

Etude du pompage optique dans le silicium par photoluminescence et photo-émission polarisées

Frédéric Roux

Encadrement : J. Peretti : directeur de thèse
G. Lampel
Y. Lassailly

Physique du spin dans les semi-conducteurs

1. création

Polarisation
thermodynamique

Pompage optique

Injection électrique

2. dynamique

Relaxation

Précession

Transport

3. détection

ESR, RMN

Luminescence

Photo-émission
polarisée

Détection électrique

Grandeurs importantes :

Taux de polarisation électronique : P_{elec}

Temps de relaxation de spin : T_1

Physique du spin dans les semi-conducteurs

1. création

Polarisation
thermodynamique

Pompage optique

Injection électrique

2. dynamique

Relaxation

Précession

Transport

3. détection

ESR, RMN

Luminescence

**Photo-émission
polarisée**

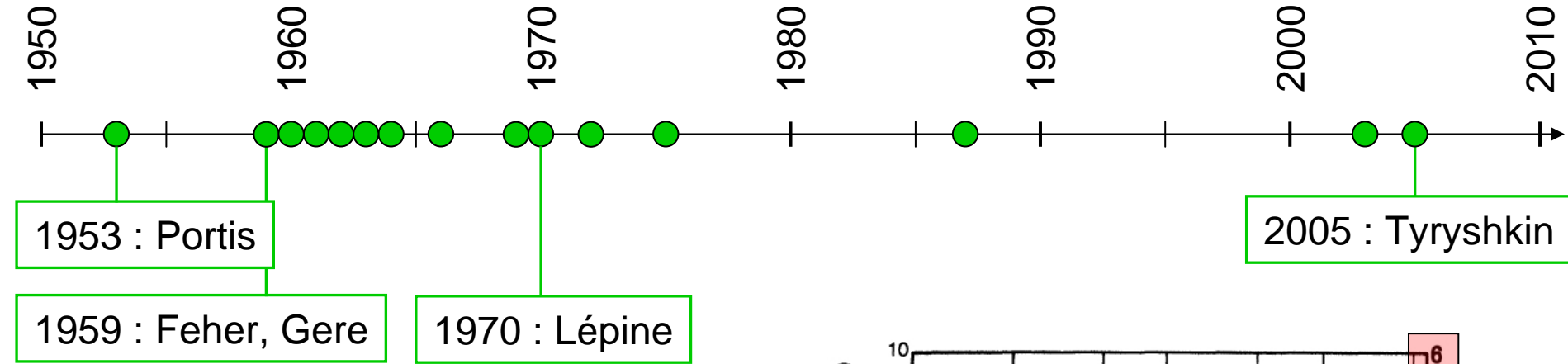
Détection électrique

Grandeurs importantes :

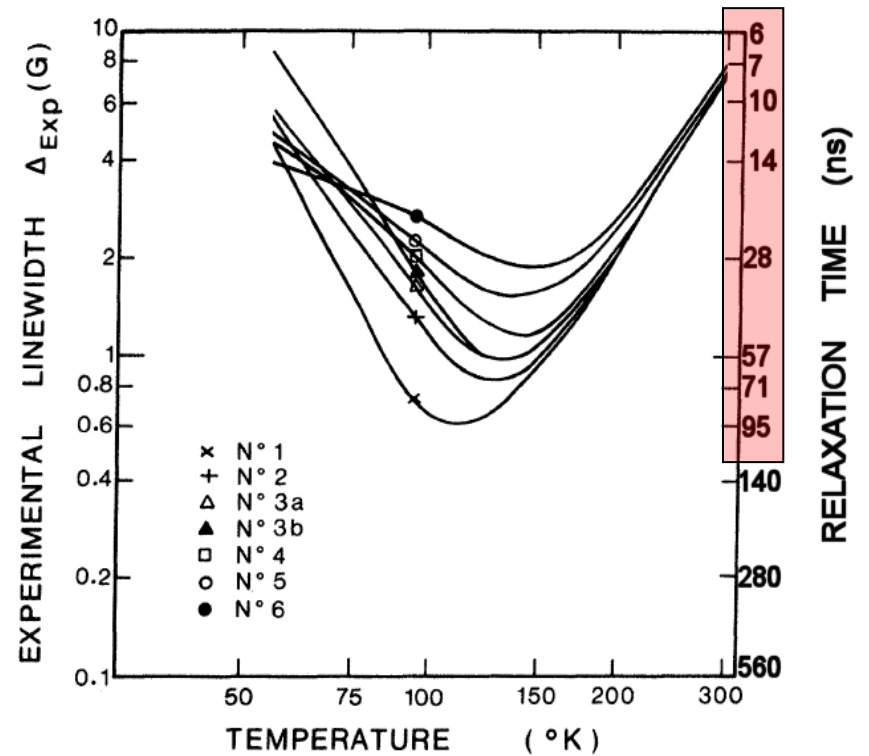
Taux de polarisation électronique : P_{elec}

Temps de relaxation de spin : T_1

Une brève histoire du spin dans le Si (1)

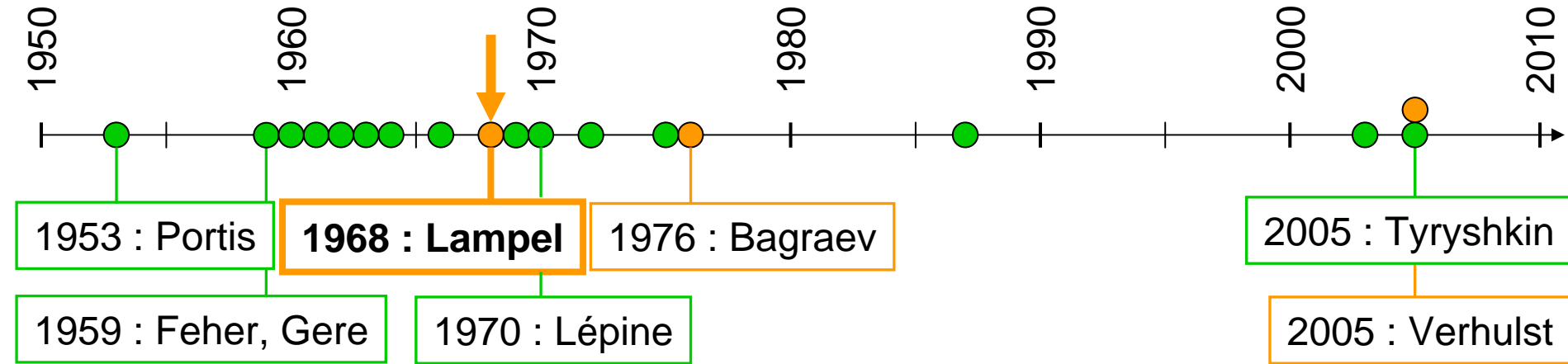


● ESR

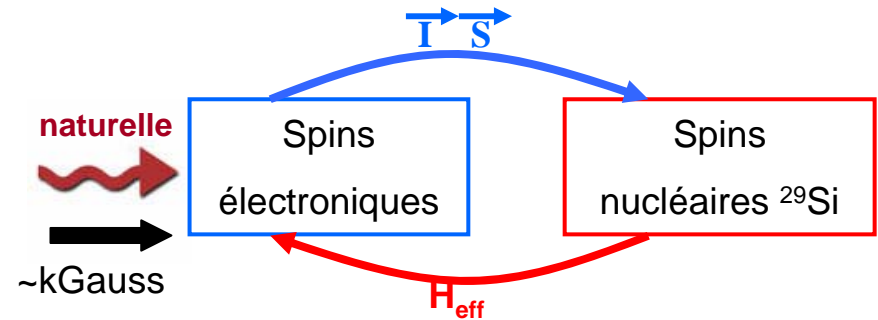


Lépine : *Phys. Rev. B*, 2, 2429 (1970)

Une brève histoire du spin dans le Si (2)



- ESR
- NMR



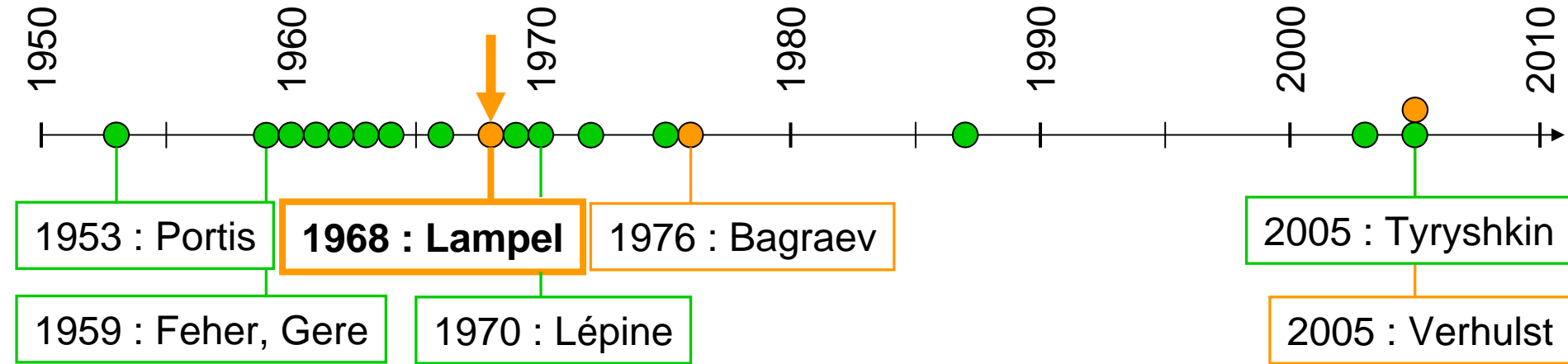
• Effet Overhauser non résonant :

$$\bullet \frac{T_1}{T_1 + \tau} = 2.10^{-3}$$

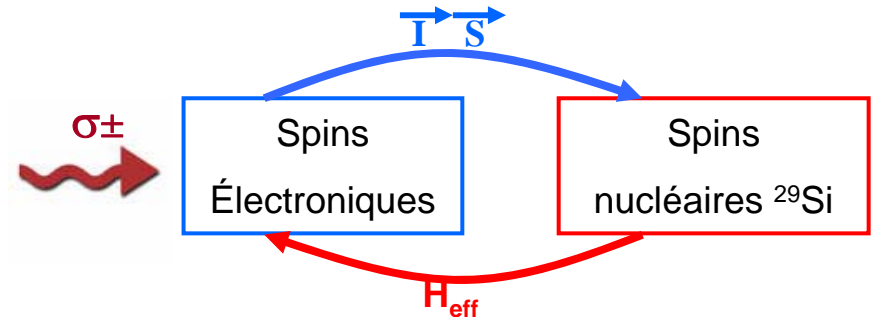
• $T_1 = 60 \text{ ns}$

Lampel : Phys. Rev. Lett. 20, 491 (1968)

Une brève histoire du spin dans le Si (3)



- ESR
- NMR



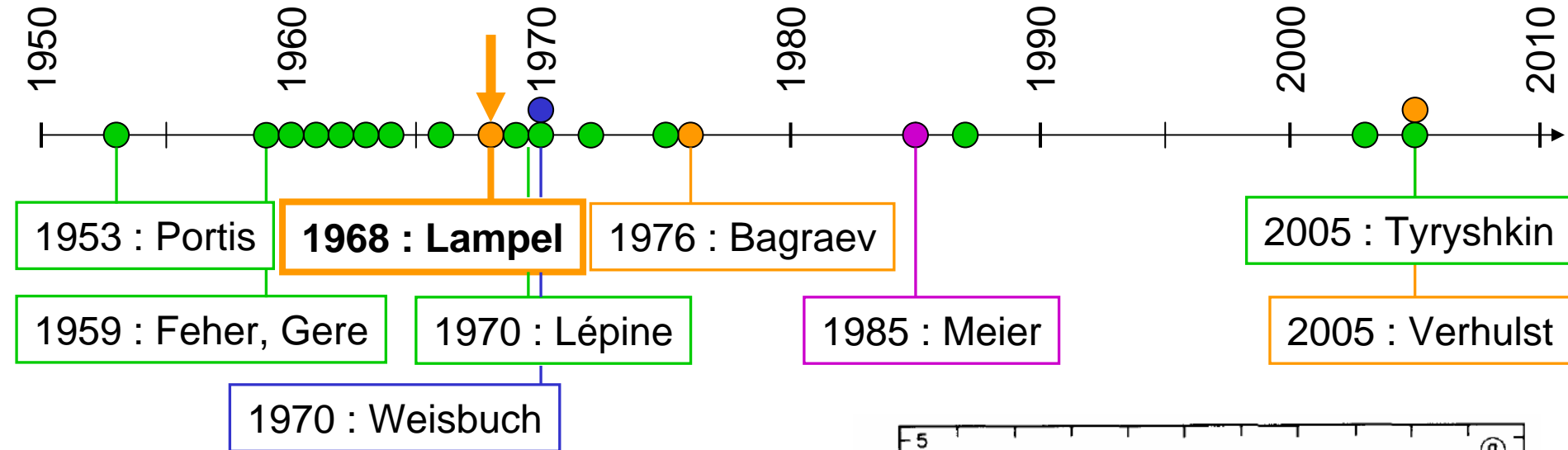
- polarisation nucléaire : due au **pompage optique** des électrons de conduction

- $P_{\text{elec}} = 0.001 \%$... $P_i = 0.4\%$

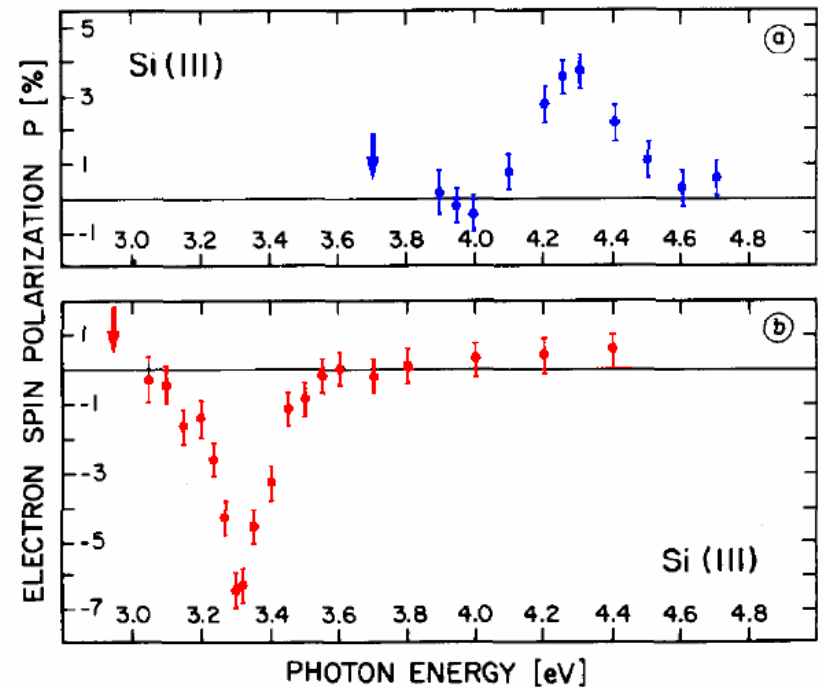
- Mesure indirecte, mais avantage : détermination de T_1 et τ , même pour $T_1 \ll \tau$

Lampel : *Phys. Rev. Lett.* **20**, 491 (1968)

Une brève histoire du spin dans le Si (4)

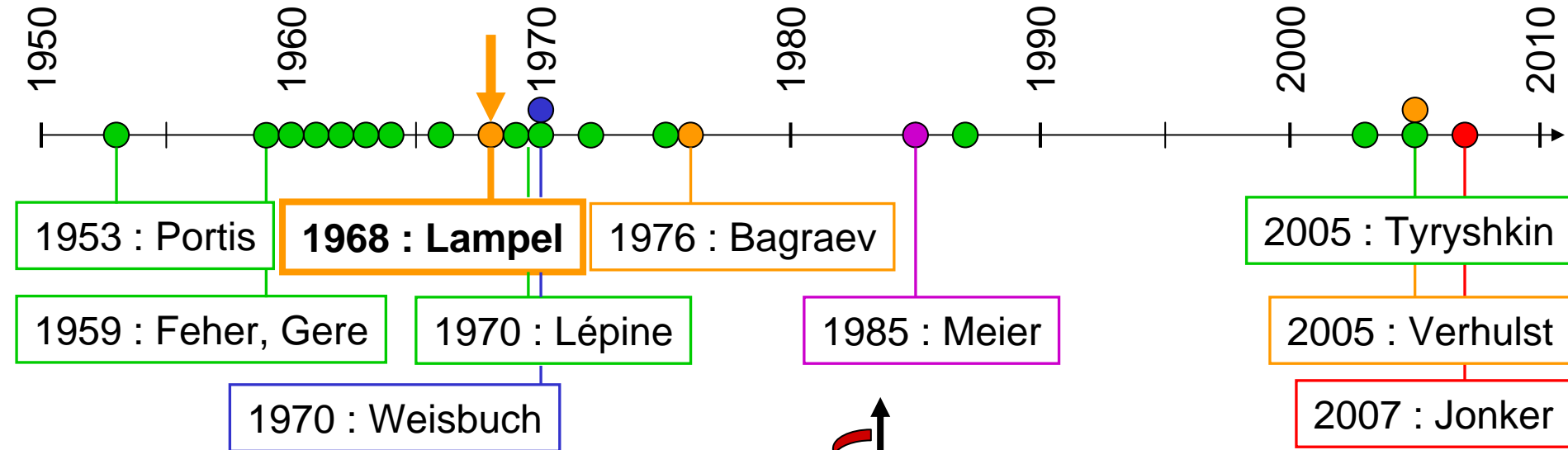


- ESR
- NMR
- Photoluminescence
- Photo-émission

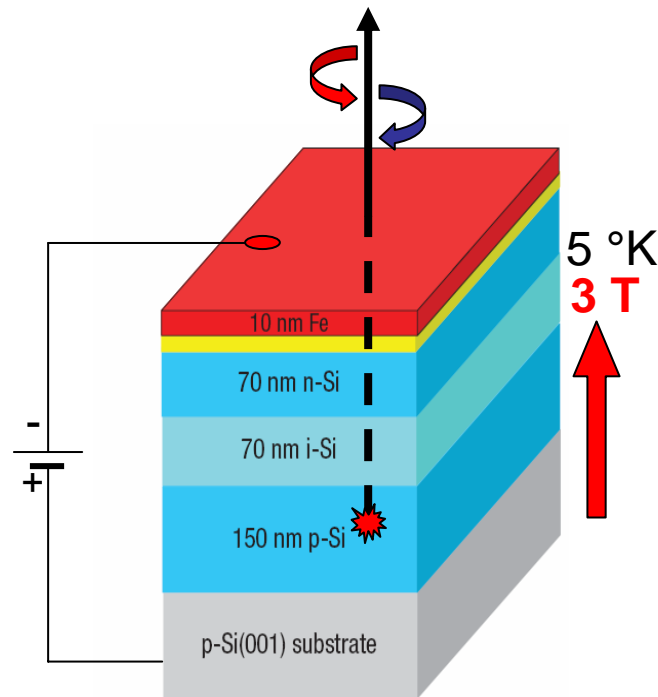


Meier : *Sol. State. Comm* **55**, 155 (1985)

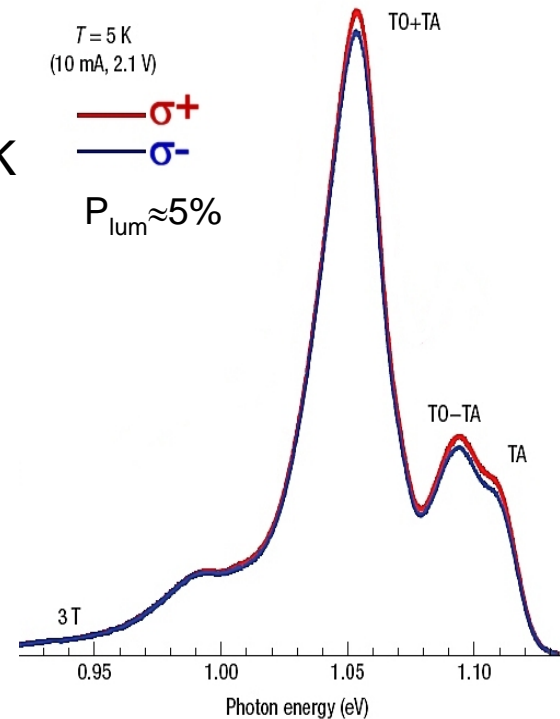
Une brève histoire du spin dans le Si (5)



