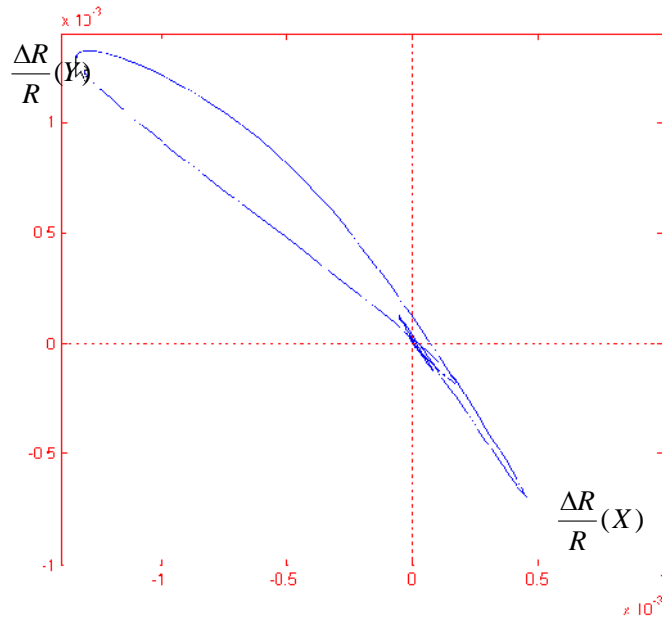
FKO:  $E_g = 1.344\text{eV}$ ,  $F_s = 4 \times 10^6$ ,  $\Gamma = 11.35\text{meV}$ ,  $d_{el} 100\text{nm}$ ,  $sl = 100$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\delta = -60^\circ$

Eciton:  $E_{exc} = 1.34\text{eV}$ ,  $\Gamma = 11\text{meV}$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\delta = -30^\circ$



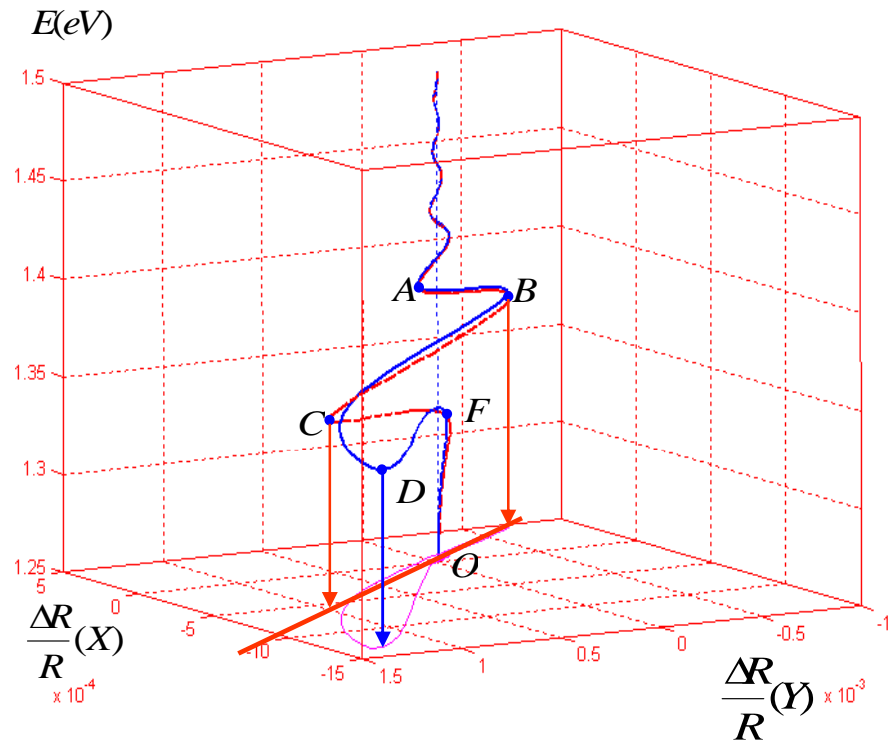
# Phân tích pha phổ PR của thành phần

Giới thiệu pha 2D truyền thống



H25 Giới thiệu pha 2D hai kênh X, Y

Giới thiệu pha 2D có đường cong

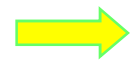


Giới thiệu pha 3D: hai kênh X, Y và E

# Phân giải pha ph PR a thành ph n

Ph ng pháp xác nh các thành ph n trong ph PR

⊕ Xác inh m t ph ng dao ng chính (ABC)



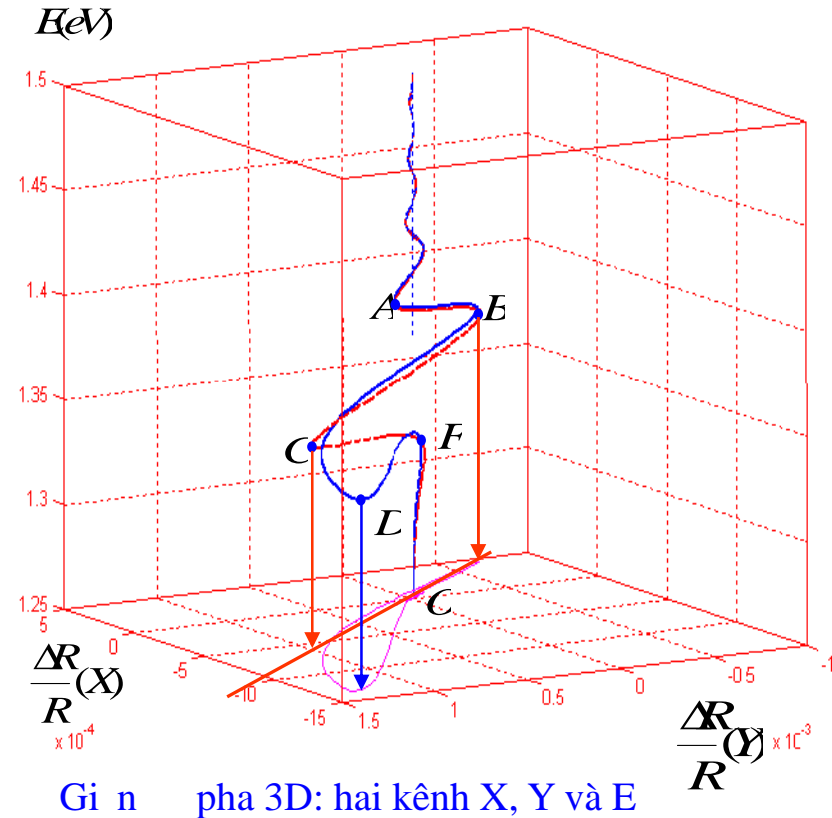
M t ph ng dao ng FKO

⊕ T i lân c n n ng l ng vùng c m (BDF). N u nh (D) b l ch kh i m t ph ng chính.



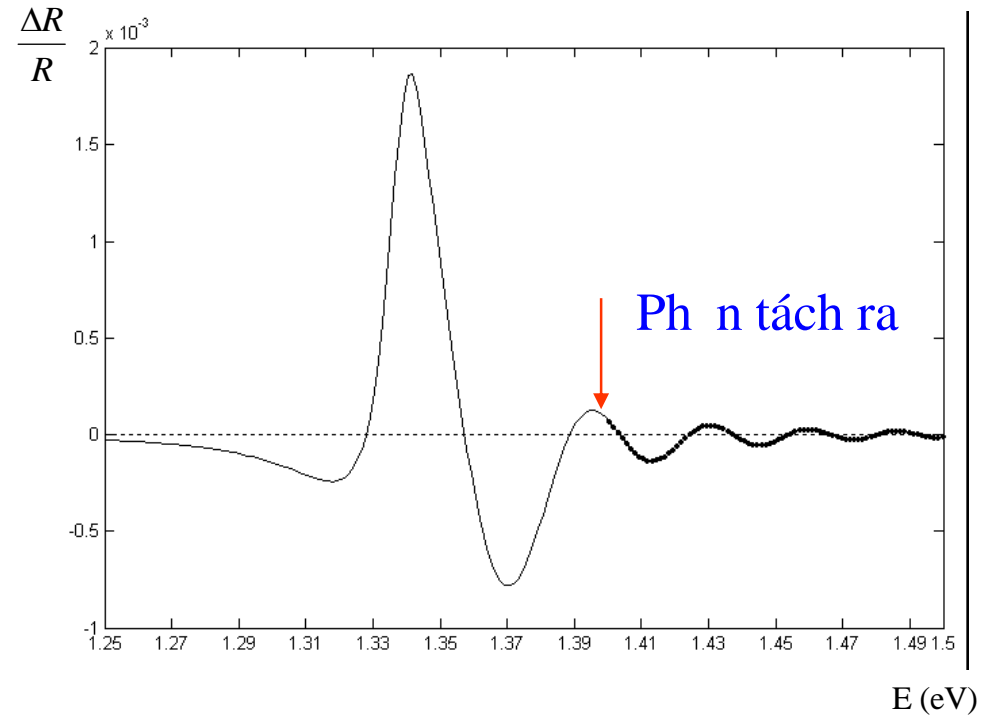
Có m t thành ph n Eciton

⊕ Các thành ph n khác xác nh t ng t nh thành ph n Eciton



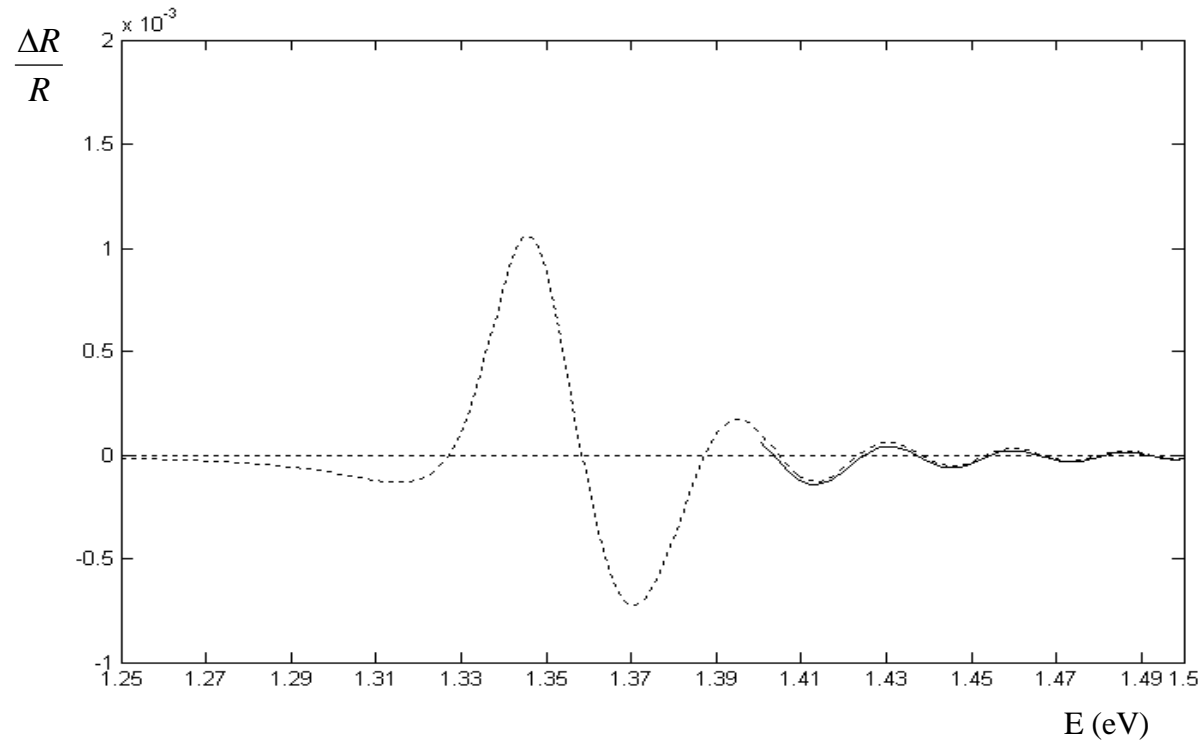
# Phân giải phổ PR của thành phần tinh thể nghiệm