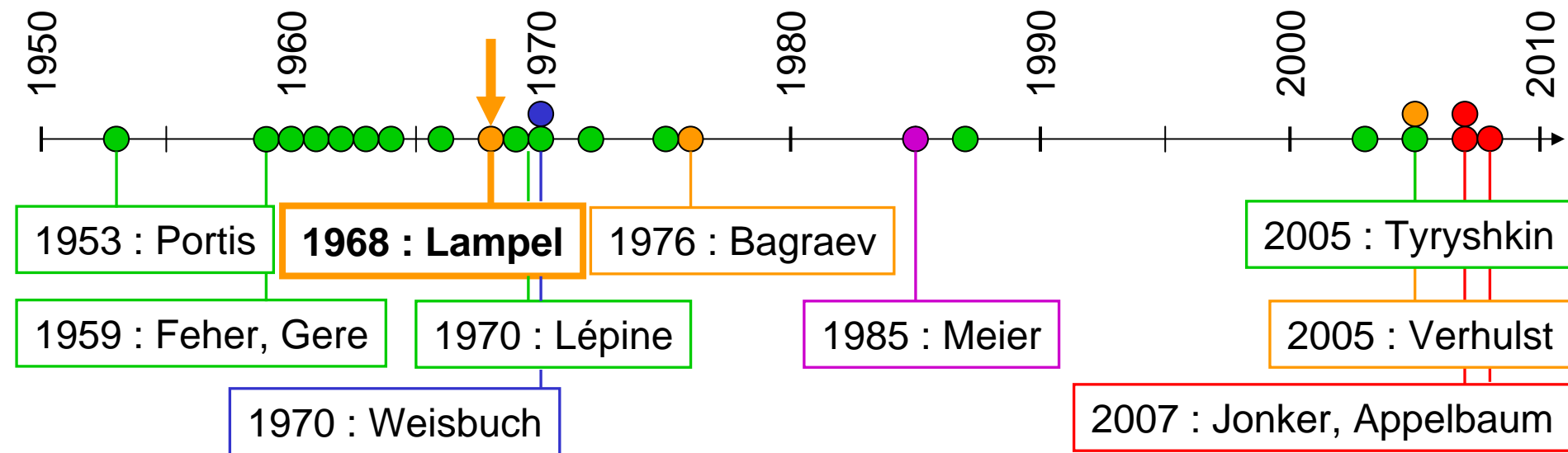
- ESR
- NMR
- Photoluminescence
- Photo-émission
- Mesures électriques



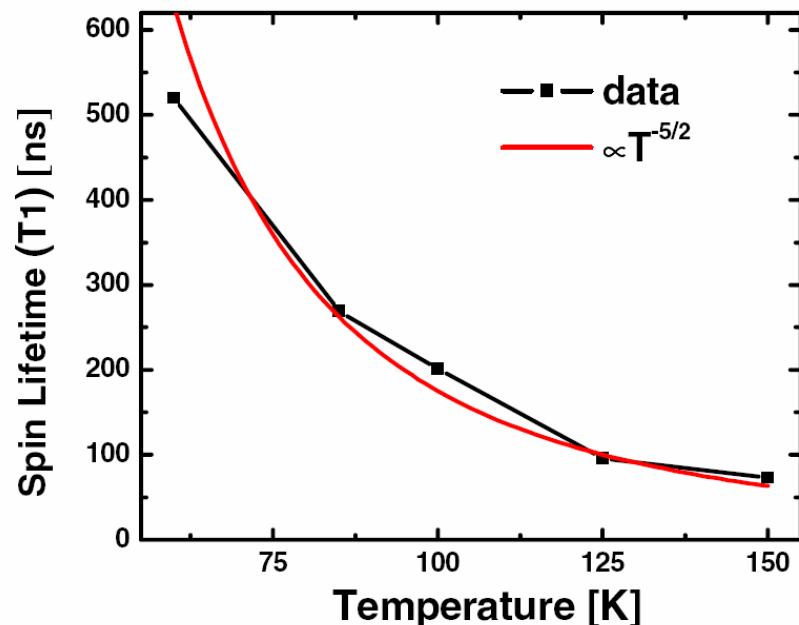
Jonker : *Nature Phys.* **3**, 542 (2007)



Une brève histoire du spin dans le Si (6)

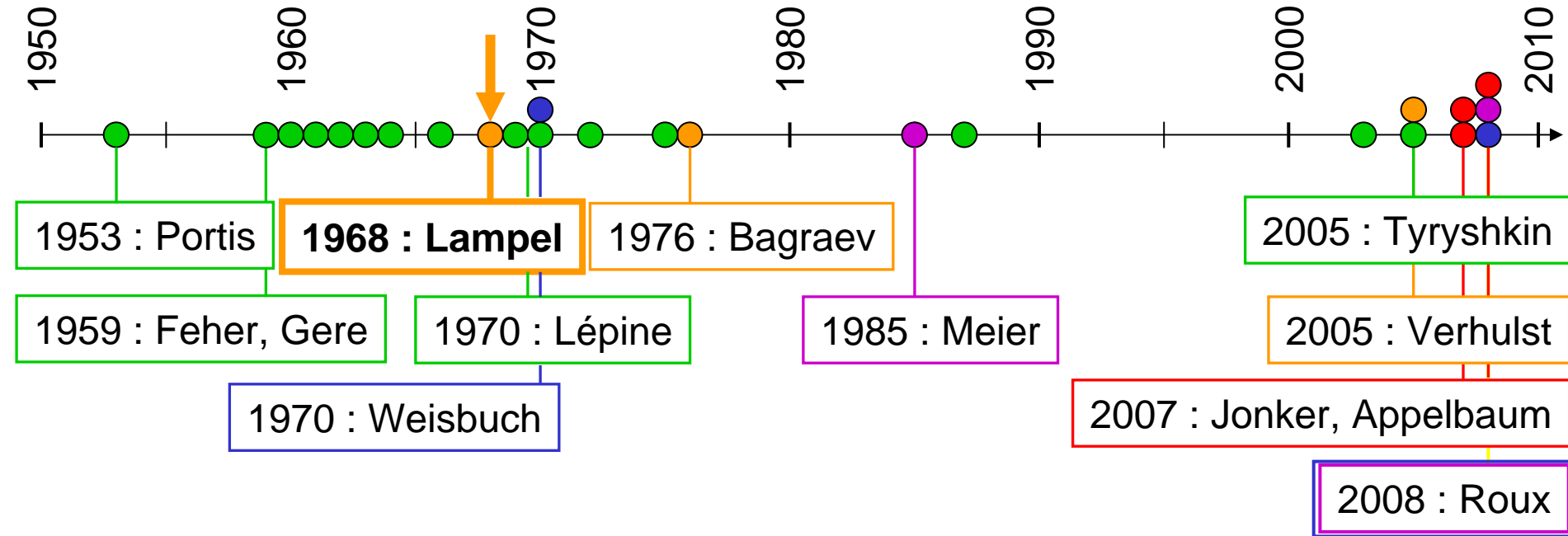


- ESR
- NMR
- Photoluminescence
- Photo-émission
- Mesures électriques



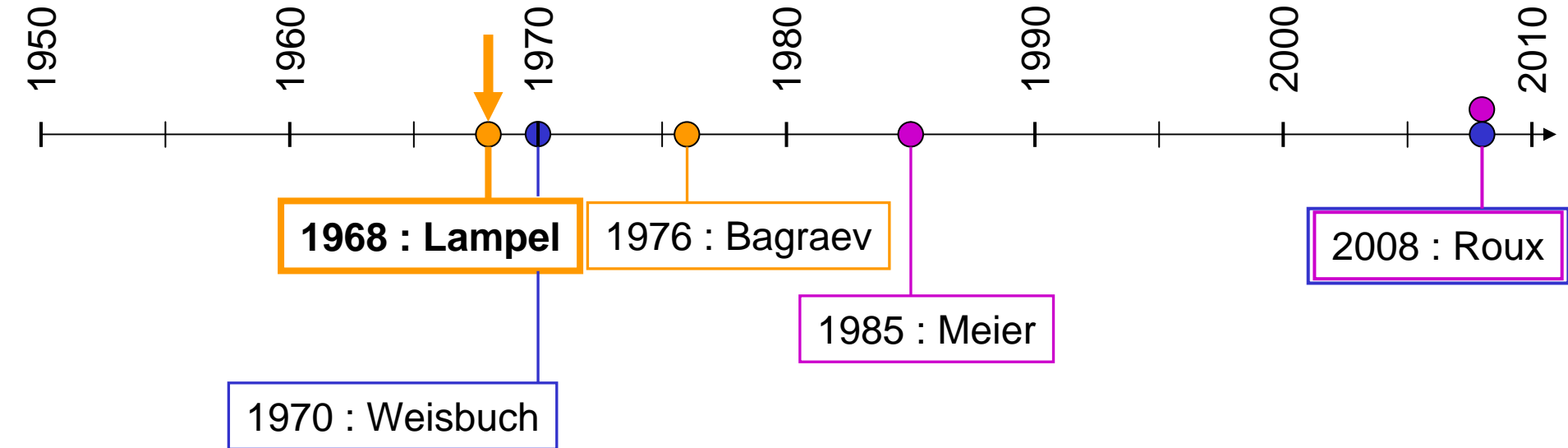
Appelbaum : *Phys. Rev. Lett.* **99**, 177209 (2007)

Une brève histoire du spin dans le Si (7)



- ESR
- NMR
- Photoluminescence
- Photo-émission
- Mesures électriques

Une brève histoire du spin dans le Si (8)



- NMR
- Photoluminescence
- Photo-émission

Peut-on injecter du spin efficacement par pompage optique dans le silicium ?

1. Problématique

2. Approche

3. Photoluminescence polarisée

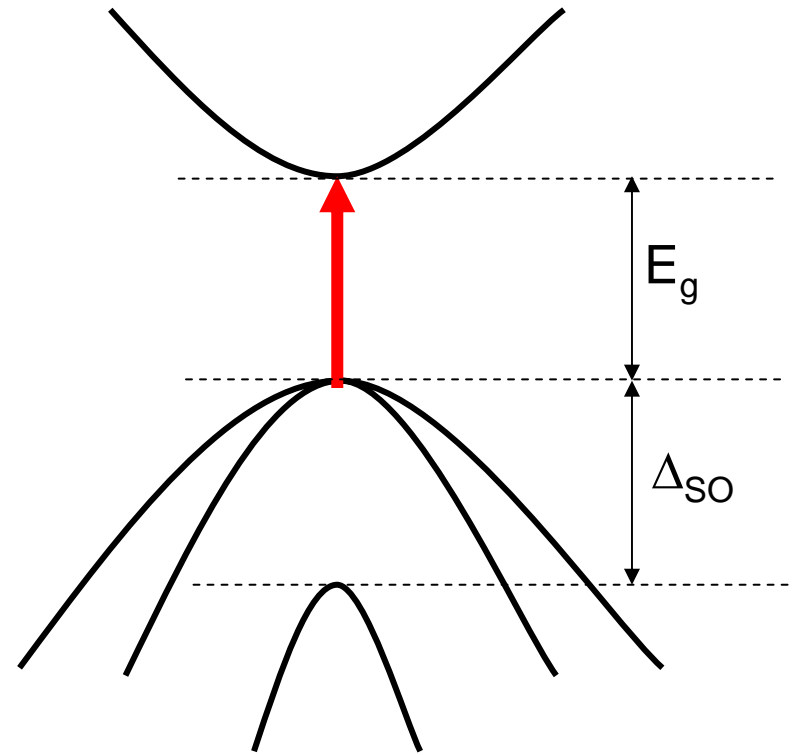
4. Photo-émission polarisée

5. Conclusions et perspectives

- Transfert du moment angulaire des photons aux électrons grâce à l'interaction spin-orbite

Lumière polarisée σ^\pm

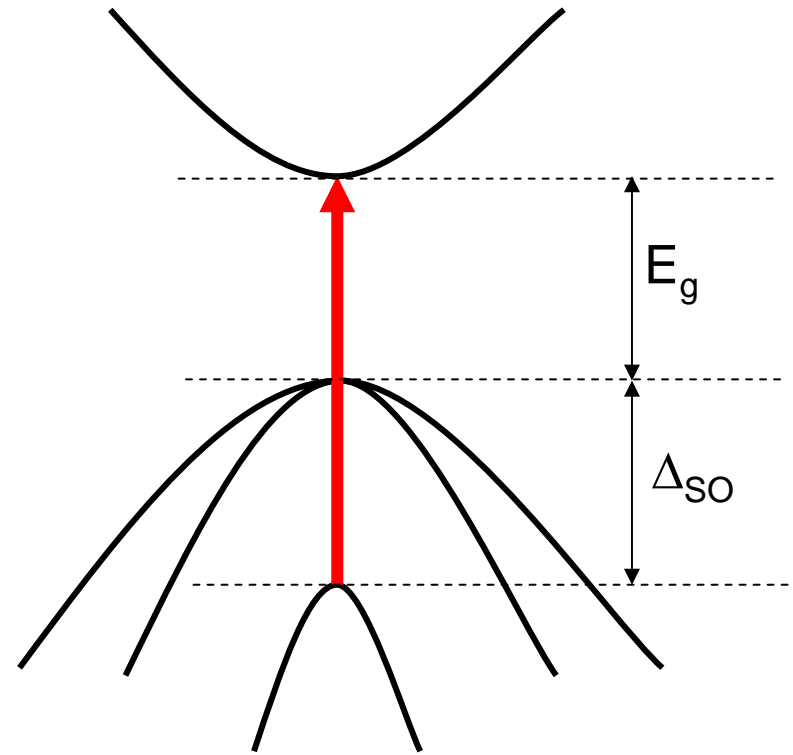
$$E_g \leq h\nu \leq E_g + \Delta_{SO}$$



- Transfert du moment angulaire des photons aux électrons grâce à l'interaction spin-orbite

Lumière polarisée σ^\pm

$$E_g \leq h\nu \leq E_g + \Delta_{SO}$$



➤ Transfert du moment angulaire des photons aux électrons grâce à l'interaction spin-orbite

Lumière polarisée σ^\pm

$$E_g \leq h\nu \leq E_g + \Delta_{SO}$$

$$P_{\text{elec}} = \frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{n_\uparrow + n_\downarrow} = P_i \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

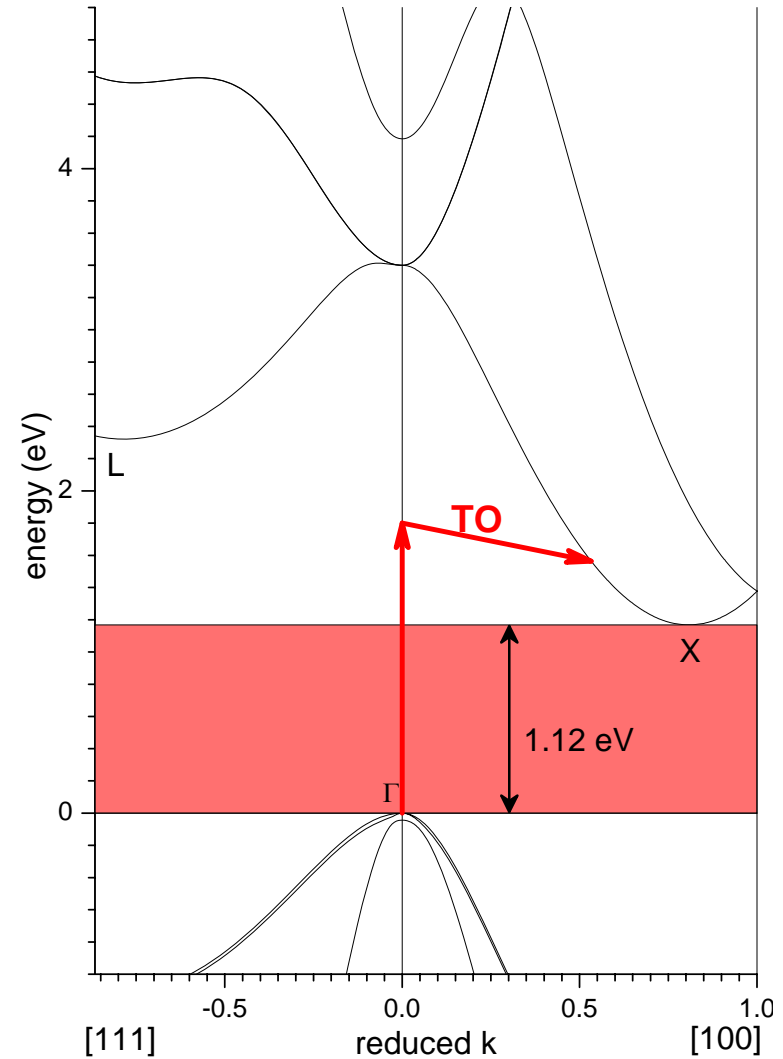
- T_1 : temps de relaxation de spin
- τ : temps de vie
- P_i : polarisation initiale, dépend de la symétrie du cristal

⇒ **Orientation optique**

Pompage optique dans le Si (1)

Difficultés :

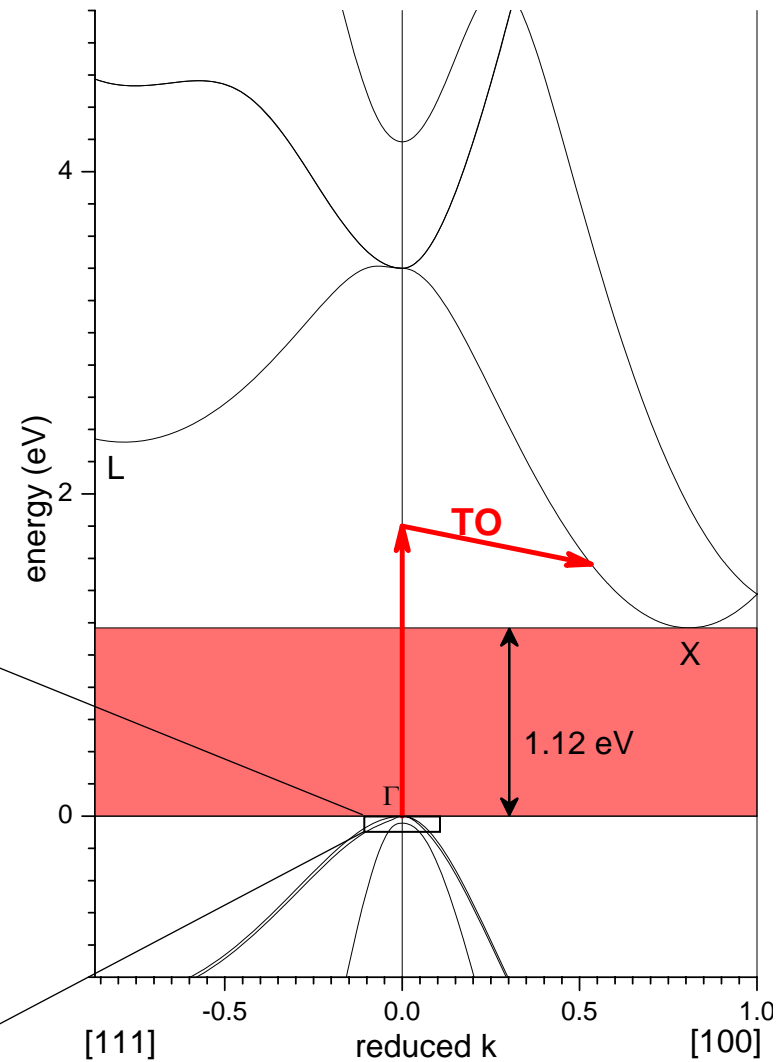
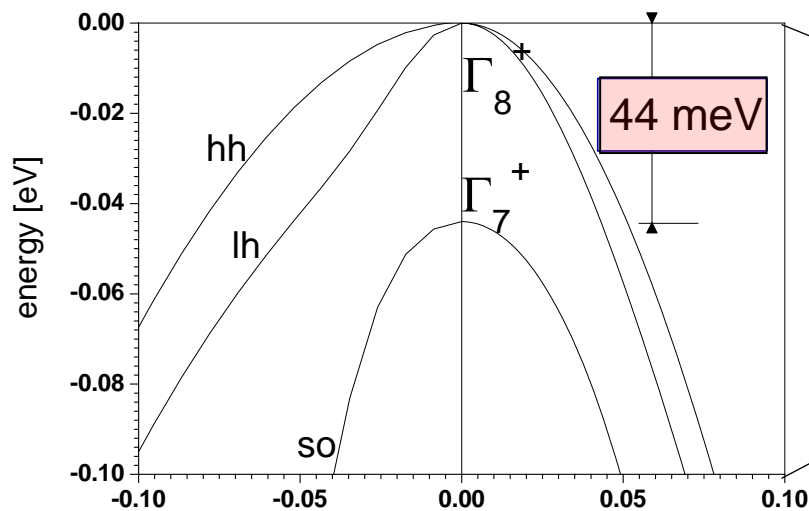
➤ SC à gap indirect : 1.12 eV



Pompage optique dans le Si (2)

Difficultés :