1) Tách vùng phổ ch  
g m thành ph n FKO



## Phân tích phổ PR của thành phần thực nghiệm

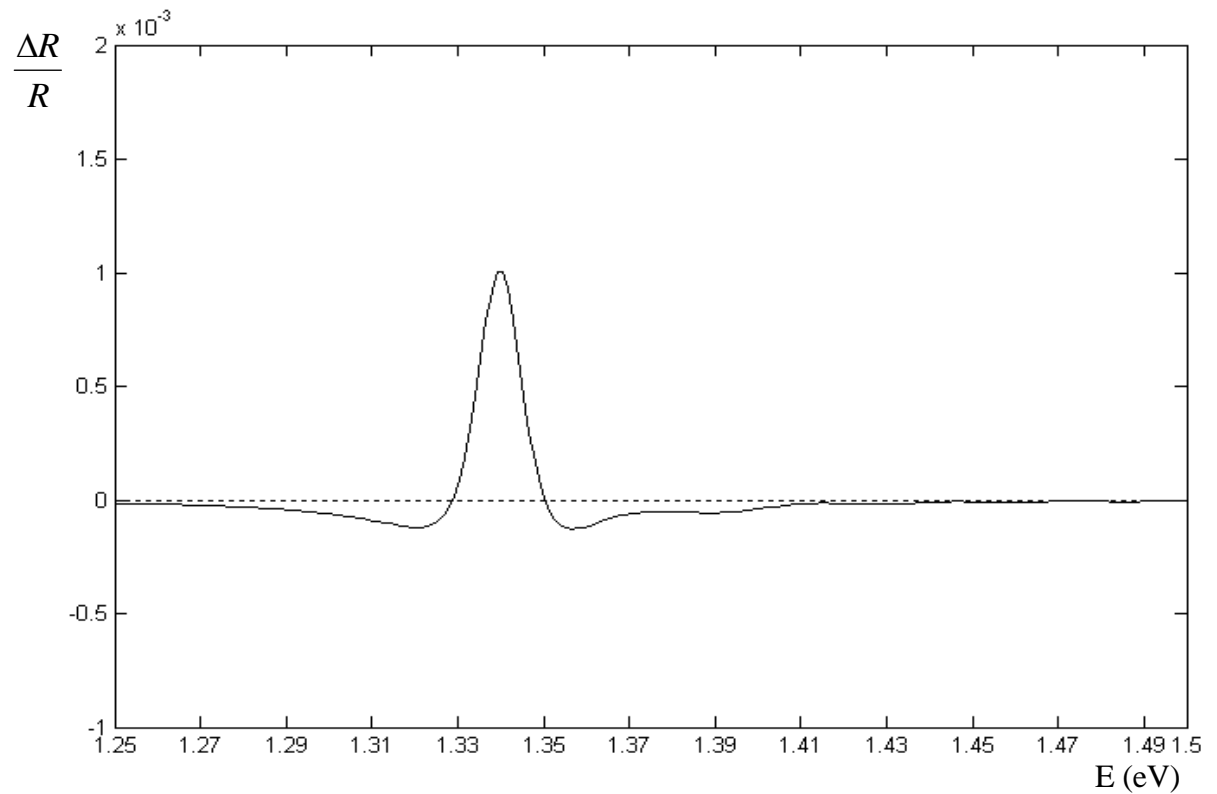
2) Sử dụng mô hình đã lập, hiệu chỉnh thành phần dao động Franz-Keldysh trên vùng phổ vạch tách ra.



⇒ Tính i n tr ã ng và các thông s ã m t

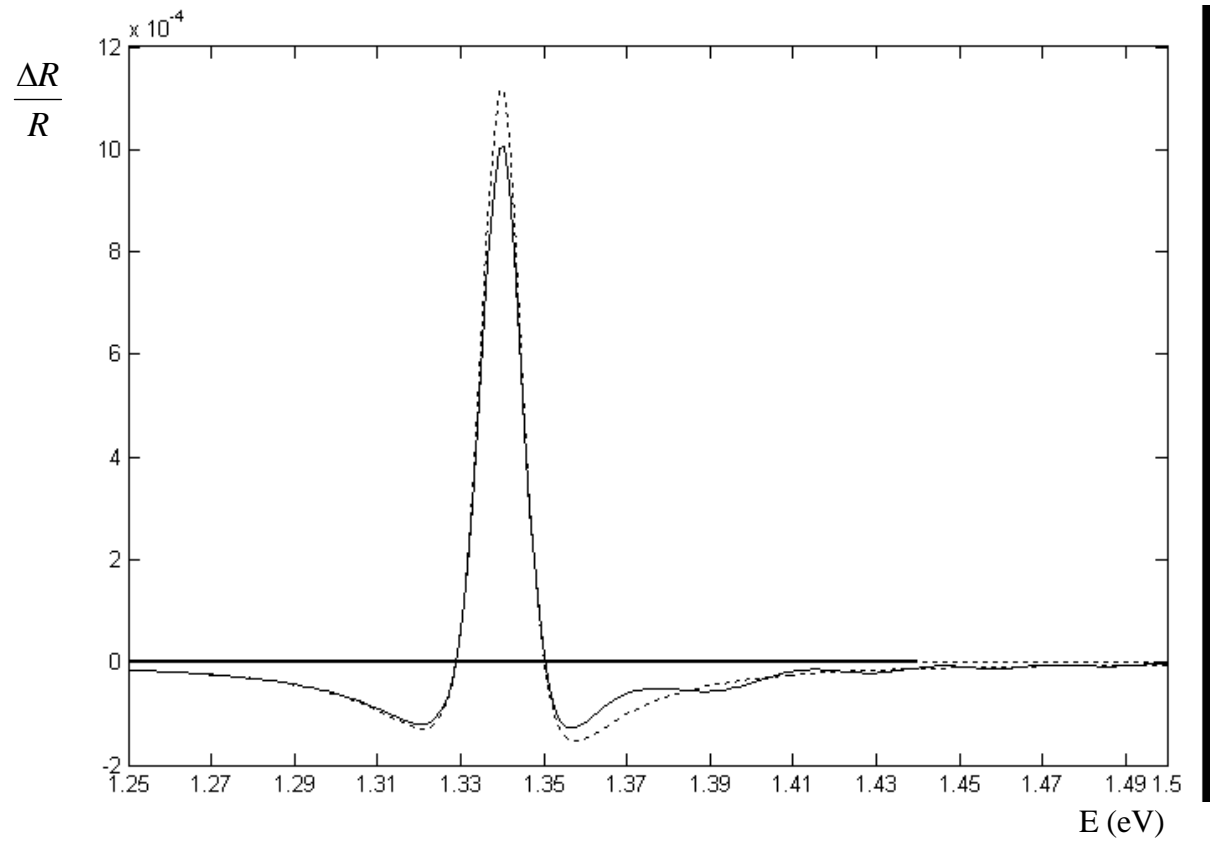
# Phân giải phổ PR của thành phần thực nghiệm