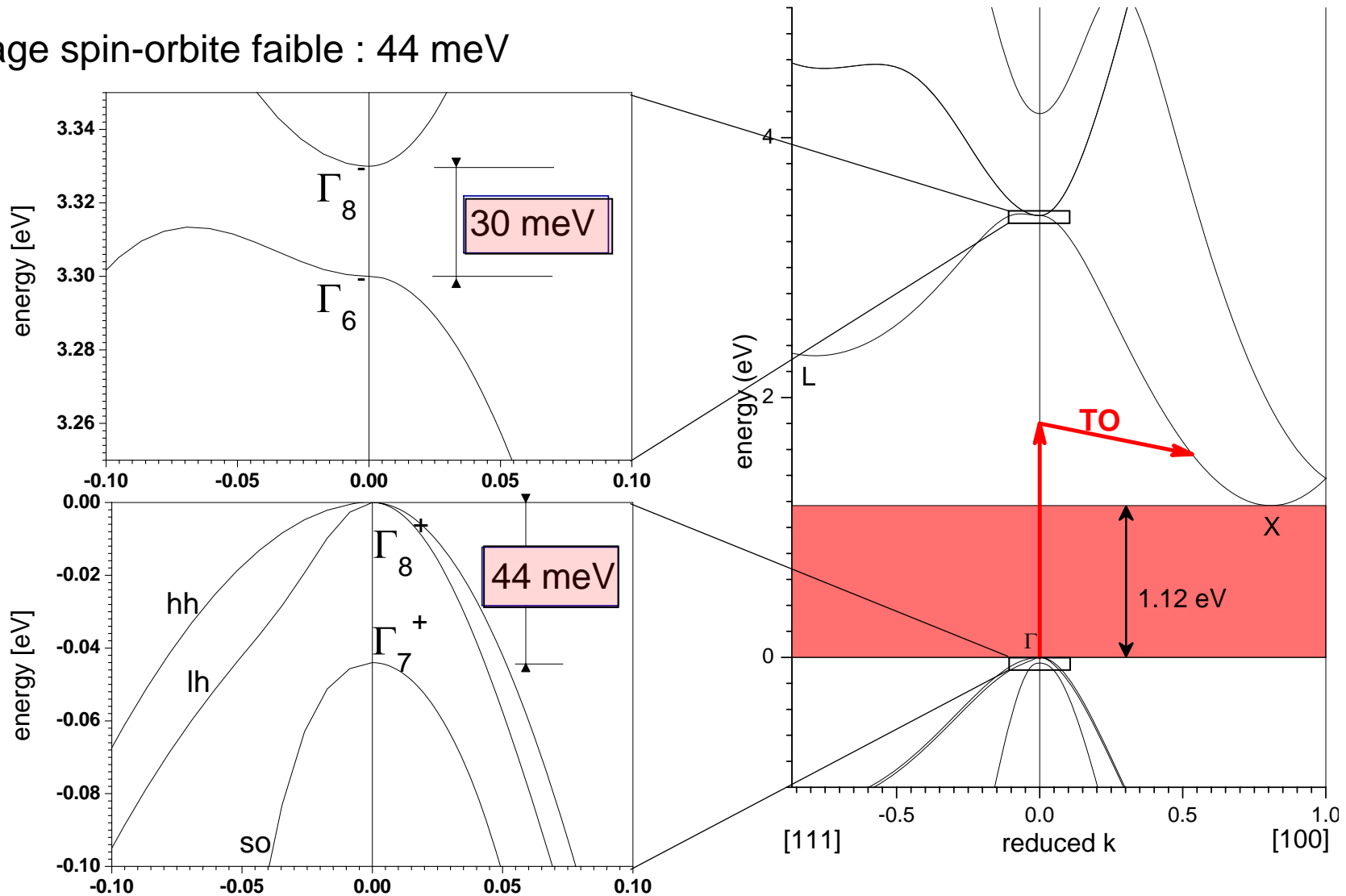
- SC à gap indirect : 1.12 eV
- Couplage spin-orbite faible : 44 meV



Pompage optique dans le Si (2)

Difficultés :

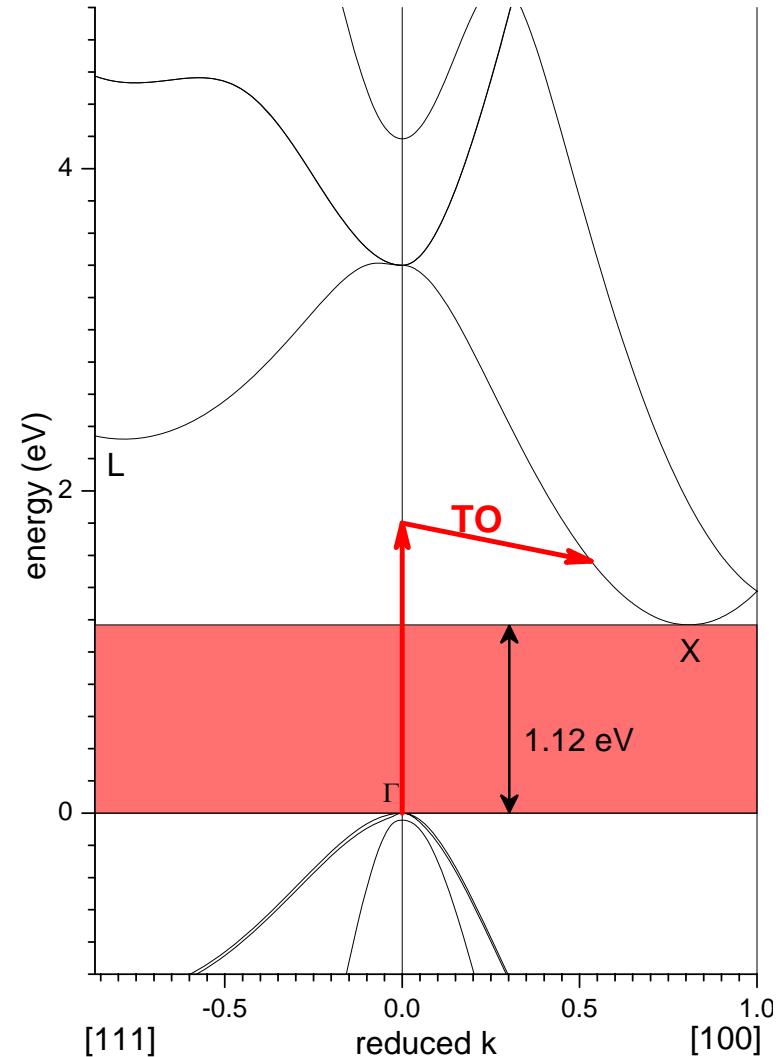
- SC à gap indirect : 1.12 eV
- Couplage spin-orbite faible : 44 meV



Pompage optique dans le Si (3)

Difficultés :

- SC à gap indirect : 1.12 eV
- Couplage spin-orbite faible : 44 meV
- Longueur d'absorption : 100 μm
- Temps de vie τ : 1-100 μs
- Temps de relaxation de spin T_1 : 1-100 ns



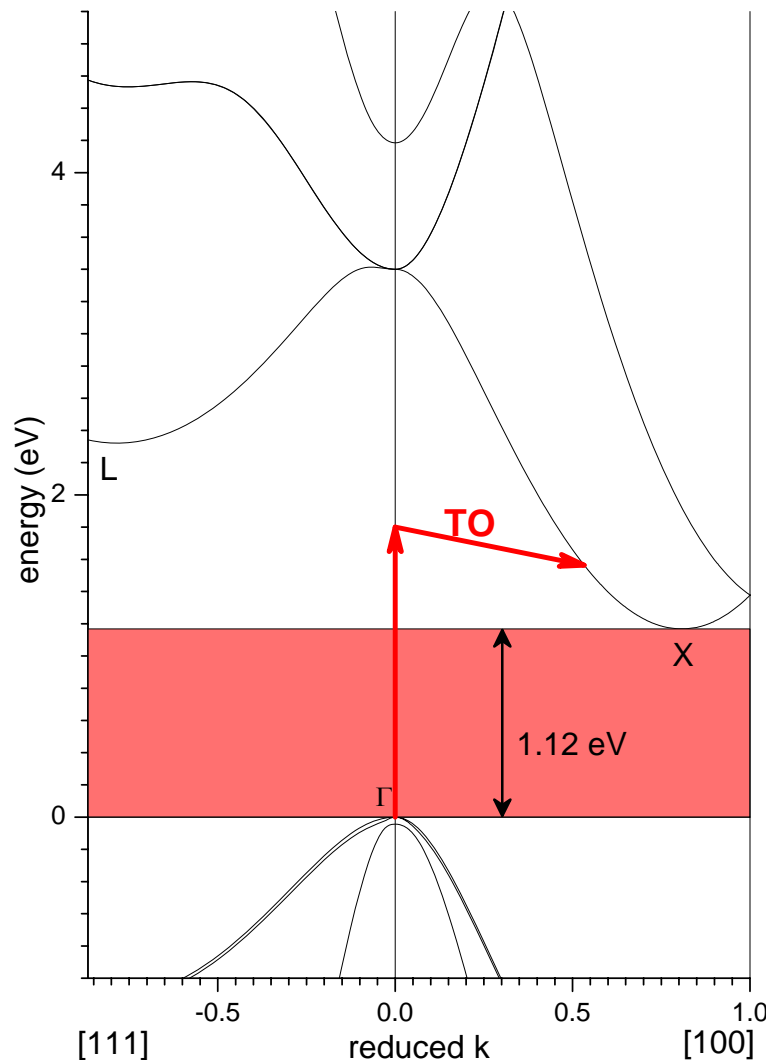
Pompage optique dans le Si (3)

Difficultés :

- SC à gap indirect : 1.12 eV
- Couplage spin-orbite faible : 44 meV
- Longueur d'absorption : 100 μm
- Temps de vie τ : 1-100 μs
- Temps de relaxation de spin T_1 : 1-100 ns

$$\frac{T_1}{T_1 + \tau} \approx 10^{-3} \text{ à } 10^{-2}$$

- **Polarisation initiale fortement relaxée pendant le temps de vie**



1. Problématique

2. Approche

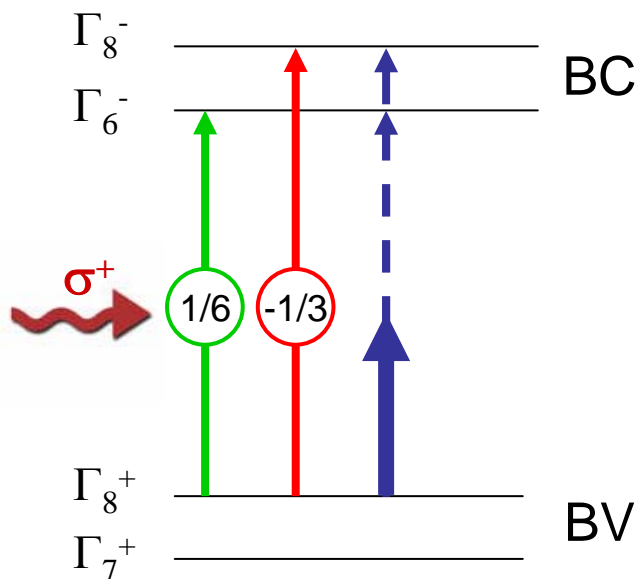
3. Photoluminescence polarisée

4. Photo-émission polarisée

5. Conclusions et perspectives

Choix des conditions expérimentales : P_i

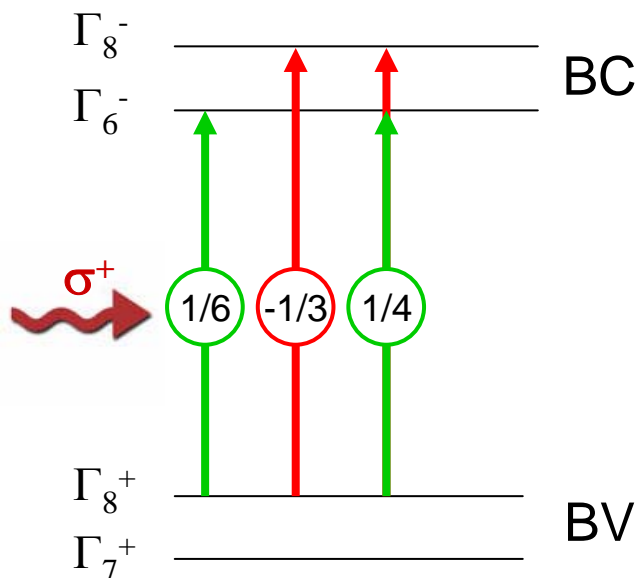
$$P_{\text{elec}} = P_i \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$



Choix des conditions expérimentales : P_i

$$P_{\text{elec}} = P_i \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

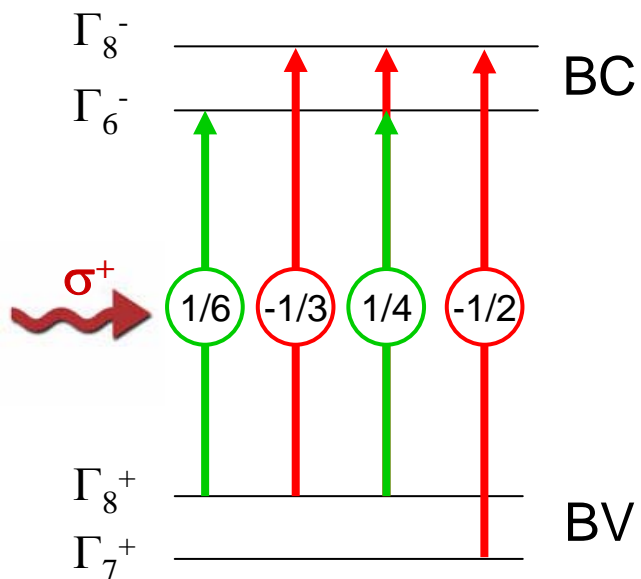
$P_i = 25\%$: grandeur intrinsèque



Choix des conditions expérimentales : P_i

$$P_{\text{elec}} = P_i \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

$P_i = 25\%$: grandeur intrinsèque



Choix des conditions expérimentales : T_1

$$P_{\text{elec}} = P_i \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

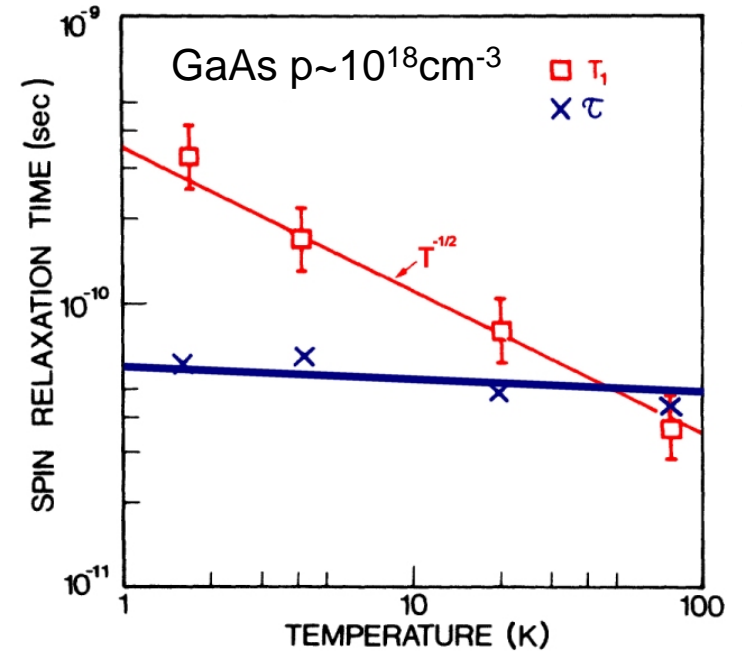
$P_i = 25\%$: grandeur intrinsèque

A basse température :

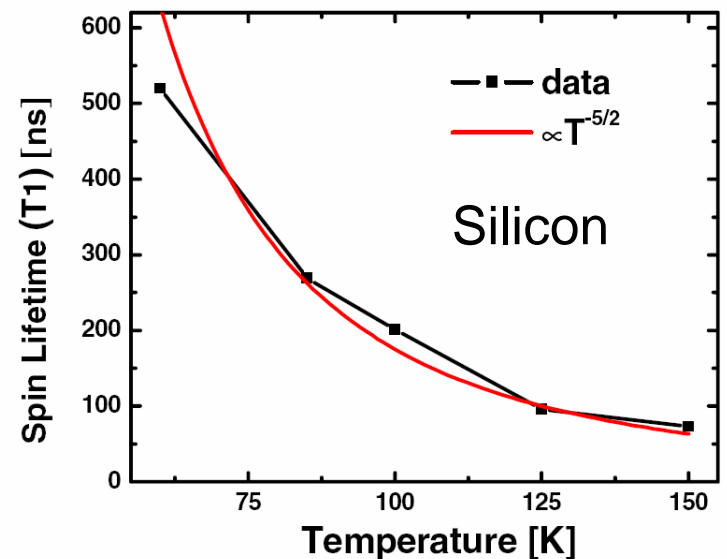
T_1 : temps de relaxation de spin 

τ : temps de vie peu influencé

Choix de la température



Fishman : Phys. Rev. B, 16, 820 (1977)



Appelbaum : Phys. Rev. Lett. 99, 177209 (2007)

Choix des conditions expérimentales : τ

$$P_{\text{elec}} = P_i \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

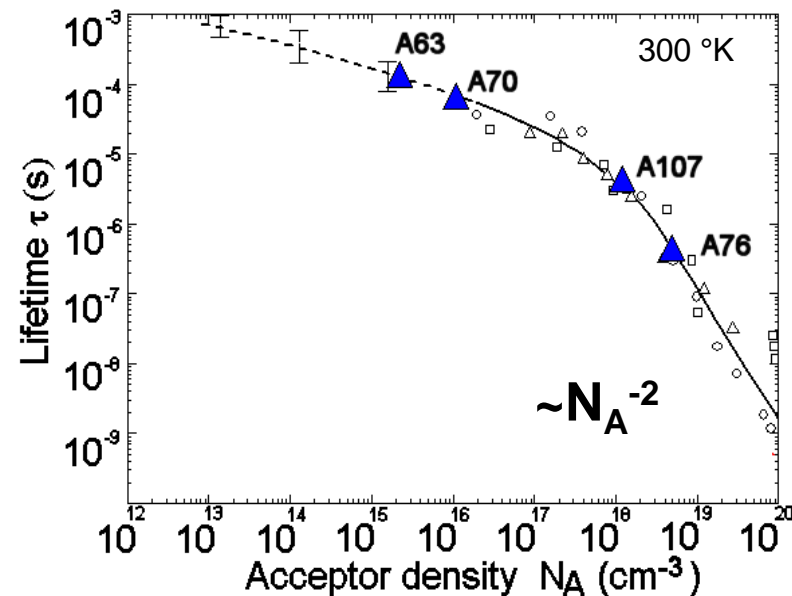
$P_i = 25\%$: grandeur intrinsèque

A fort dopage :

T_1 : temps relaxation de spin $\sim N_A^{-1}$ 

τ : temps de vie $\sim N_A^{-2}$ 

Choix du dopage



Tyagi : Sol. St. Elec. 26, 577 (1983)

Influence sur T_1 ?

➤ Sur type n :

T_1 diminue avec N_D

➤ Sur type p :

Aucune donnée à ce jour.

Hypothèse : $T_1 \sim N_A^{-1}$ à basse T

Conditions expérimentales

Fort dopage+basse température :

➤ $\frac{T_1}{\tau} \propto N_A$ favorable

➤ pour le pompage optique

➤ pour la photo-émission en **Affinité Electronique Négative**

Photoluminescence :

$$P_{\text{lum}} = P_i^2 \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

Photo-émission :

$$P_{\text{elec}} = P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau_{\text{ech}}}} \approx P_i$$