3) Tín hiệu từ phổ (phổ tổng hợp và phổ FKO hiệu chỉnh), tách thành phần FKO trong phổ tổng hợp



# Phân tích phổ PR của thành phần thực nghiệm

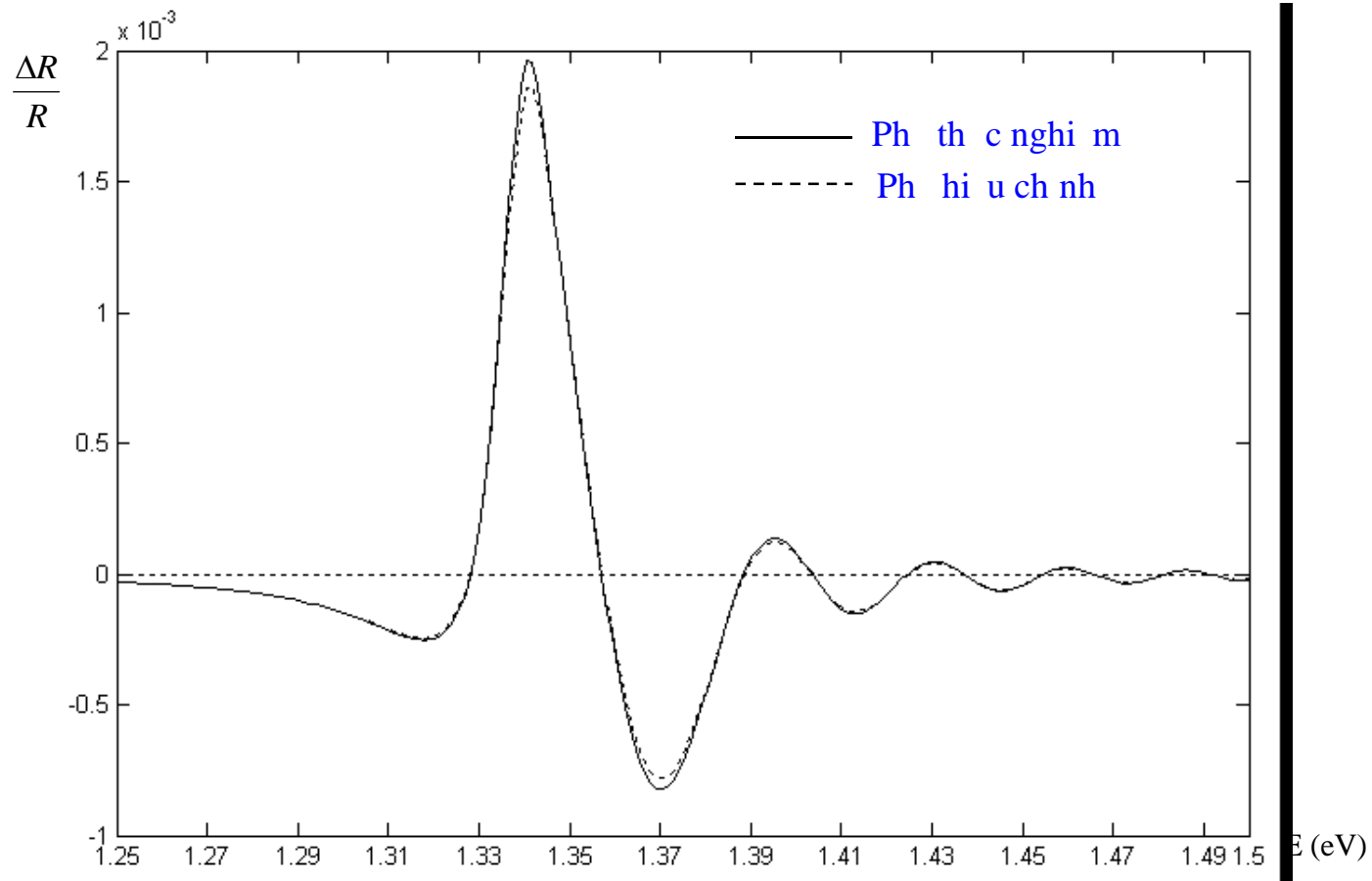
## 4) Hiệu ứng nh Eciton ở vùng phổ vạch ra