Plan

1. Problématique

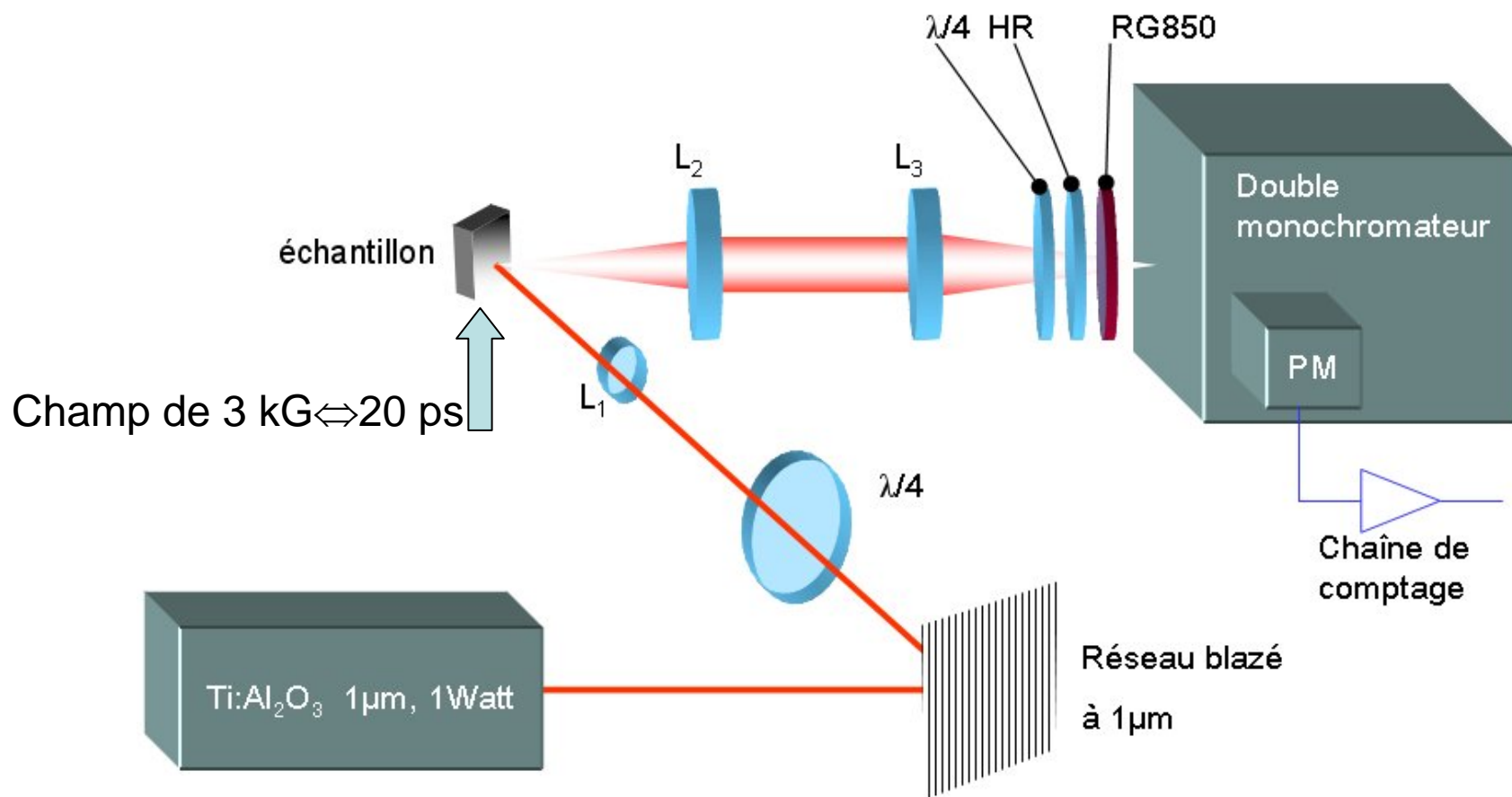
2. Approche

3. Photoluminescence polarisée

4. Photo-émission polarisée

5. Conclusions et perspectives

Photoluminescence polarisée



$$P_{\text{lum}} = P_i^2 \frac{T_1}{T_1 + \tau}$$

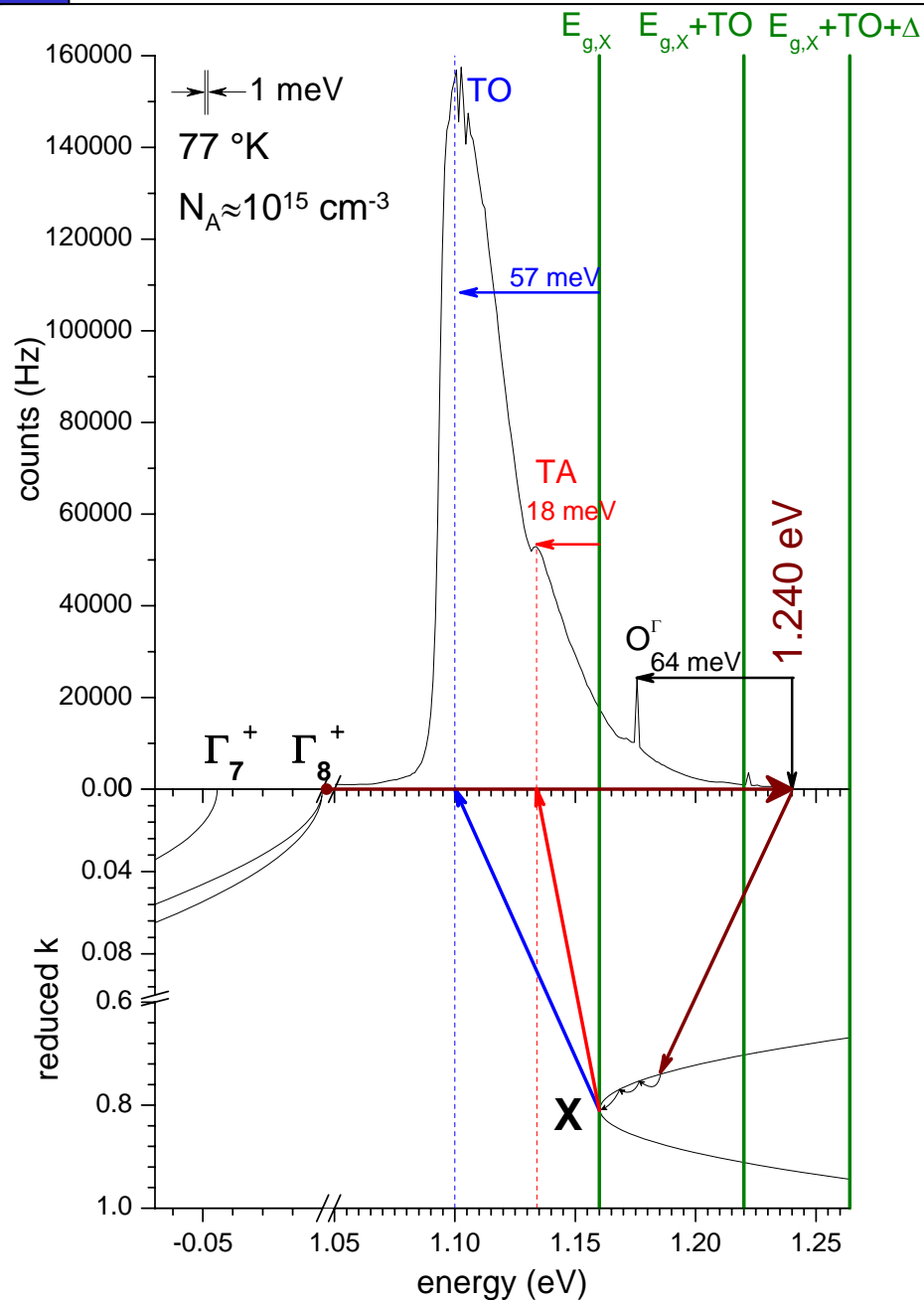
$$P_i^2 = 6.25 \%$$

$$T_1 \approx 10 \text{ ns et } \tau \approx 500 \text{ ns}$$



$$P_{\text{lum}} \approx 0.1 \%$$

Photoluminescence

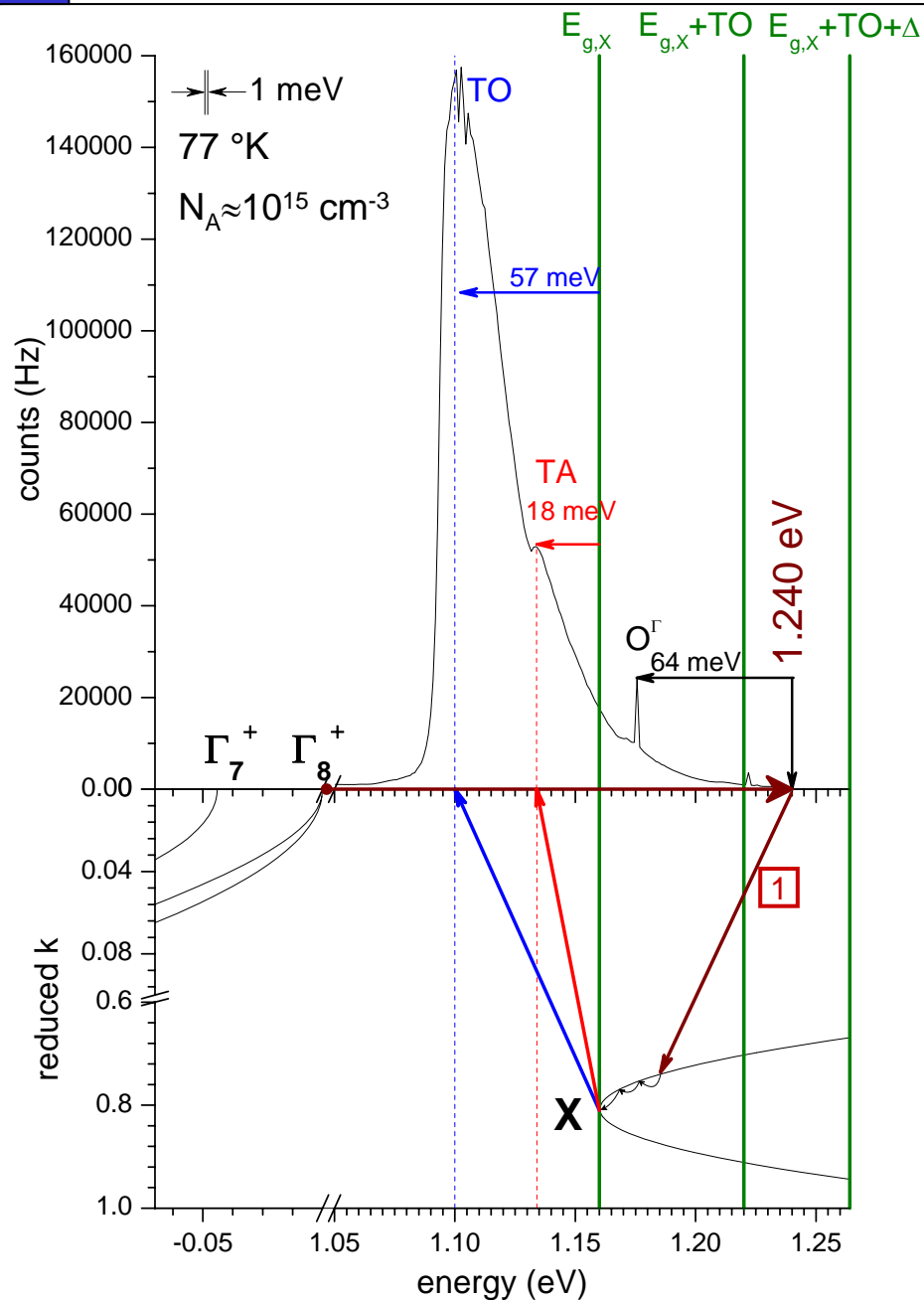


TO : 57 meV

TA : 18 meV

 O_Γ : 64 meV

Photoluminescence



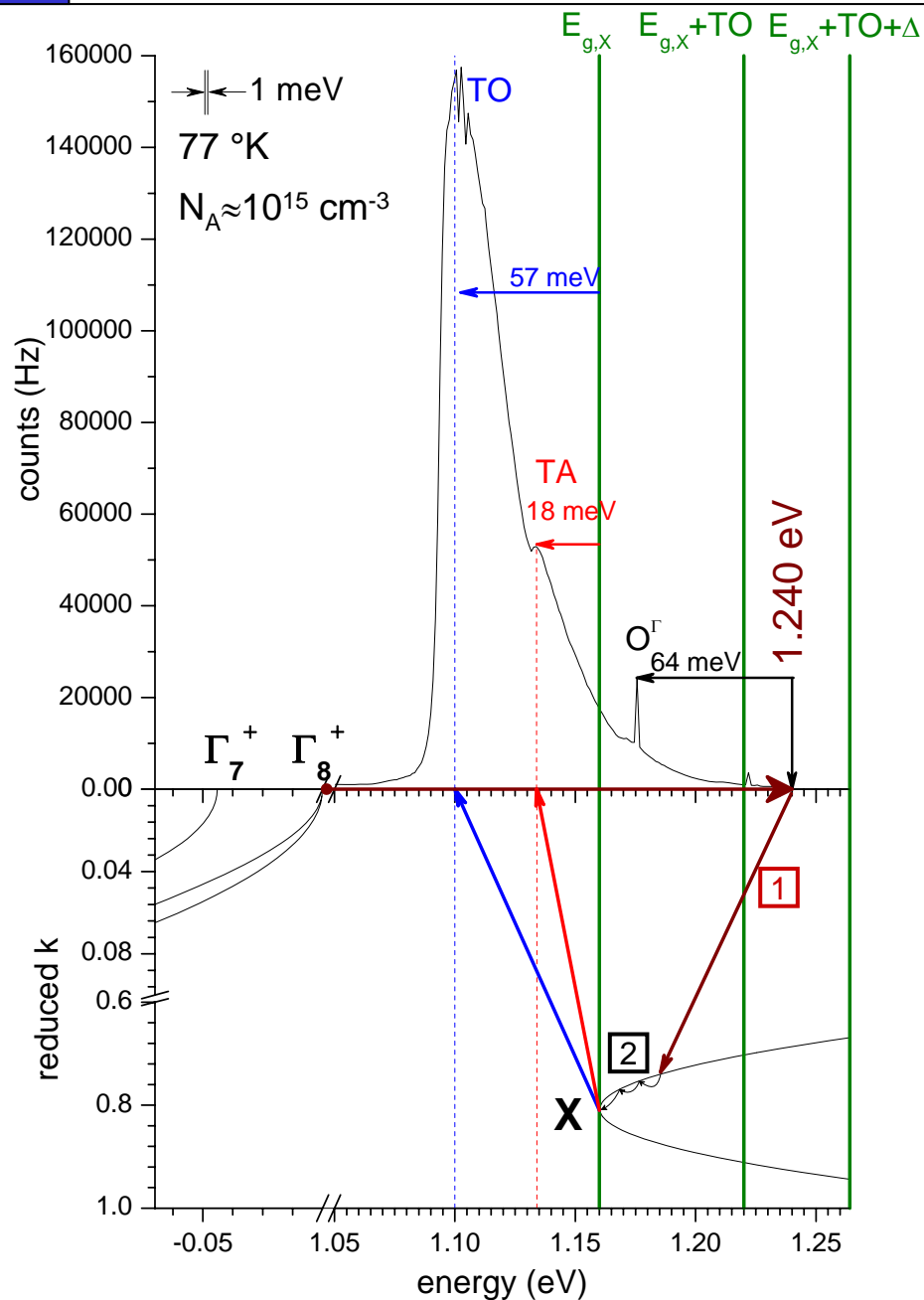
1 Absorption indirecte

TO : 57 meV

TA : 18 meV