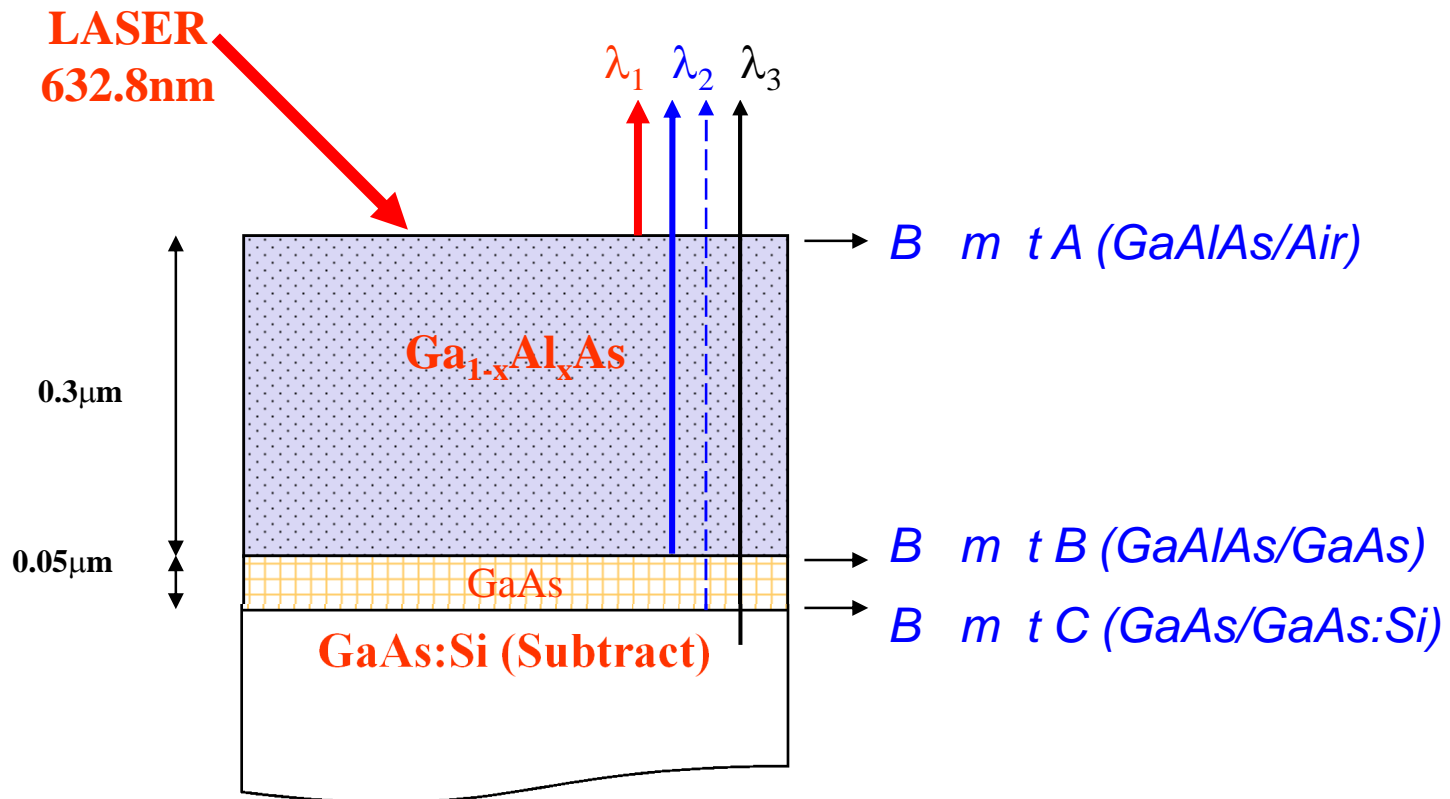
# Phân giải phổ PR của thành phần tinh thể

5) Công hai thành phần hữu ích nhất của phổ PR tổng hợp hữu ích



# Ph PR c a c u trúc a l p d th

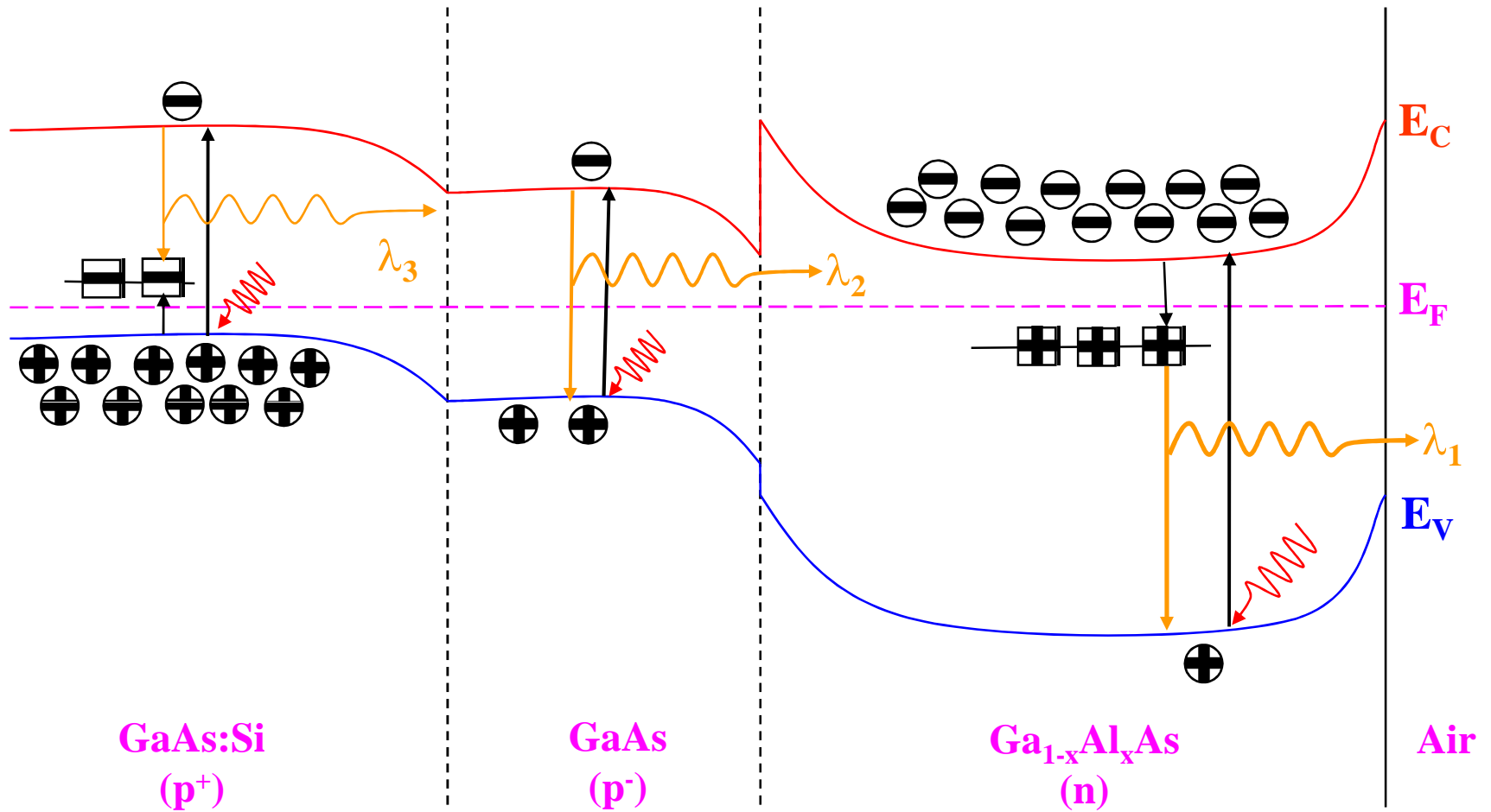
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (n)/GaAs (p)