O $_{\Gamma}$: 64 meV

Photolumuminescence



1 Absorption indirecte

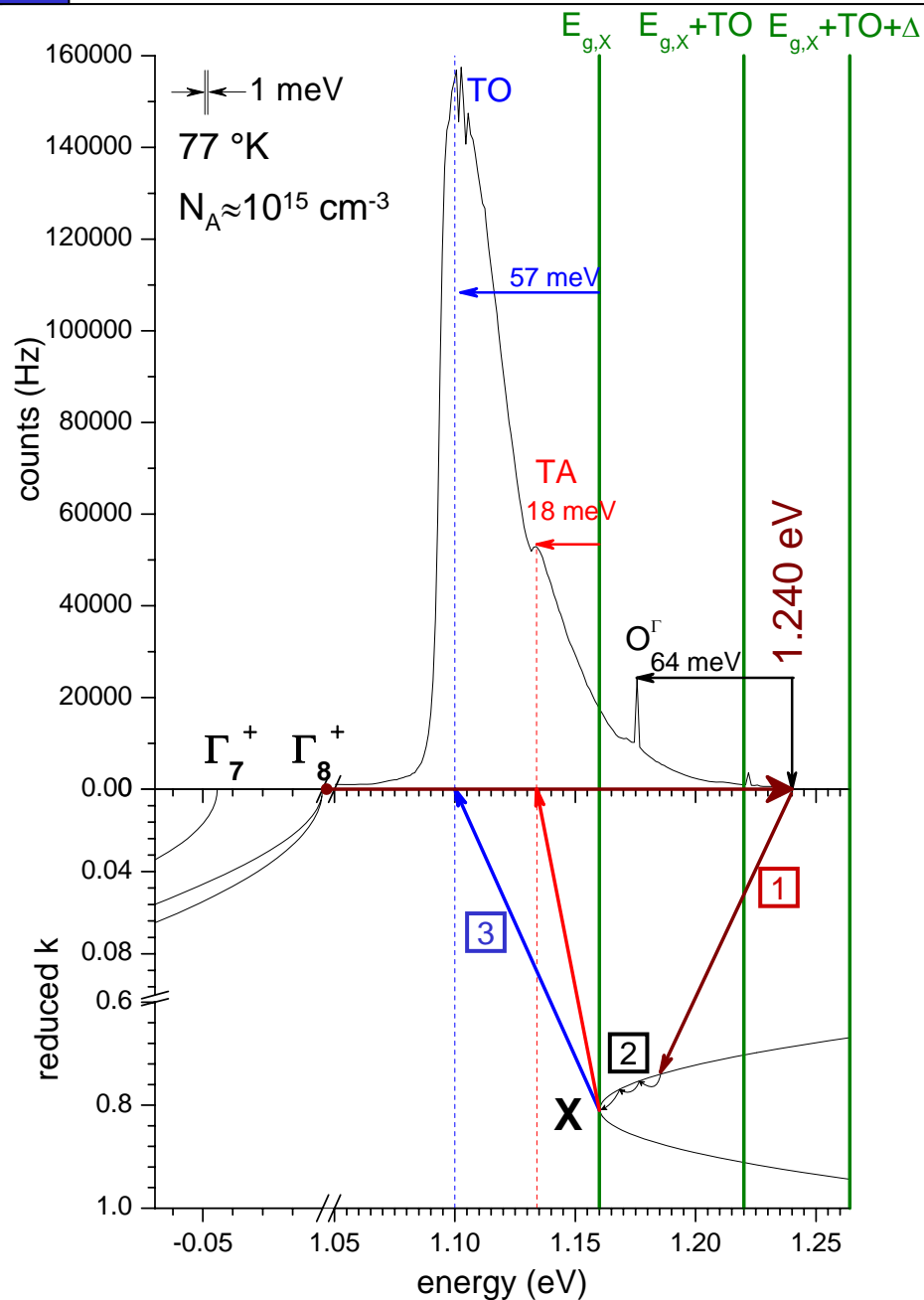
2 Thermalisation

TO : 57 meV

TA : 18 meV

O_Γ : 64 meV

Photolumuminescence



1 Absorption indirecte

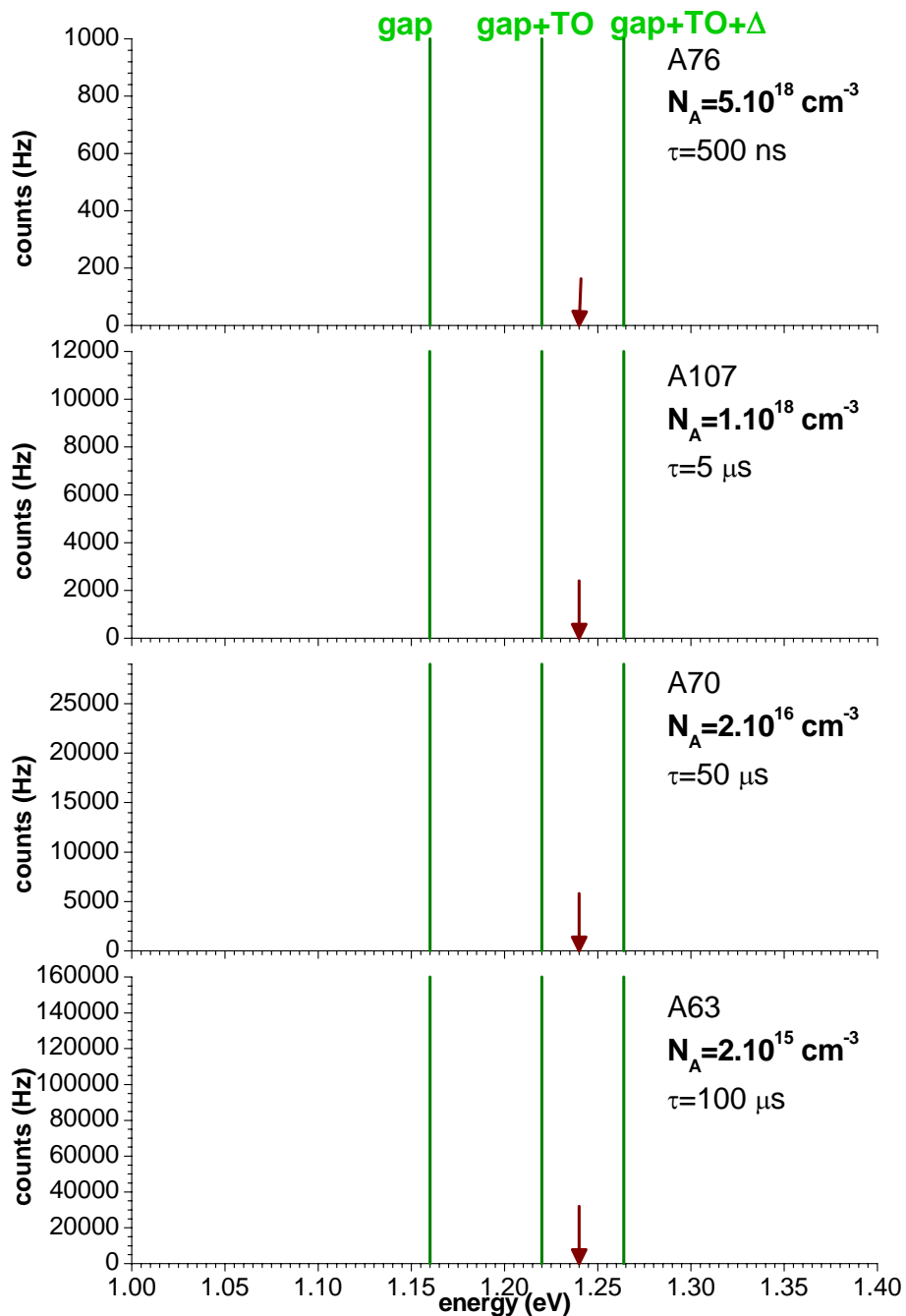
2 Thermalisation

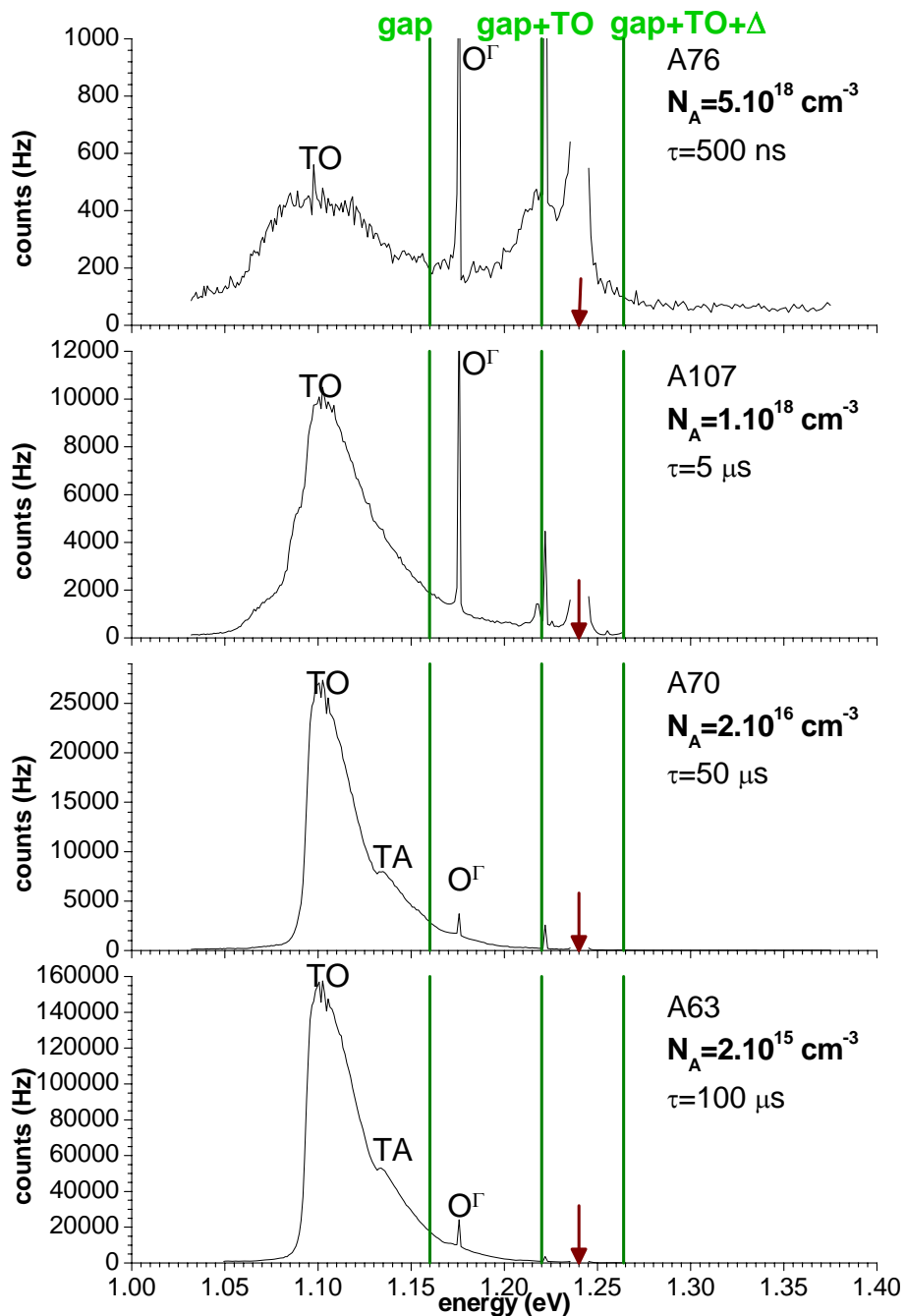
3 Recombinaison

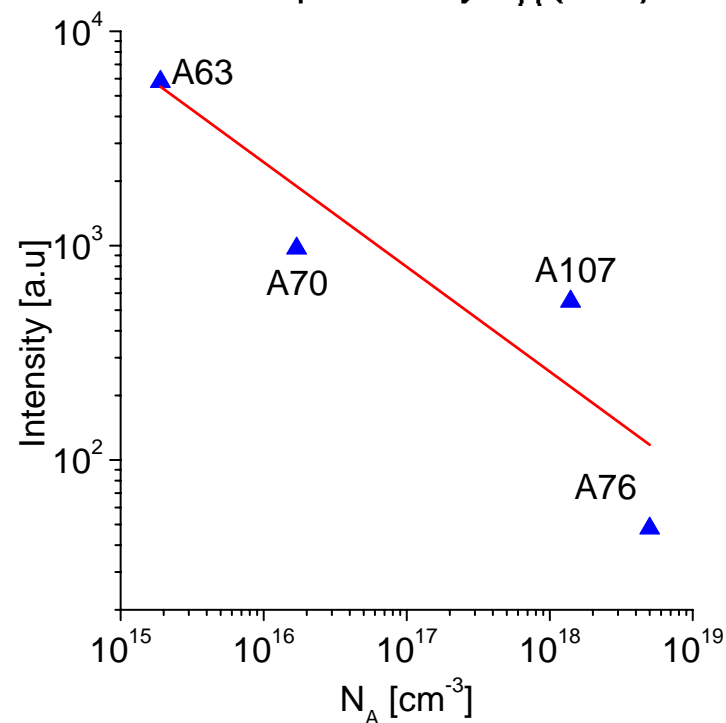
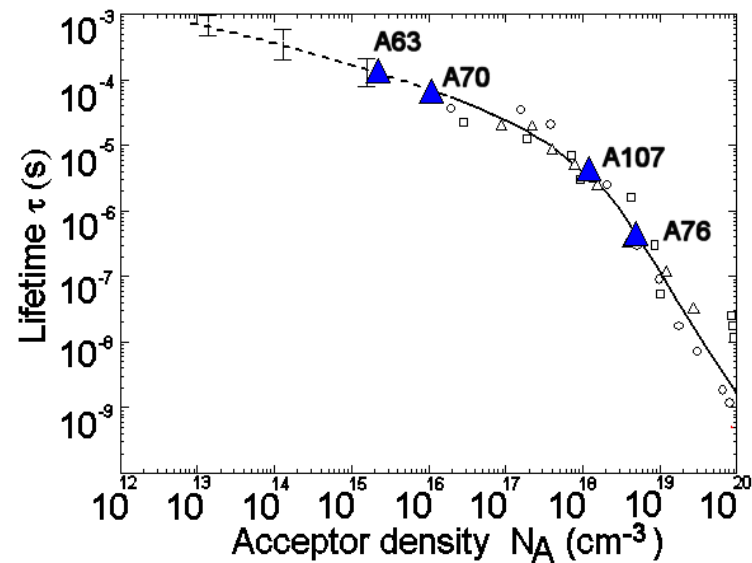
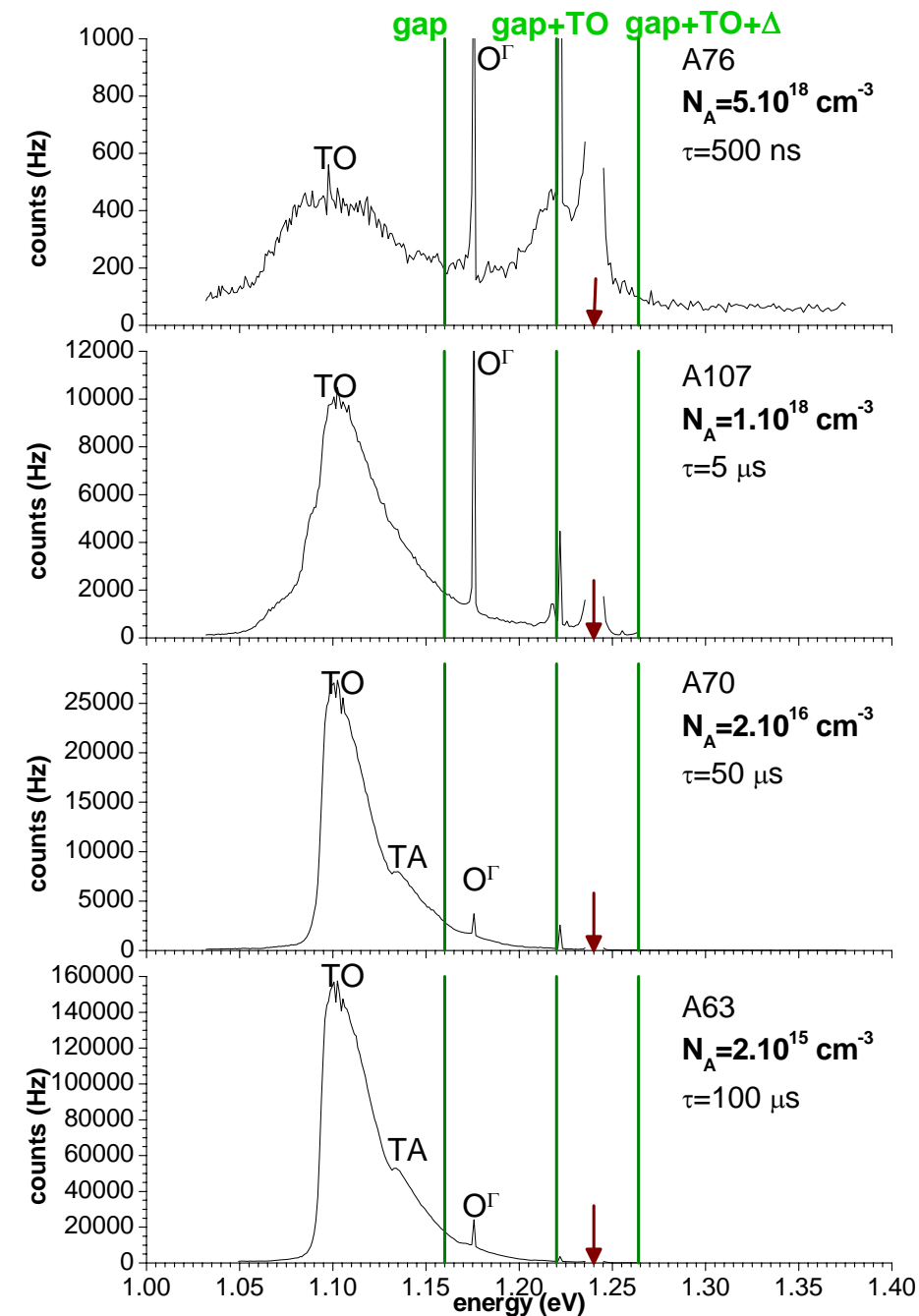
TO : 57 meV

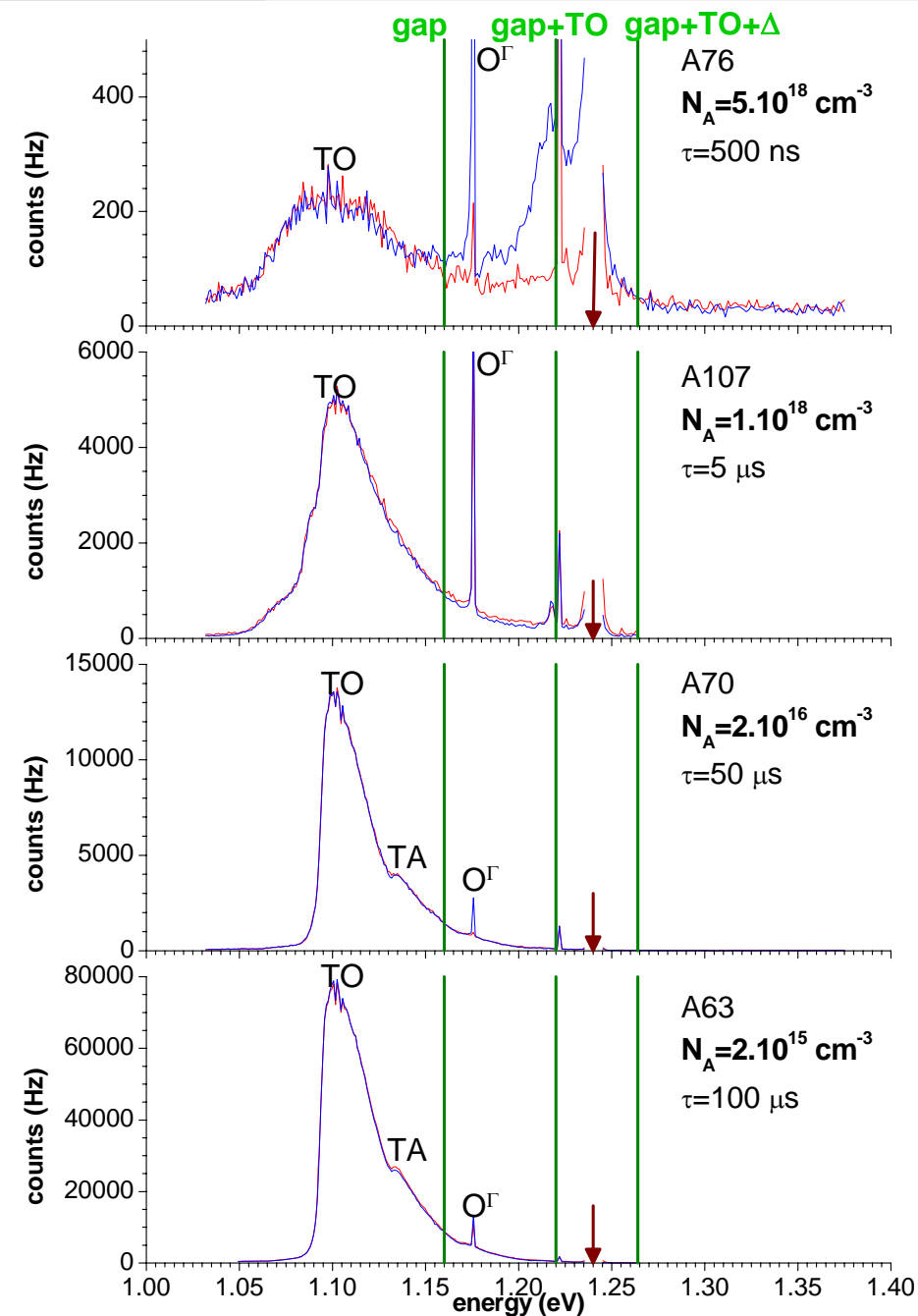
TA : 18 meV

O_Γ : 64 meV

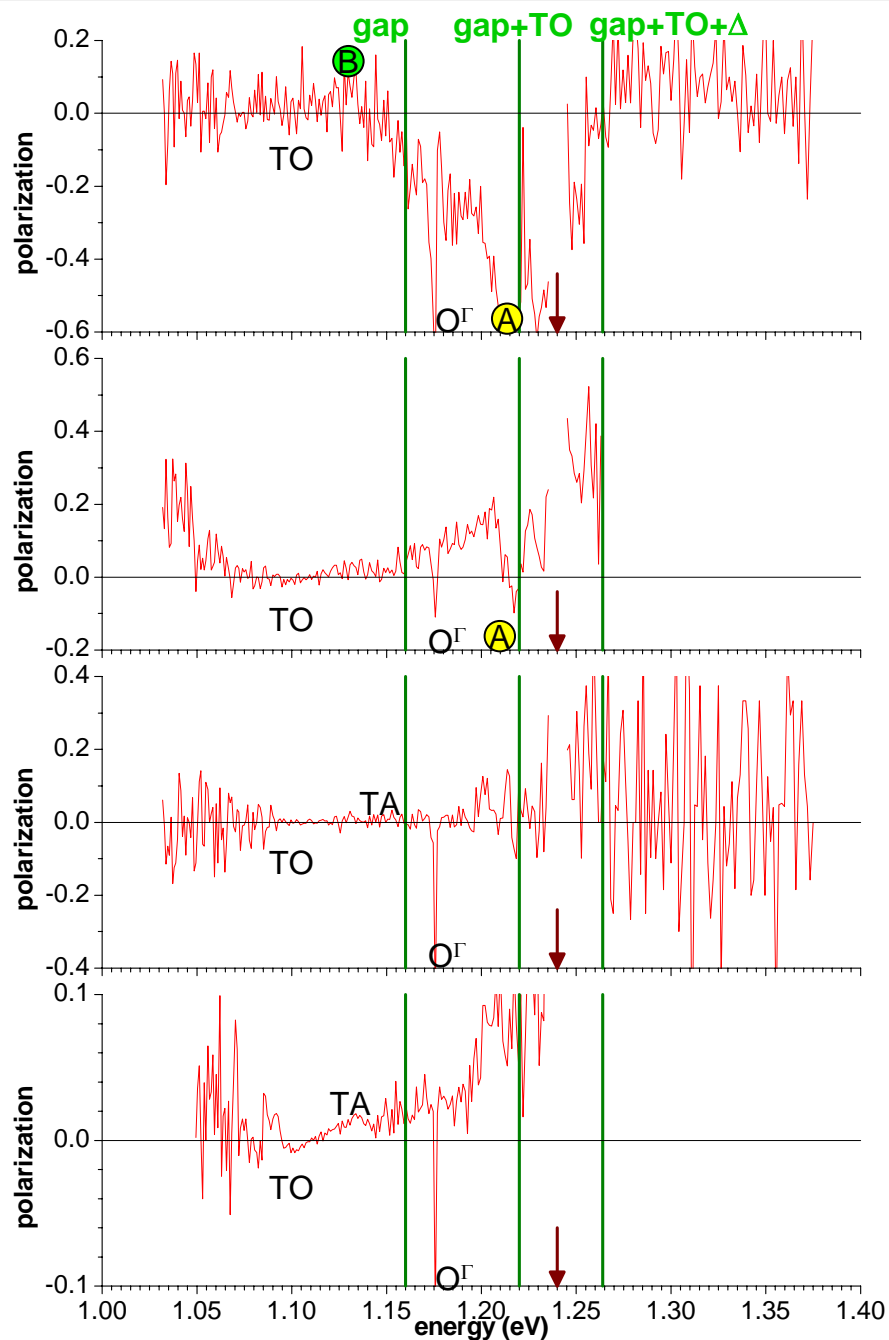
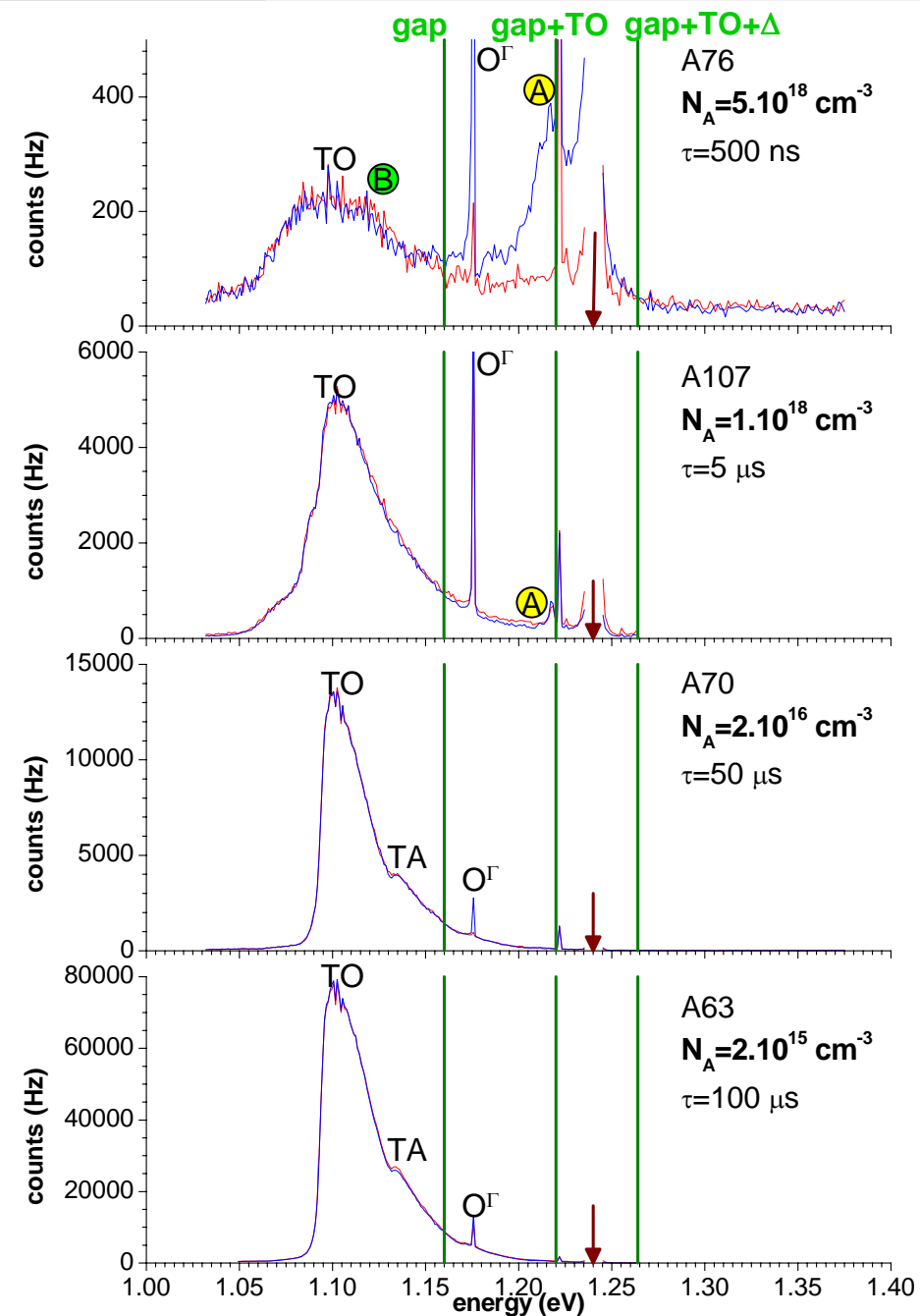