**Hình 8:** Mô hình c u trúc a l p d th c a m u o  $\text{Ga}_{0.95}\text{Al}_{0.05}\text{As}/\text{GaAs}/\text{GaAs:Si}$ .

# Ph PR c a c u trúc a l p d th

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (n)/GaAs (p)



S các d ch chuy n h p thu và b c x khi chi u laser lên m u bán d n a l p d th  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}/\text{GaAs}:\text{Si}$ .

# Ph PR c a c u trúc a l p d th

## $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (n)/GaAs (p)

Ph PR là ph t ng h p c a 3 ph

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_s$  Ph PR c a  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  t i b m t

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{i1}$  Ph PR c a  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  t i l p t i p xú c

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{i2}$  Ph PR c a GaAs t i l p t i p xú c

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_s + A \left[ \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{i1} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{i2} \right]$$

A: c tr ng cho s h p thu

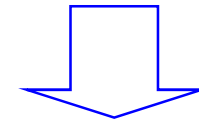
Xét tr ng h p  $x = 0.05$

B M T

$$d_{el} = 1.242 \text{ nm}$$
$$F_s = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$$

L P  
TI P XÚ C

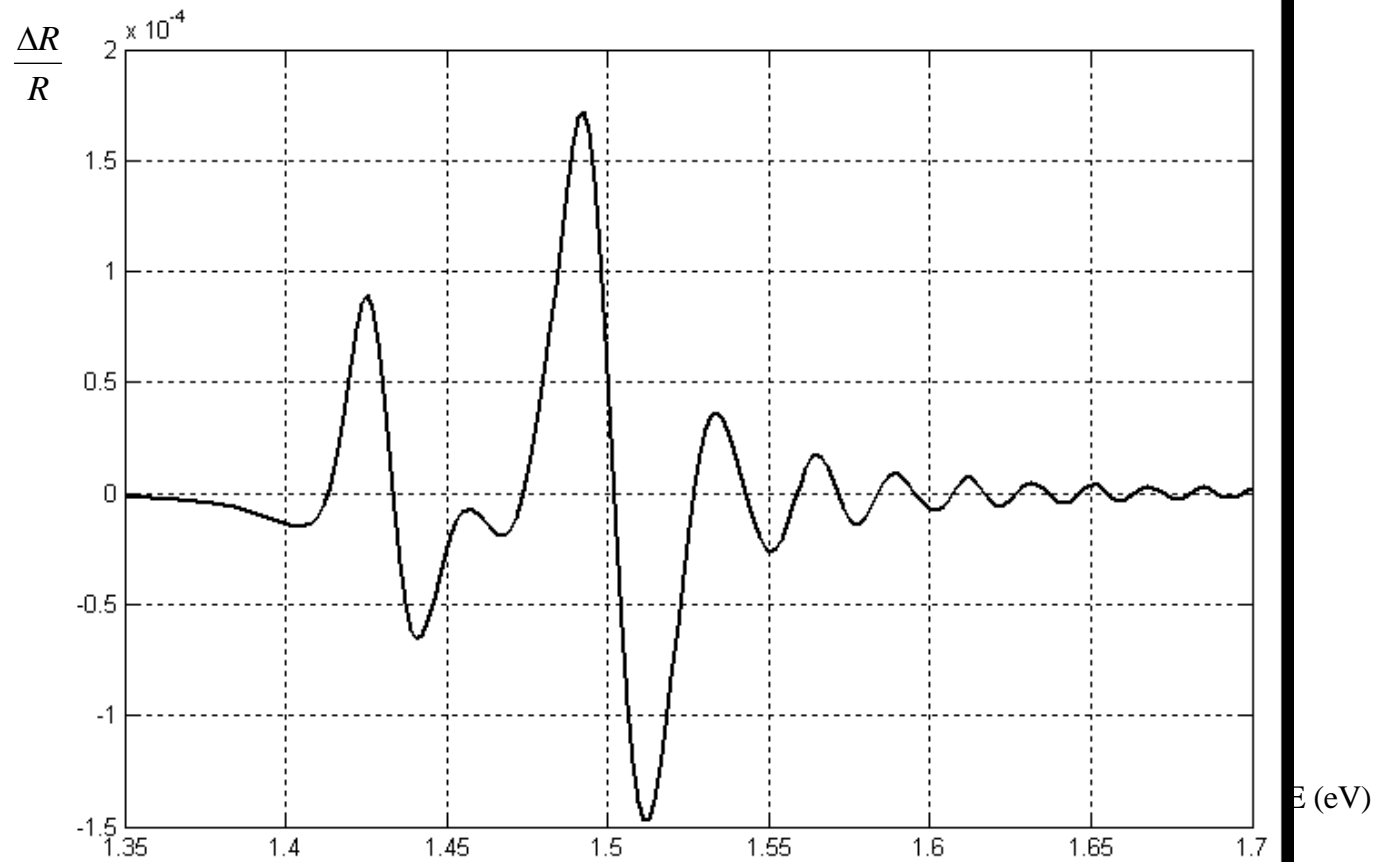
$$W_n = 108.69 \text{ nm}$$
$$W_p = 0.992 \text{ nm}$$
$$F_{tx} = 2 \times 10^6 \text{ V/m}$$



MÔ PH NG

# Ph PR c a c u tr ú c a l p d th

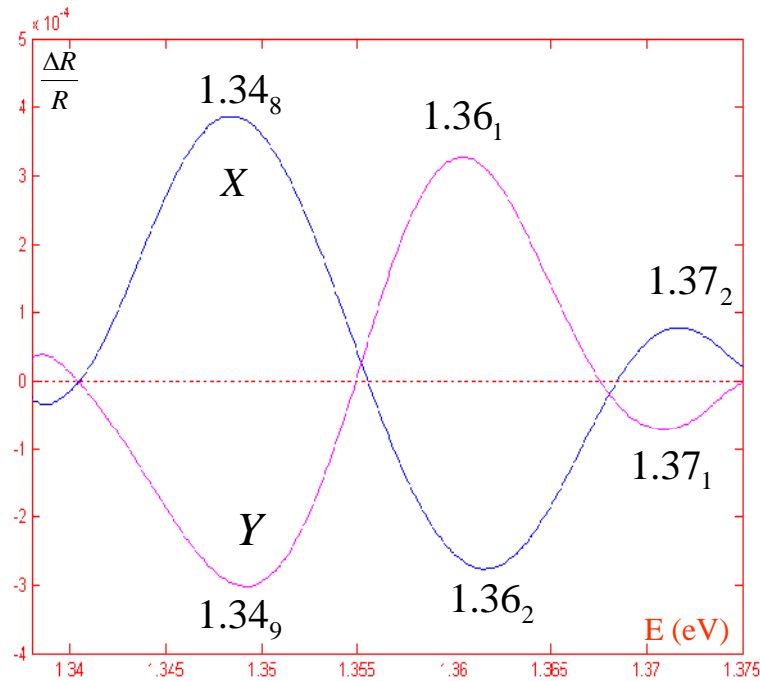
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As (n)}/\text{GaAs (p)}$



*Ph PR c a n -  $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As} / \text{p}^- - \text{GaAs}$*

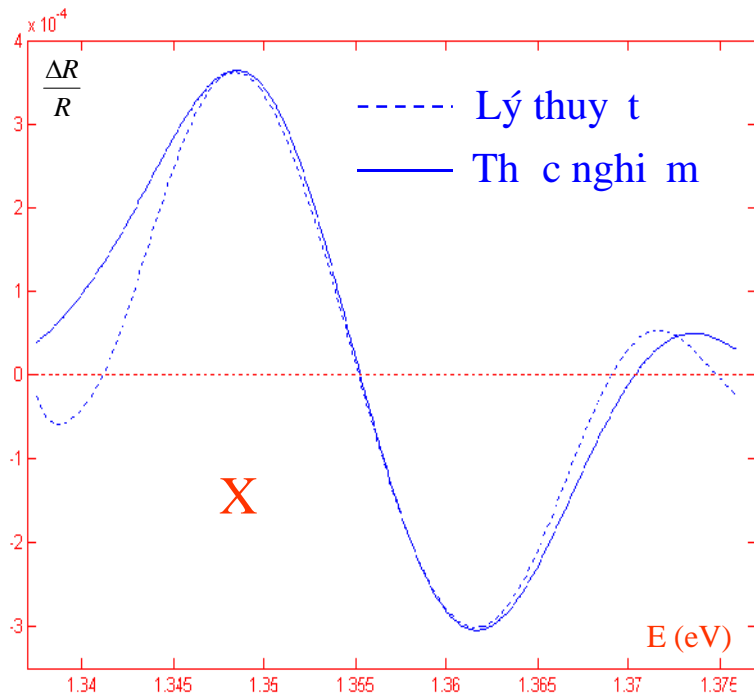
*$F_s = 3 \times 10^6 \text{ V/m}; F_{tx} = 2 \times 10^6 \text{ V/m}; j=30$*

# So sánh v i ph th c nghi m c a InP



Ph PR c a InP thu c trên 2 kênh c a lock-in t i phòng thí nghi m Quang – quang ph , H KHTN [5]

$$F_s = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$$



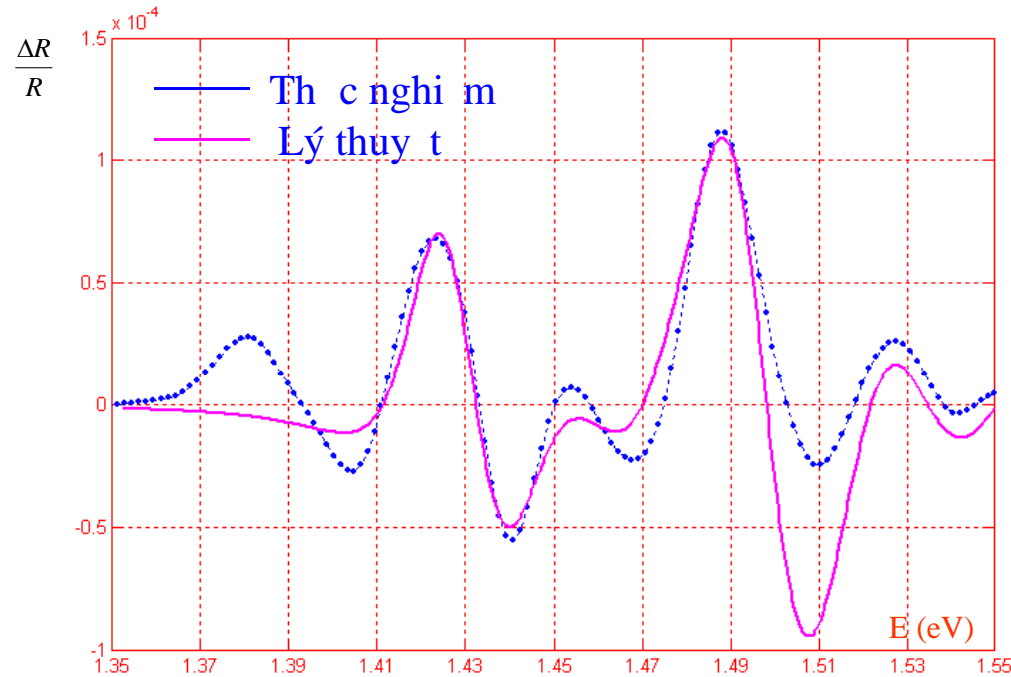
Làm kh p gi a ph th c nghi m và lý thuy t c a InP