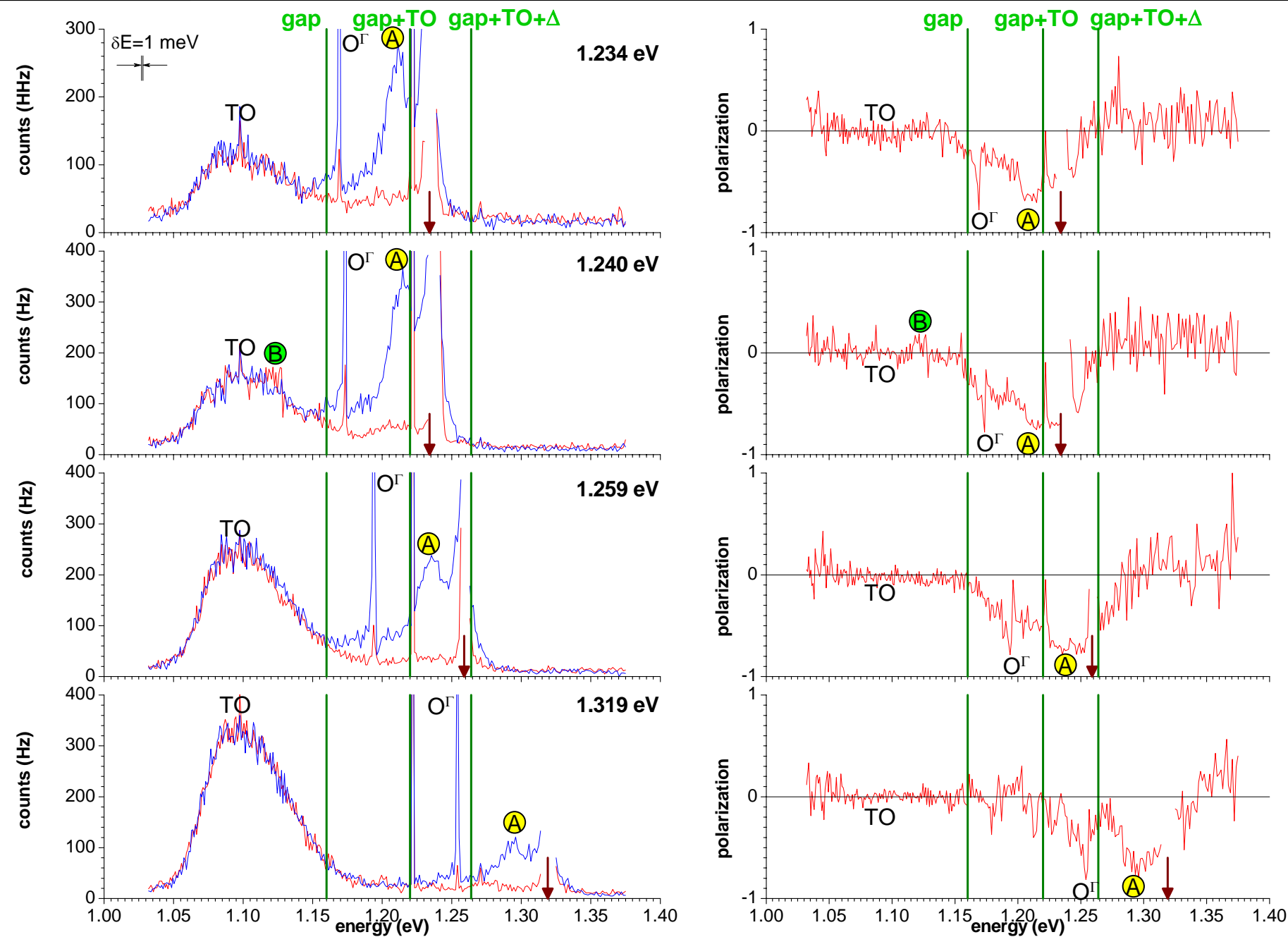






$$P_{\text{lum}} = \frac{I^+ - I^-}{I^+ + I^-}$$



77 °K, $N_A=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($\tau=500 \text{ ns}$), $\sigma+$ 

Dépolarisation en champ transverse

➤ Effet Hanle

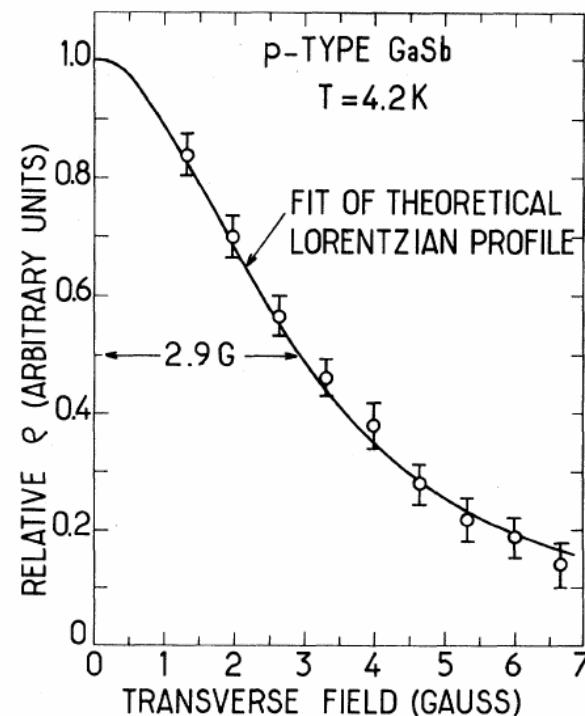
Champ magnétique transverse :

$$P_{\text{lum}}(B) = \frac{P_{\text{lum}}(B=0)}{1 + \left(\frac{B}{\Delta B}\right)^2}$$

Dans notre étude sur Si :
aucun effet sur les structures polarisées
jusqu'à $B=3$ kG

➤ Limite sur $T_1 < 20$ ps ?!

$$\Delta B = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{\tau} \right)$$



Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

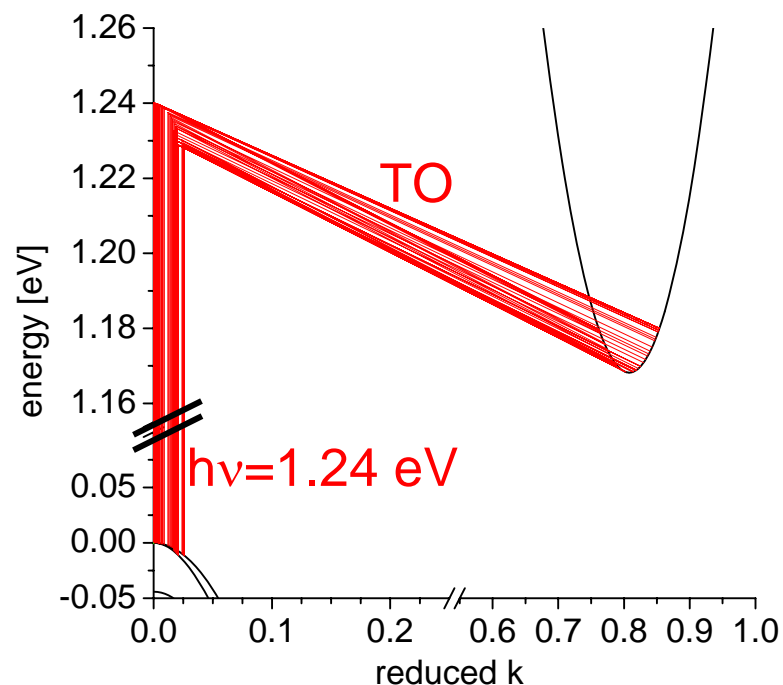
Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

On se trompe sur la polarisation initiale P_i des **transitions indirectes** ?



Conclusions sur la photoluminescence

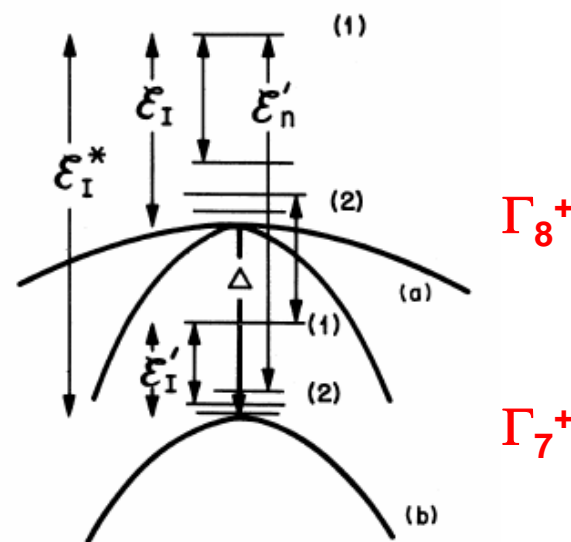
- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

On se trompe sur la polarisation initiale P_i des **transitions indirectes** ?

La recombinaison n'est pas polarisée ?



Zwerdling : Phys. Rev. Lett. **4**, 175 (1960)

Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

On se trompe sur la polarisation initiale
 P_i des **transitions indirectes** ?

La recombinaison n'est pas polarisée ?

Régime des fortes puissances ?

Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

En photoémission :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose



Temps de séjour

On se trompe sur la polarisation initiale
 P_i des **transitions indirectes** ?

La recombinaison n'est pas polarisée ?

Régime des fortes puissances ?

Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

On se trompe sur la polarisation initiale P_i des **transitions indirectes** ?

La recombinaison n'est pas polarisée ?

Régime des fortes puissances ?

En photoémission :



Temps de séjour



Plus sensible à P_i :

$$\begin{cases} P_{\text{lum}} = P_i^2 \frac{T_1}{T_1 + \tau} \\ P_{\text{elec}} = P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau_{\text{ech}}}} \end{cases}$$

Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

On se trompe sur la polarisation initiale P_i des **transitions indirectes** ?

La recombinaison n'est pas polarisée ?

Régime des fortes puissances ?

En photoémission :



Temps de séjour



Plus sensible à P_i :



Pas de recombinaison

$$\begin{cases} P_{\text{lum}} = P_i^2 \frac{T_1}{T_1 + \tau} \\ P_{\text{elec}} = P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau_{\text{ech}}}} \end{cases}$$

Conclusions sur la photoluminescence

- Etude de la photoluminescence polarisée résonante
- Pas de polarisation thermalisée quelles que soient les conditions expérimentales
- Luminescence chaude polarisée incompatible avec le PO : en valeur et en signe, bien que l'effet du dopage se manifeste très fort sur le temps de vie

Absence de polarisation liée au PO :

T_1/τ : on devrait mesurer quelque chose

On se trompe sur la polarisation initiale P_i des **transitions indirectes** ?

La recombinaison n'est pas polarisée ?

Régime des fortes puissances ?



En photoémission :

Temps de séjour

Plus sensible à P_i :

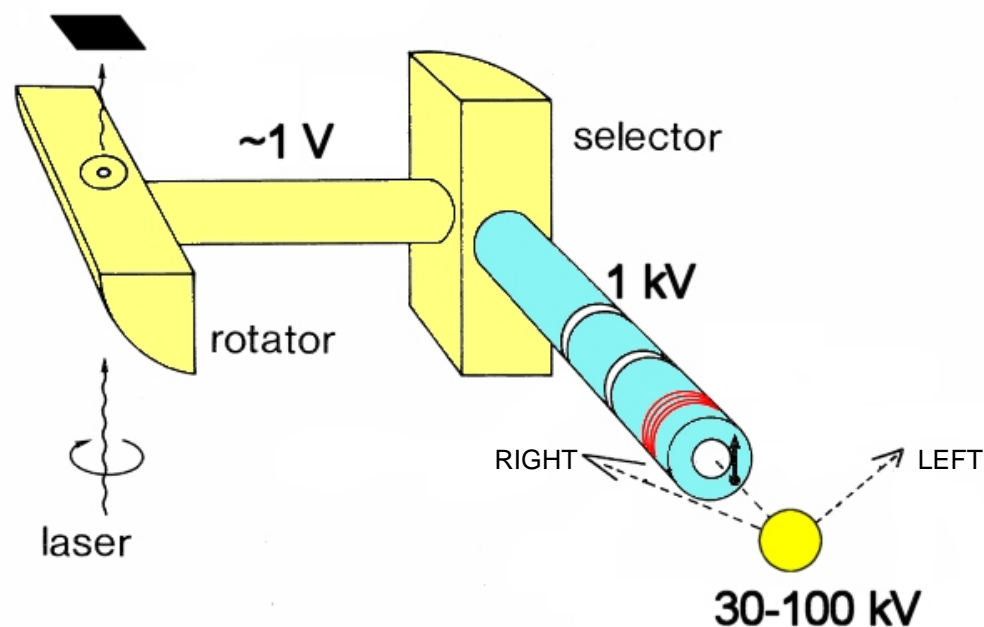
Pas de recombinaison

Pas besoin de forte puissance

$$\begin{cases} P_{\text{lum}} = P_i^2 \frac{T_1}{T_1 + \tau} \\ P_{\text{elec}} = P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau_{\text{ech}}}} \end{cases}$$

Plan

1. Problématique
2. Approche
3. Photoluminescence polarisée
4. Photo-émission polarisée
5. Conclusions et perspectives



$$P_{\text{elec}} \propto \frac{n_{\text{LEFT}} - n_{\text{RIGHT}}}{n_{\text{LEFT}} + n_{\text{RIGHT}}}$$

Analyse en énergie : sélecteur électrostatique

Analyse en spin : détecteur de Mott

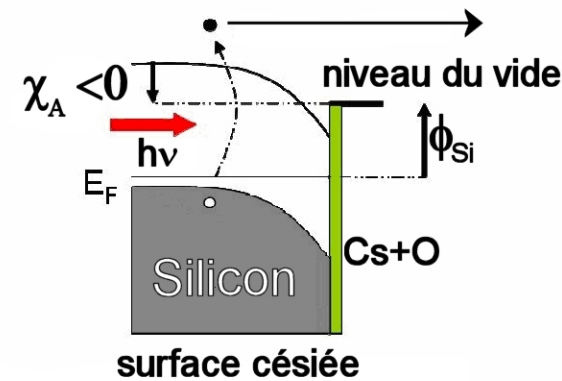
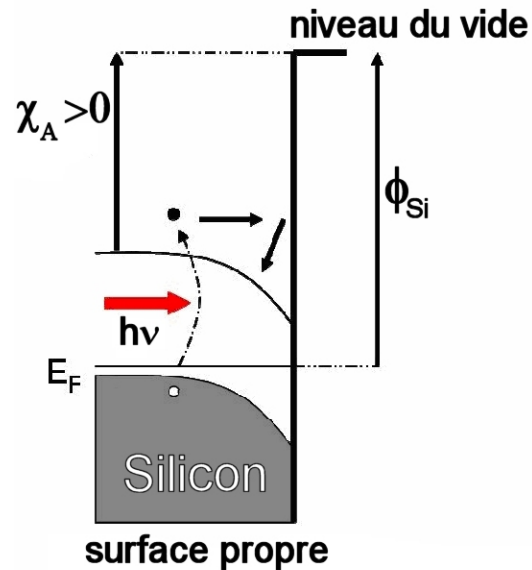
➤ Affinité Electronique Négative

Si (p) <100>

Zone de charge d'espace $\approx 100 \text{ \AA}$

Courbure de bande $\approx 400 \text{ meV}$

χ_A : affinité



➤ Grandeurs caractéristiques

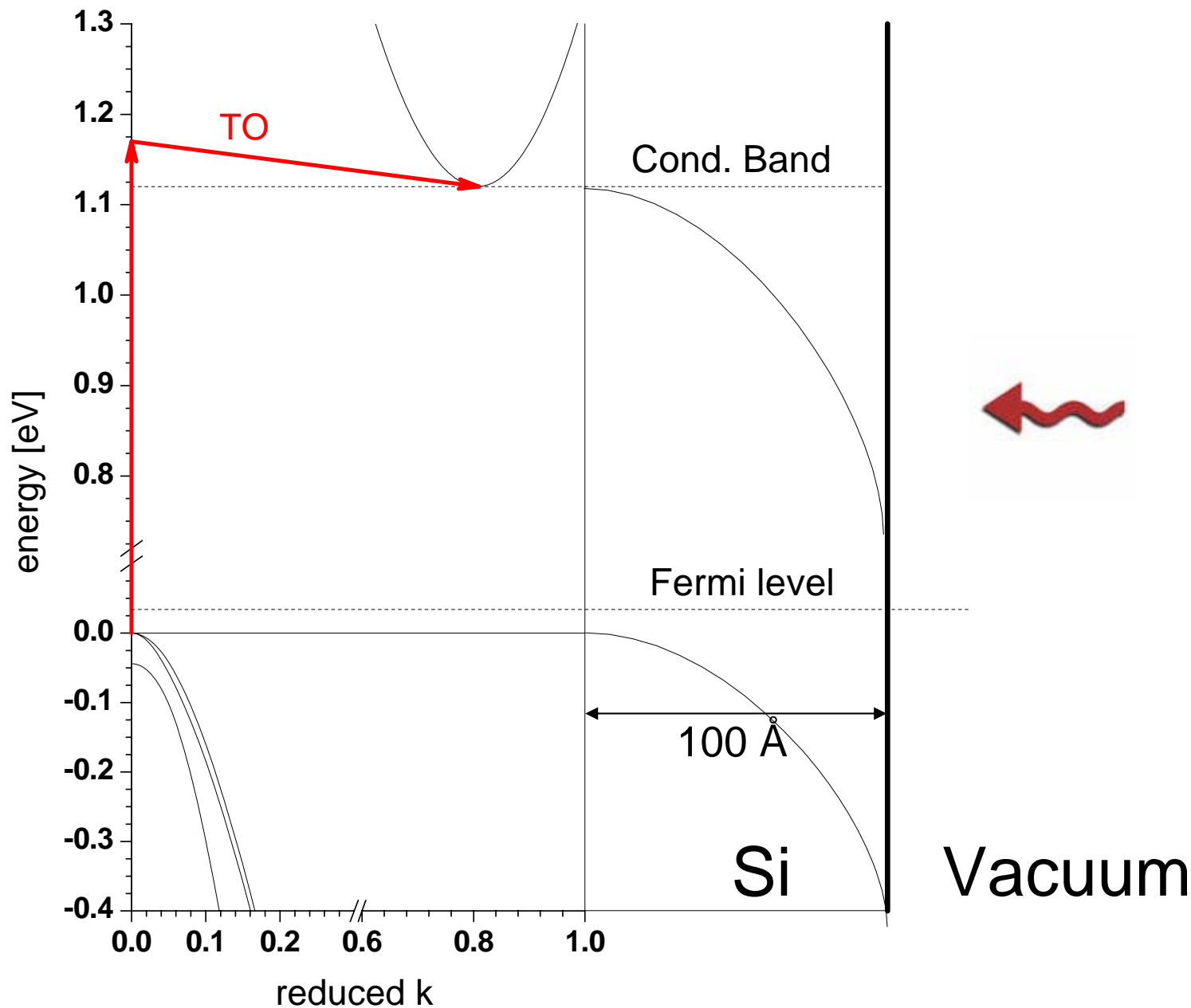
τ_e : temps d'échappement (dépend de E_k) $\ll \tau \approx 500 \text{ ns}$