$$E_g = 1.348 \text{ eV}, \Gamma = 7.5 \times 10^{-3} \text{ meV}$$

$$F_s = 1.5 \times 10^6 \text{ V/m}$$

# So sánh v i ph th c nghi m c a

## $Al_xGa_{1-x}As$ (n)/GaAs (p)



Ph PR c a  $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$  (n+)/GaAs (p-)  
so sánh gi a th c nghi m và lý thuy t

### Th c nghi m

$$GaAs: E_g = 1.42_3 eV$$

$$Al_{0.047}Ga_{0.953}As: E_g = 1.48_7 eV$$

$$F_s = 1.52_3 \times 10^6 V/m$$

$$F_{tx} = 2.23_3 \times 10^6 V/m$$

### Mô ph ng

$$GaAs: E_g = 1.42_3 eV$$

$$\Gamma = 12.5 meV$$

$$Al_{0.048}Ga_{0.952}As: E_g = 1.48_9 eV$$

$$\Gamma = 13.5 meV$$

$$F_s = 1.7 \times 10^6 V/m$$

$$F_{tx} = 2.5 \times 10^6 V/m$$

# Ý kiến

---

Hiệu ứng Franz-Keldysh

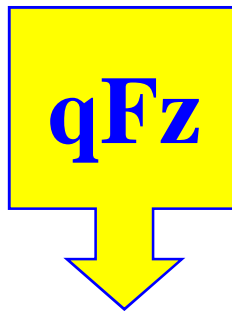


Phân phối thu (phân xạ)  
Dịch chuyển về phía  
năng lượng thấp

Lý thuyết mô phỏng PR



Ph... không dịch chuyển



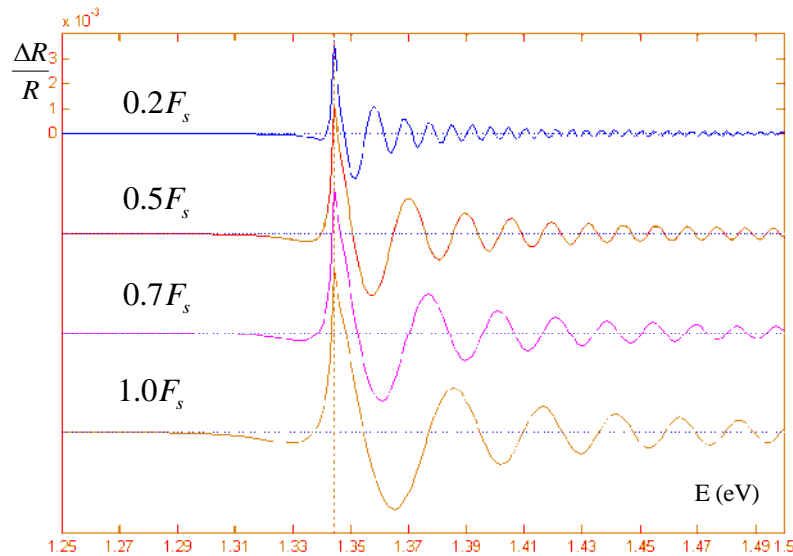
Do vậy, chúng tôi nghĩ khi mô phỏng cần thay:  $E_g$  thành  $E_g'$

$$E_g' = E_g - qFz$$



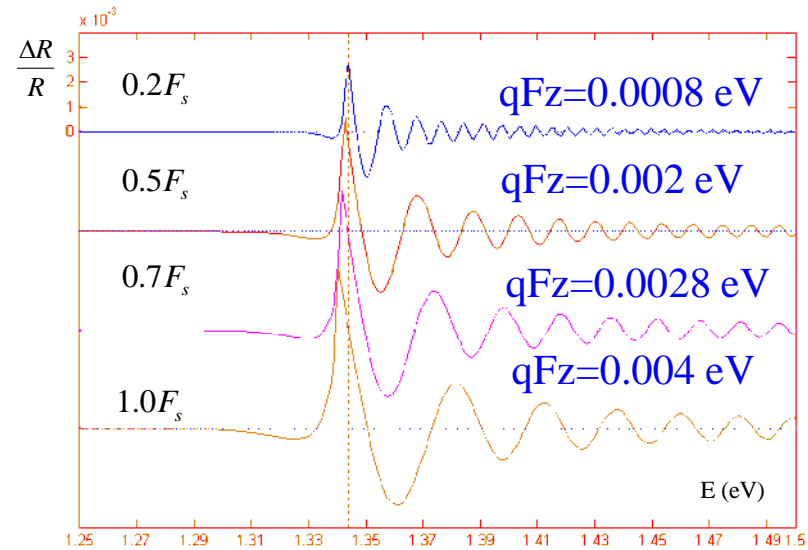
# Ý ki n ngh

$$E_g' = E_g - qFz$$



Ph PR c a InP. N ng l ng vùng c m  
**không ph thu c** vào i n tr ng

$$E_g = 1.344 eV, F_s = 4 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}, \Gamma = 0 \text{ meV}$$



Ph PR c a InP. N ng l ng vùng c m  
**ph thu c** vào i n tr ng

$$E_g = 1.344 eV, F_s = 4 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$$

$$\Gamma = 0 \text{ meV}, z = 10^{-9} \text{ m}$$

**THE END**

---