T_1 : temp de relaxation de spin **10 ns**

α^{-1} : longueur d'absorption **100 μm près du gap indirect**

100 \AA près du gap direct

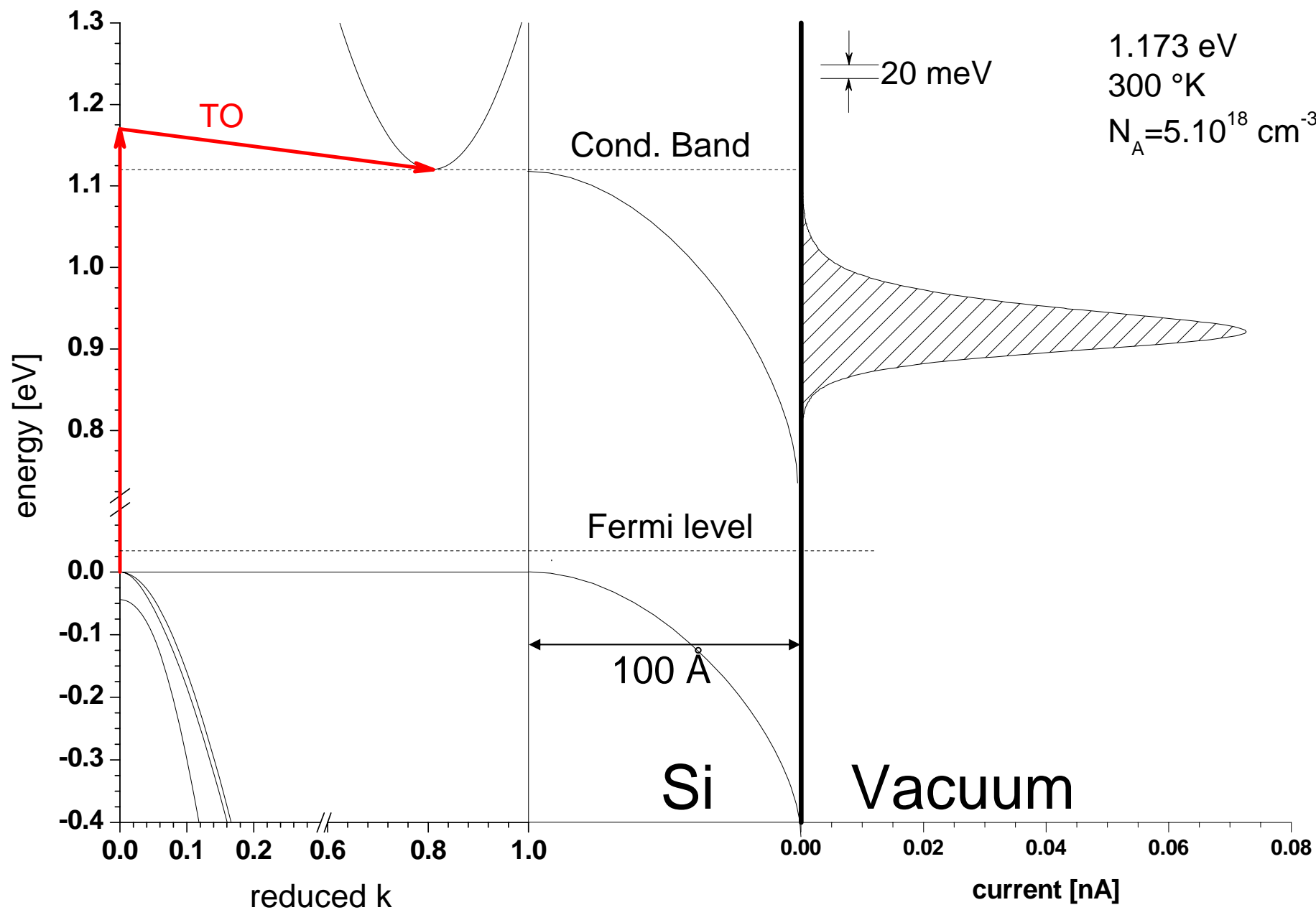
Cathode de Si en affinité négative



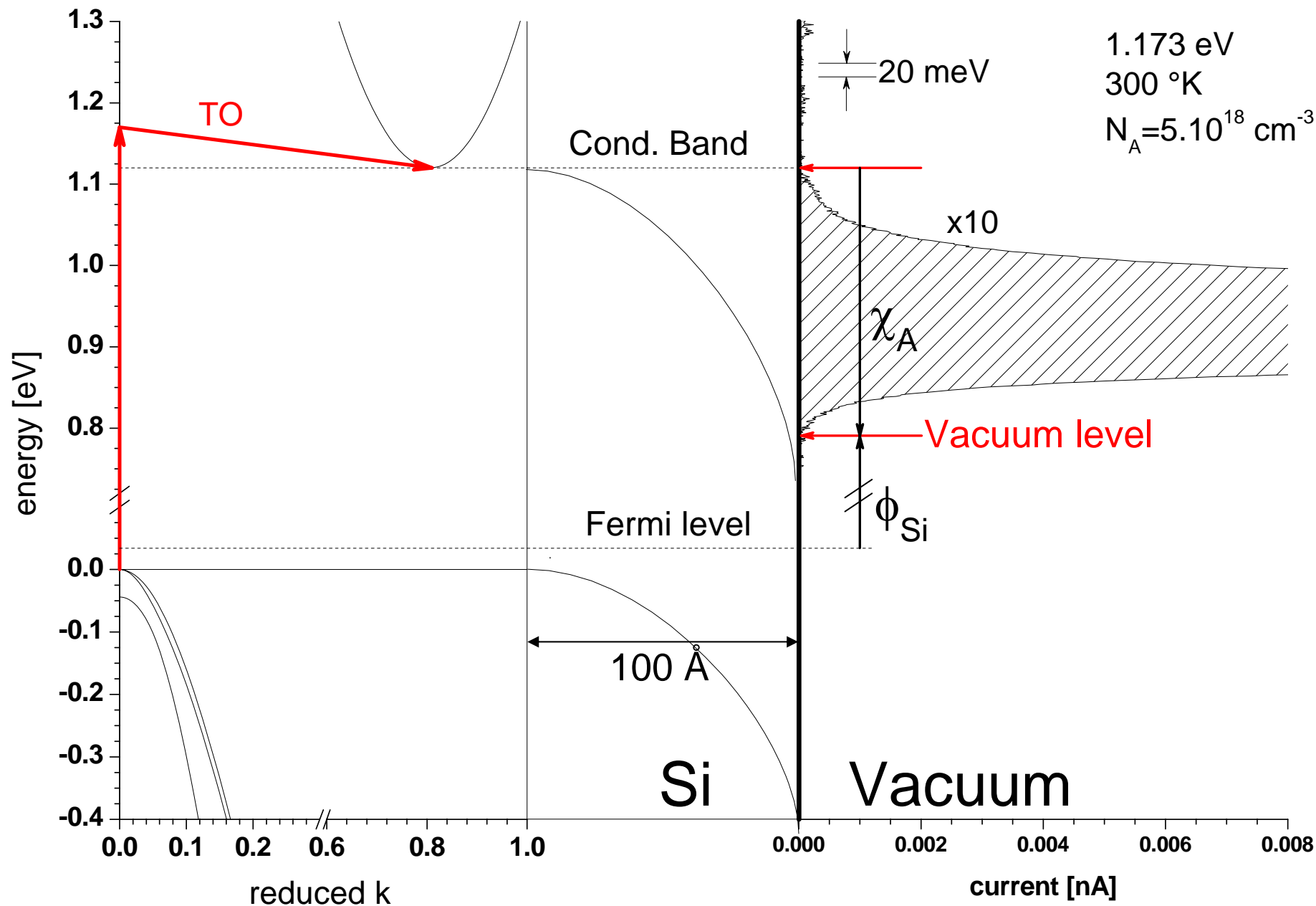
1.173 eV
 300 °K
 $N_A = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$



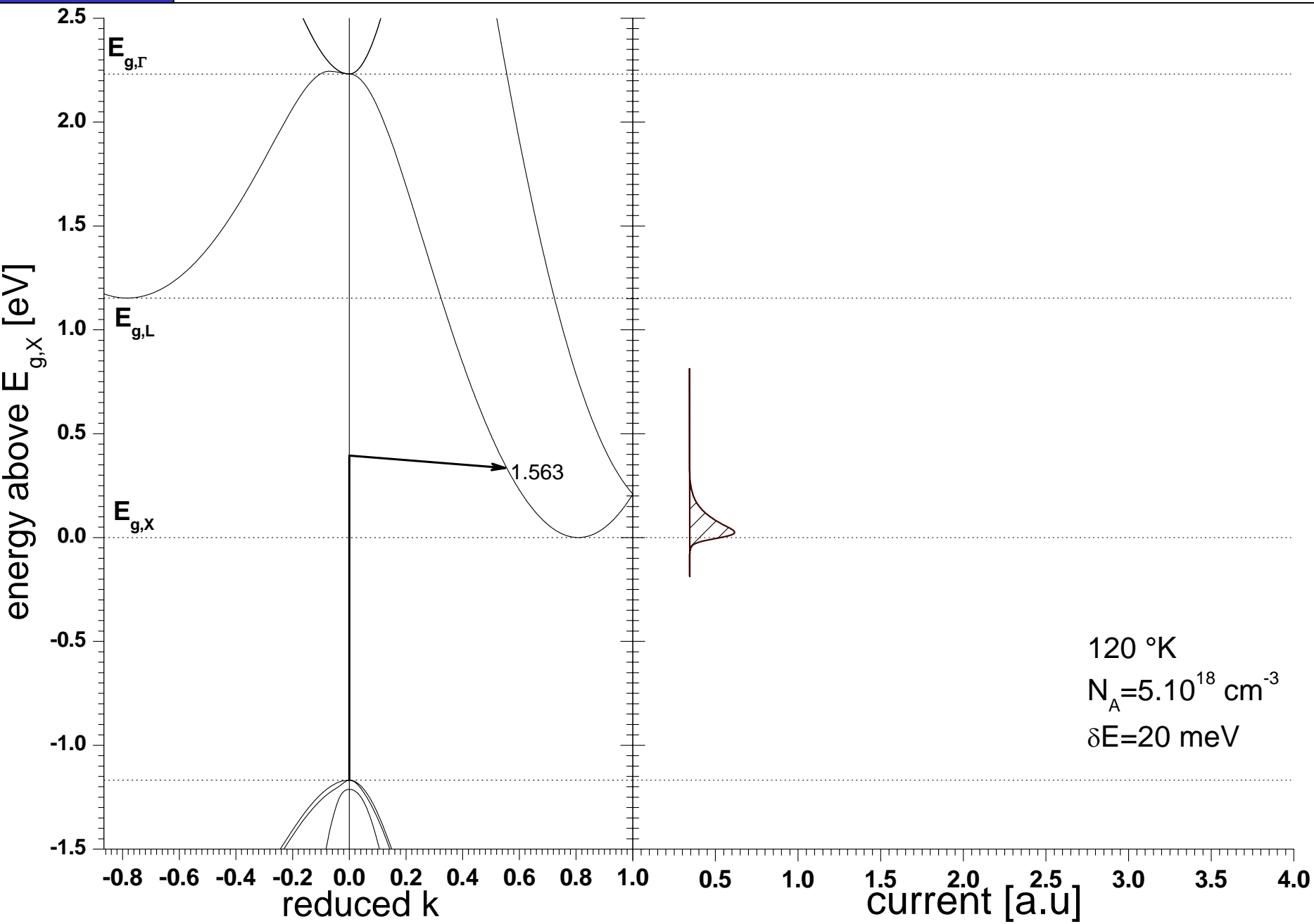
Cathode de Si en affinité négative



Cathode de Si en affinité négative



Distributions en énergie



Distributions en énergie

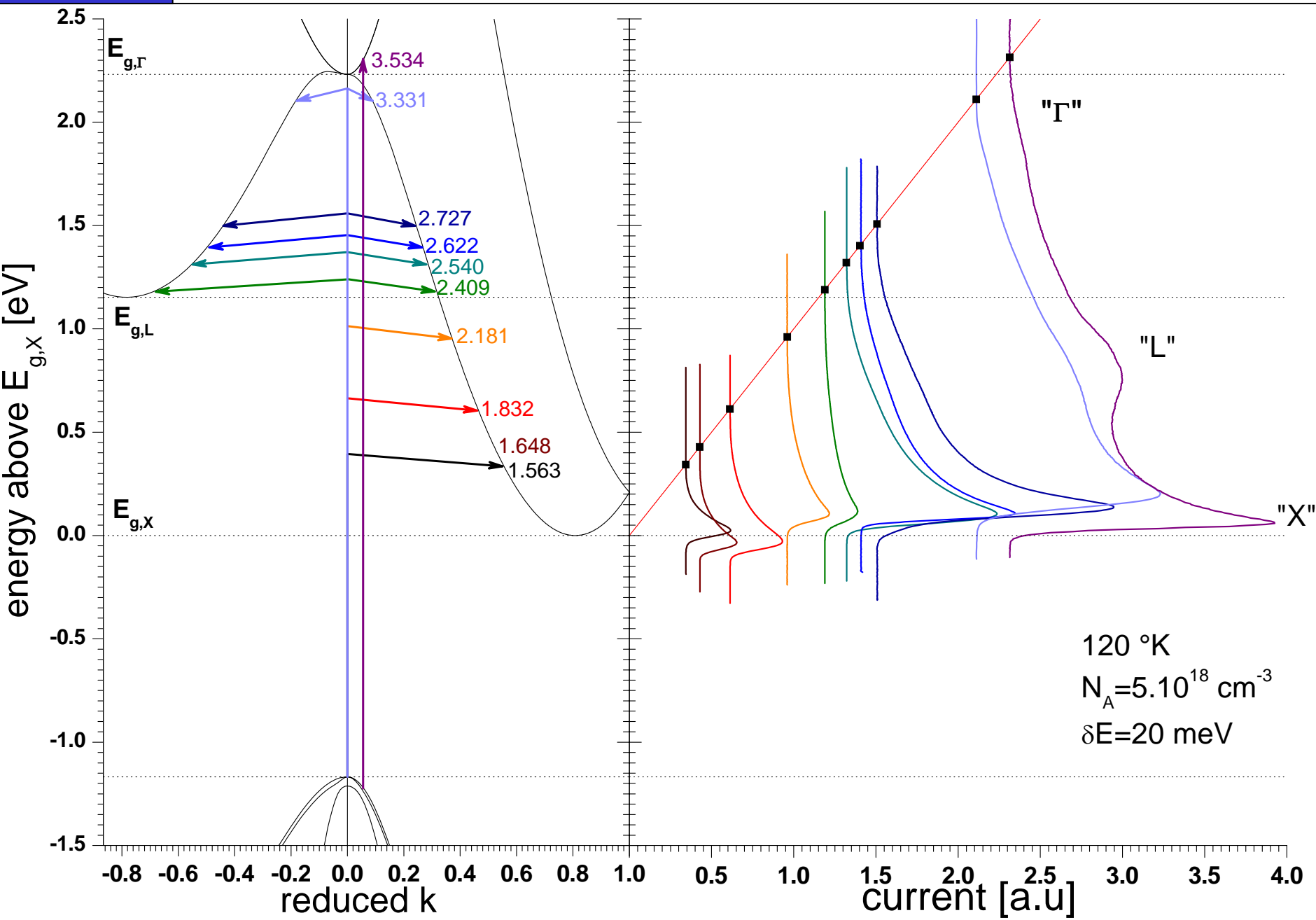
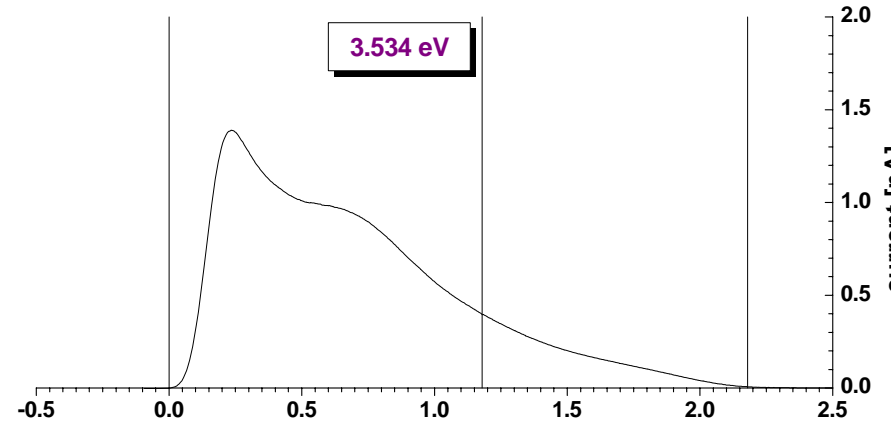
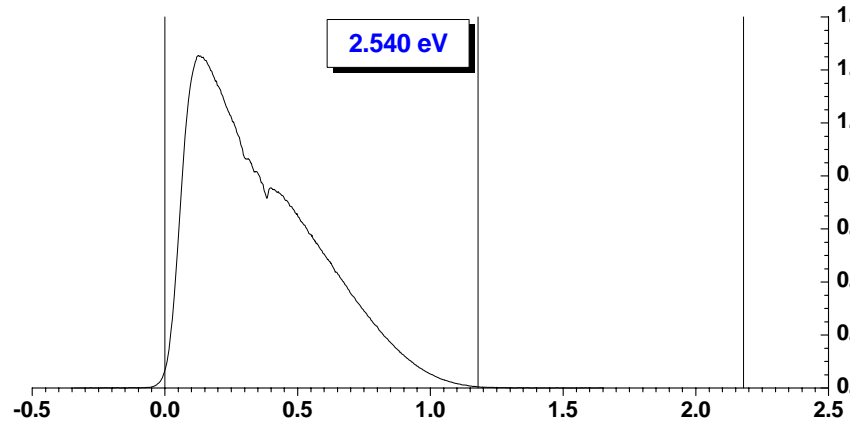
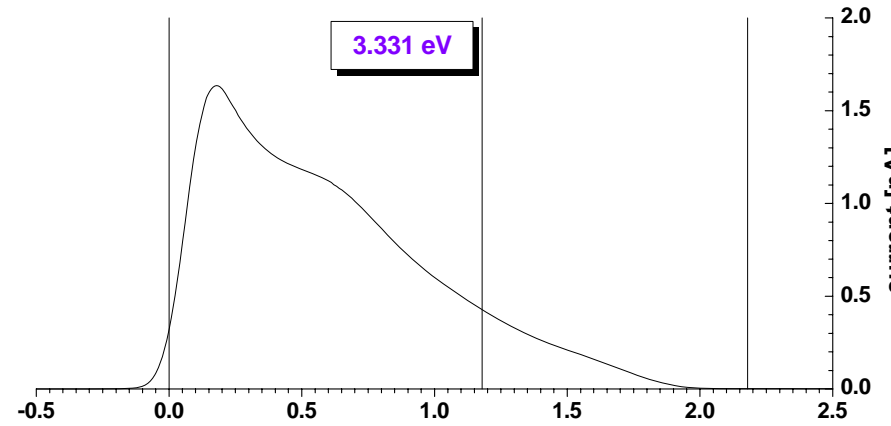
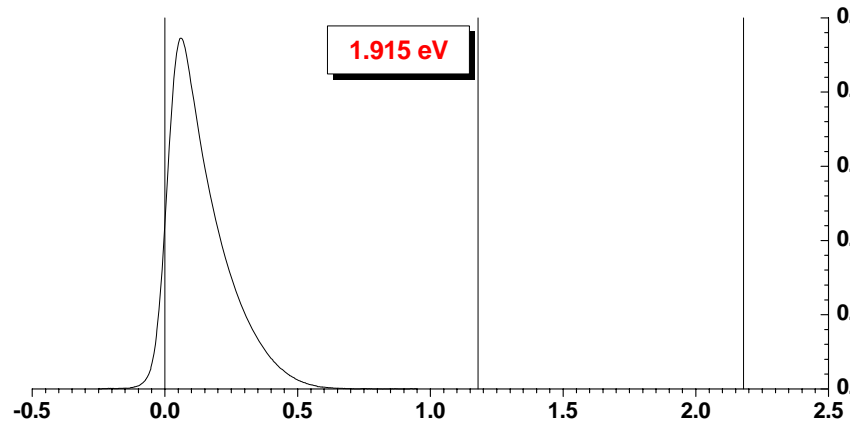
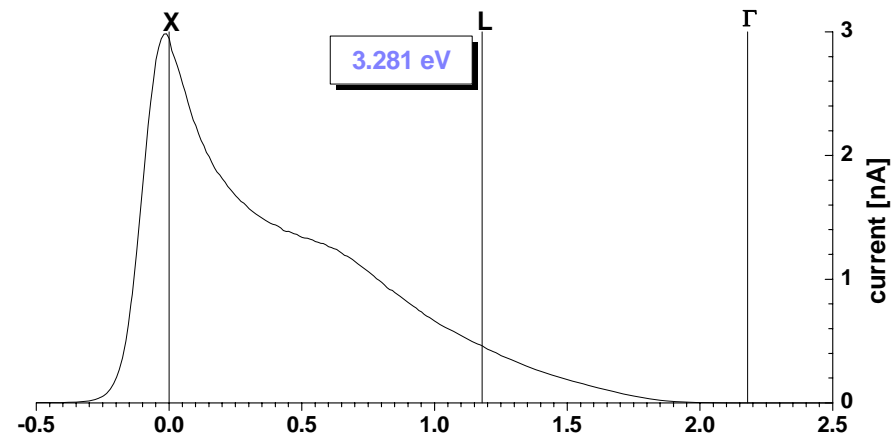
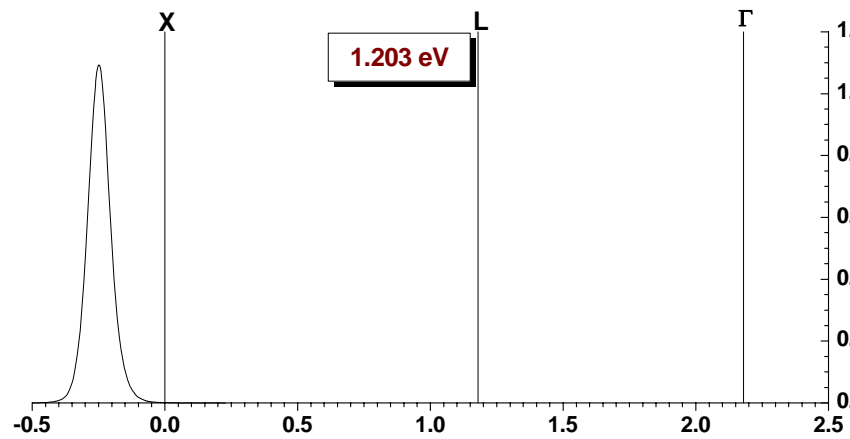


Photo-émission polarisée à 300 °K

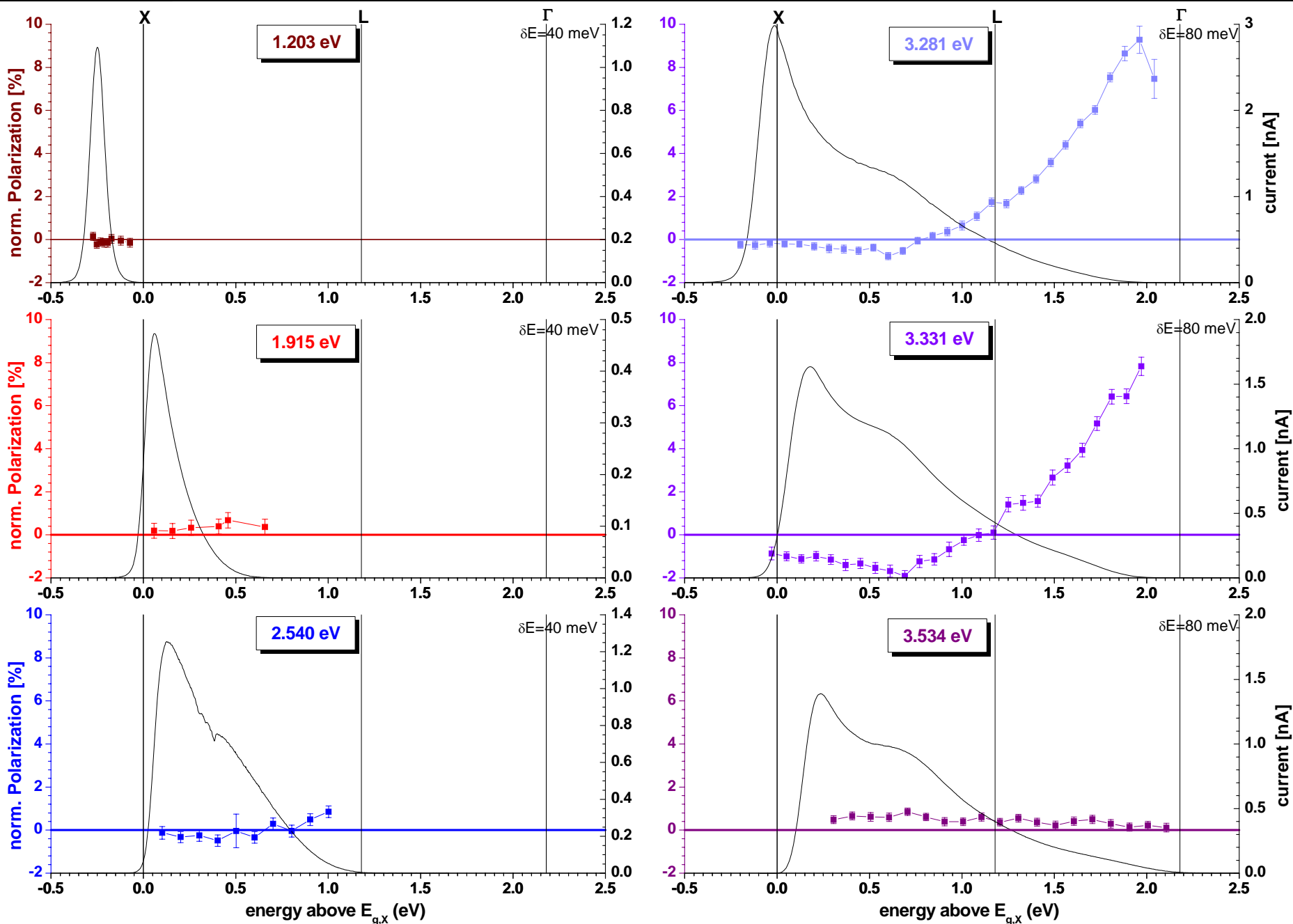
energy above $E_{q,X}$ (eV)energy above $E_{q,X}$ (eV)

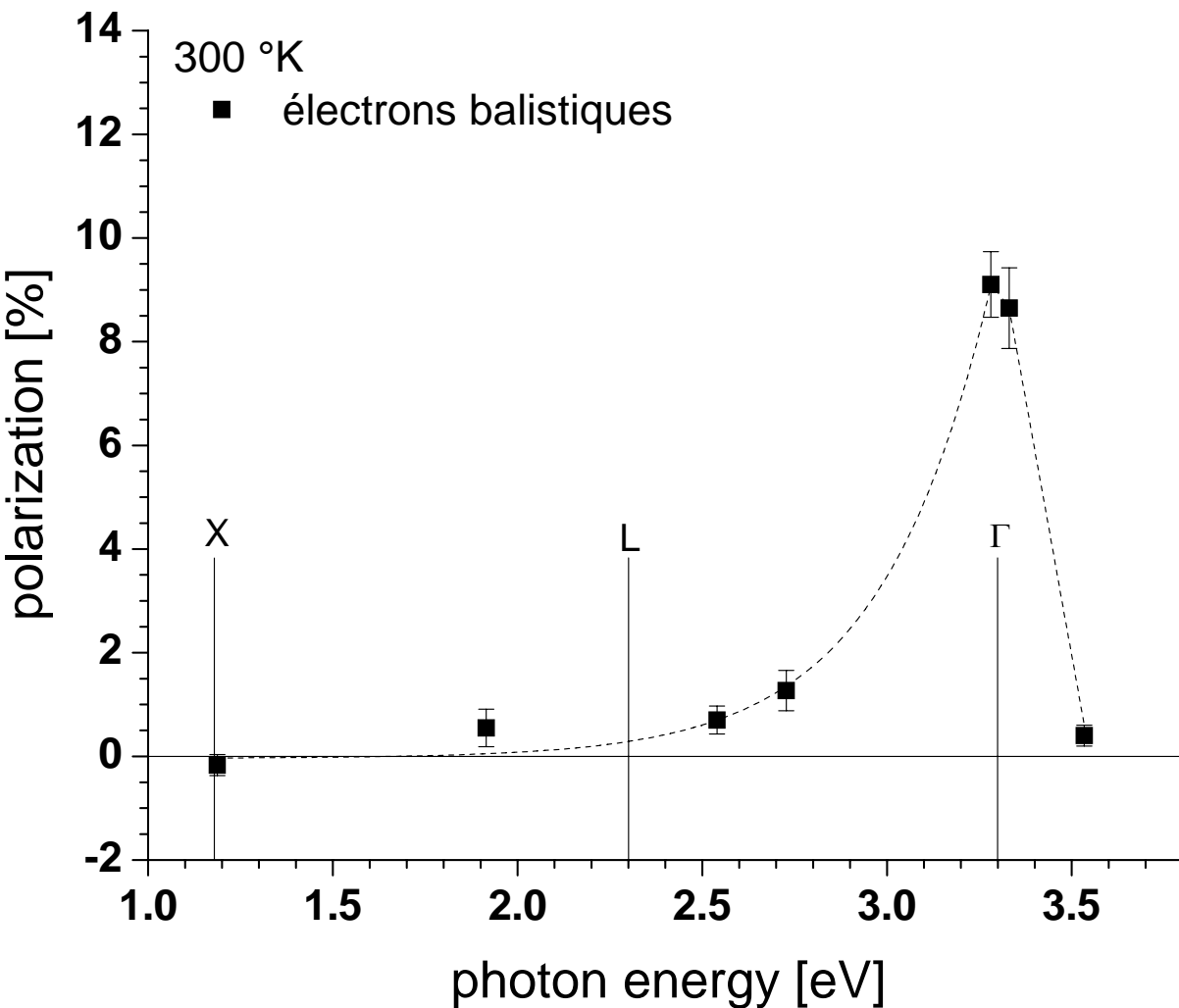
current [nA]

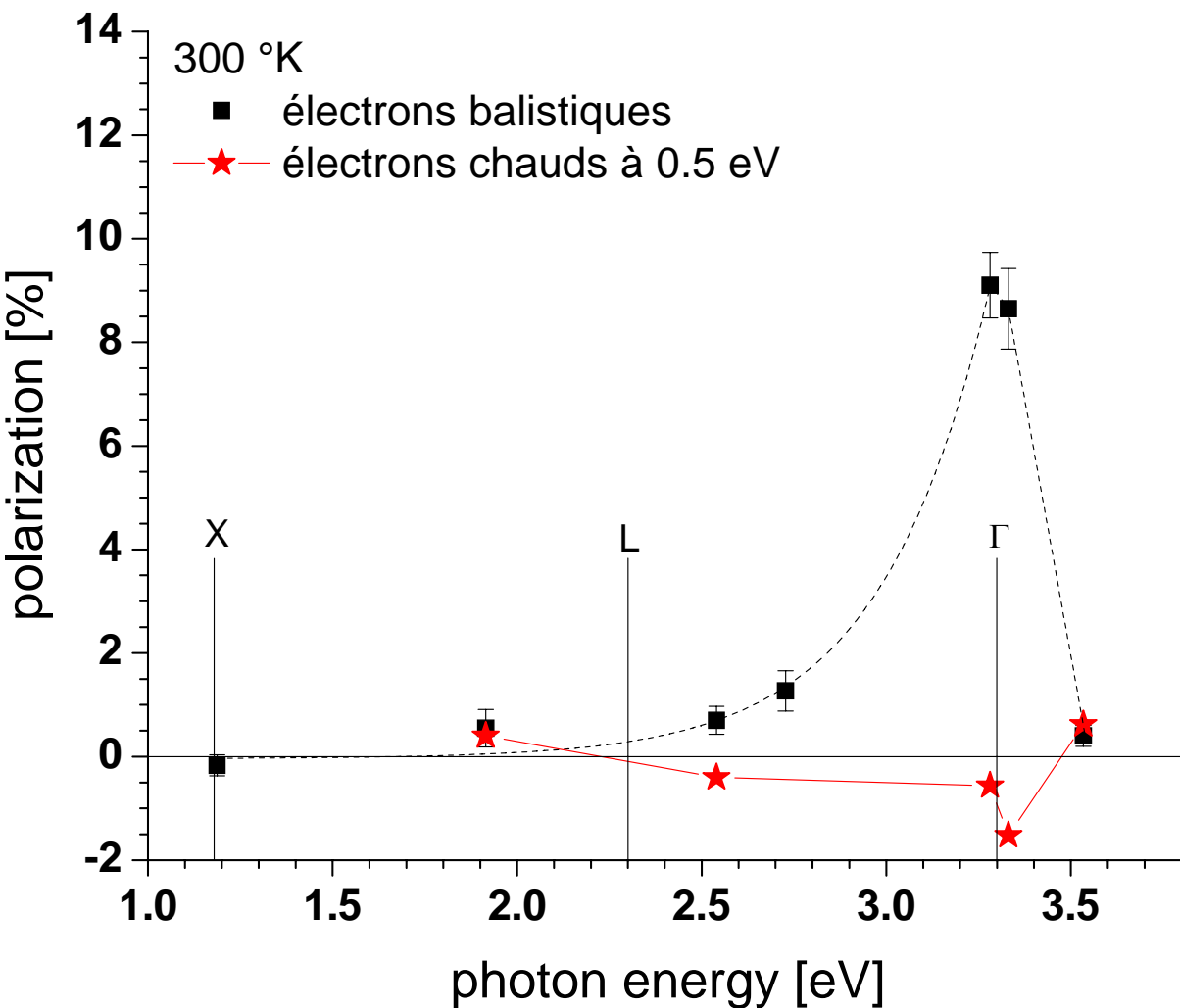
current [nA]

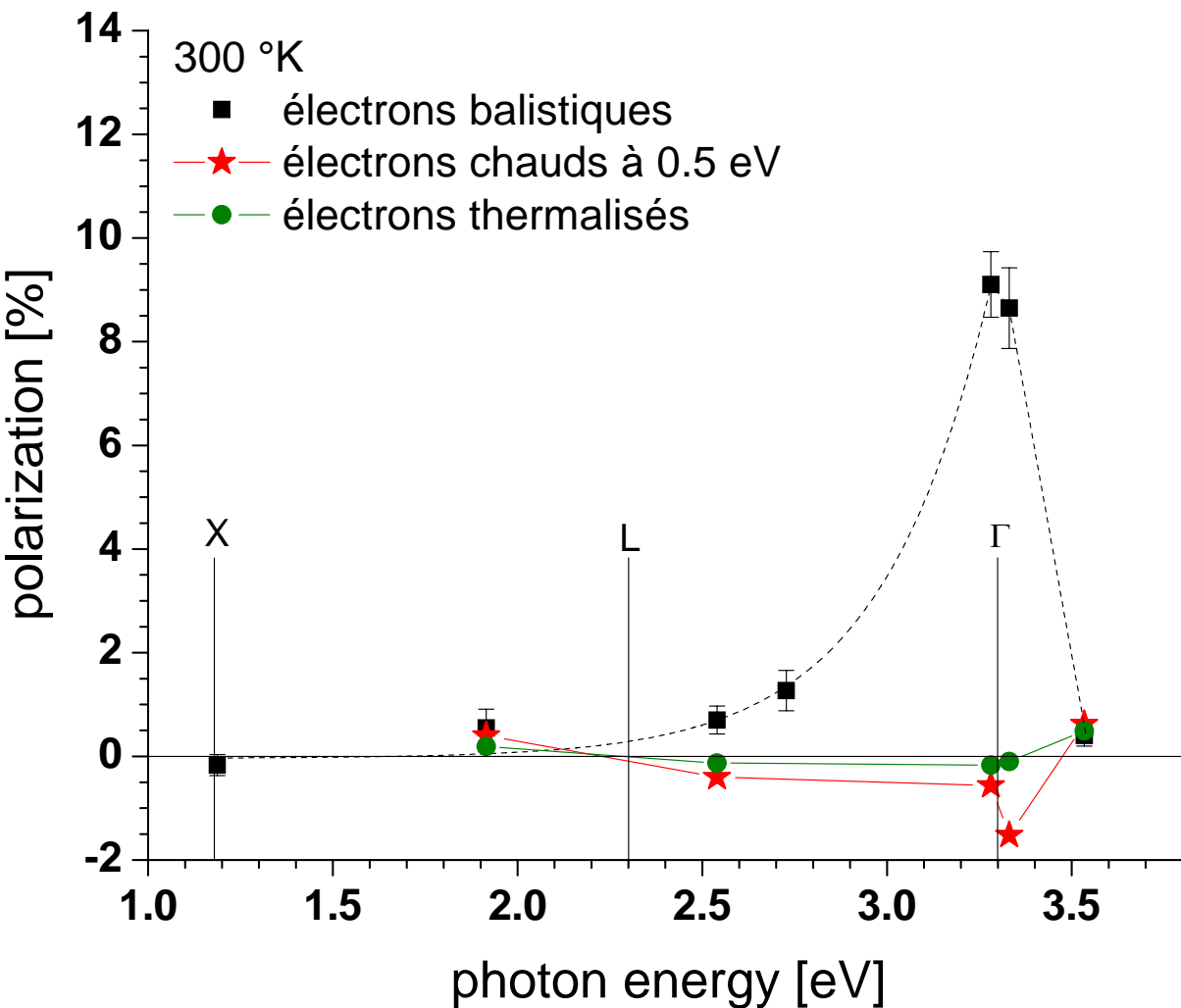
current [nA]

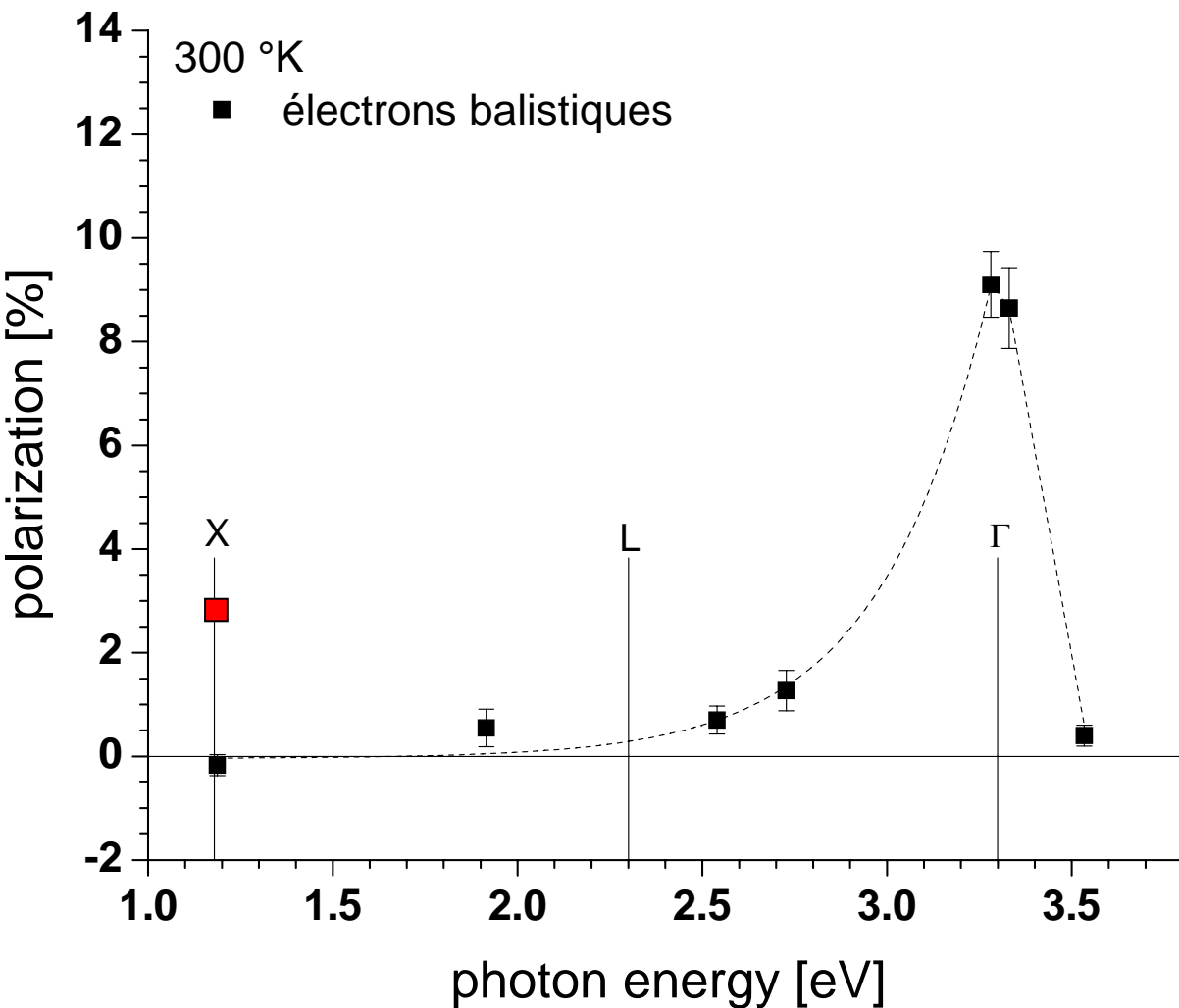
Photo-émission polarisée à 300 °K



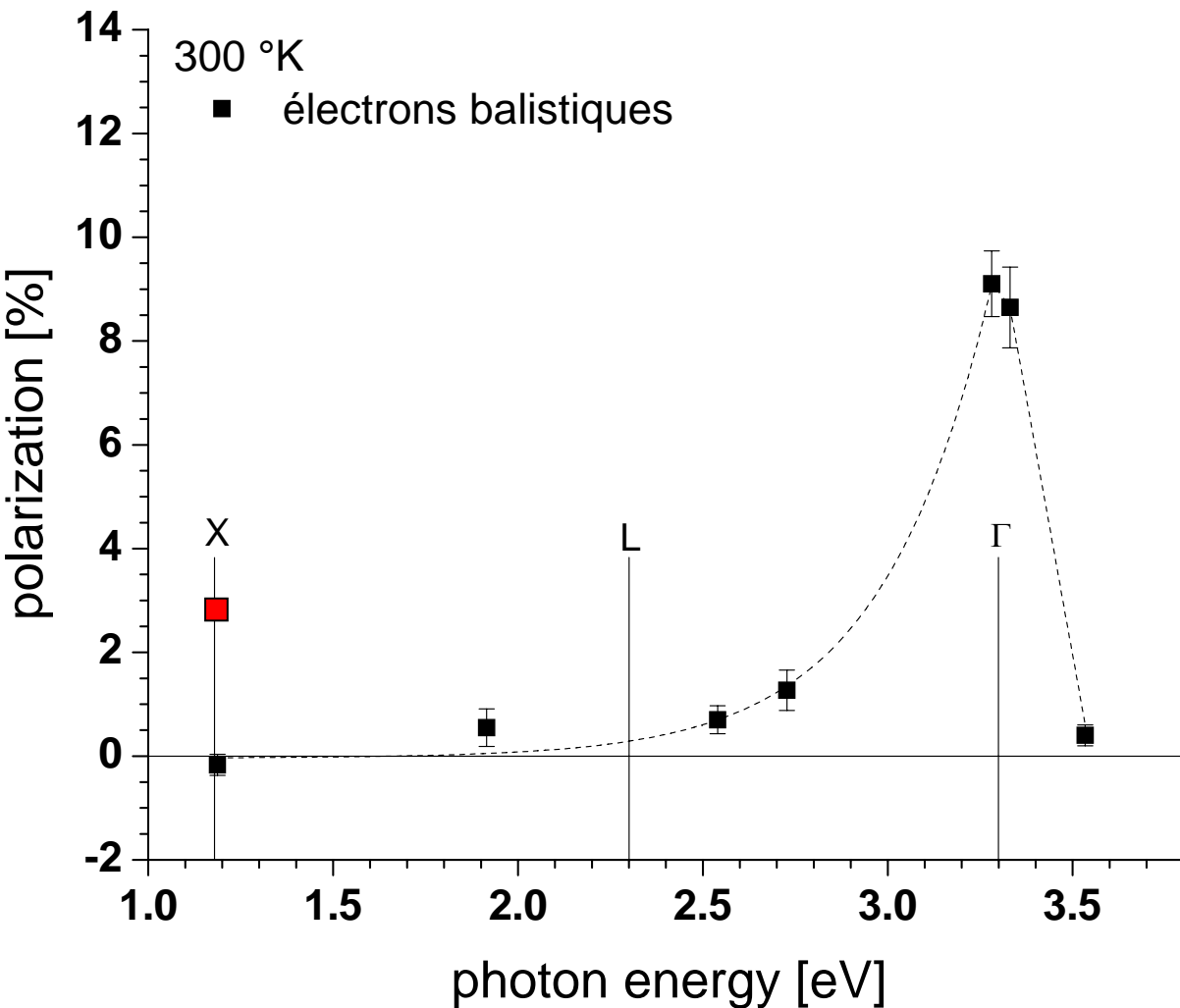
Polarisation en fonction de $h\nu$ 

Polarisation en fonction de $h\nu$ 

Polarisation en fonction de $h\nu$ 

Polarisation en fonction de $h\nu$ Proche de $E_{g,X}$:

$$P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau}} \approx 3\%$$

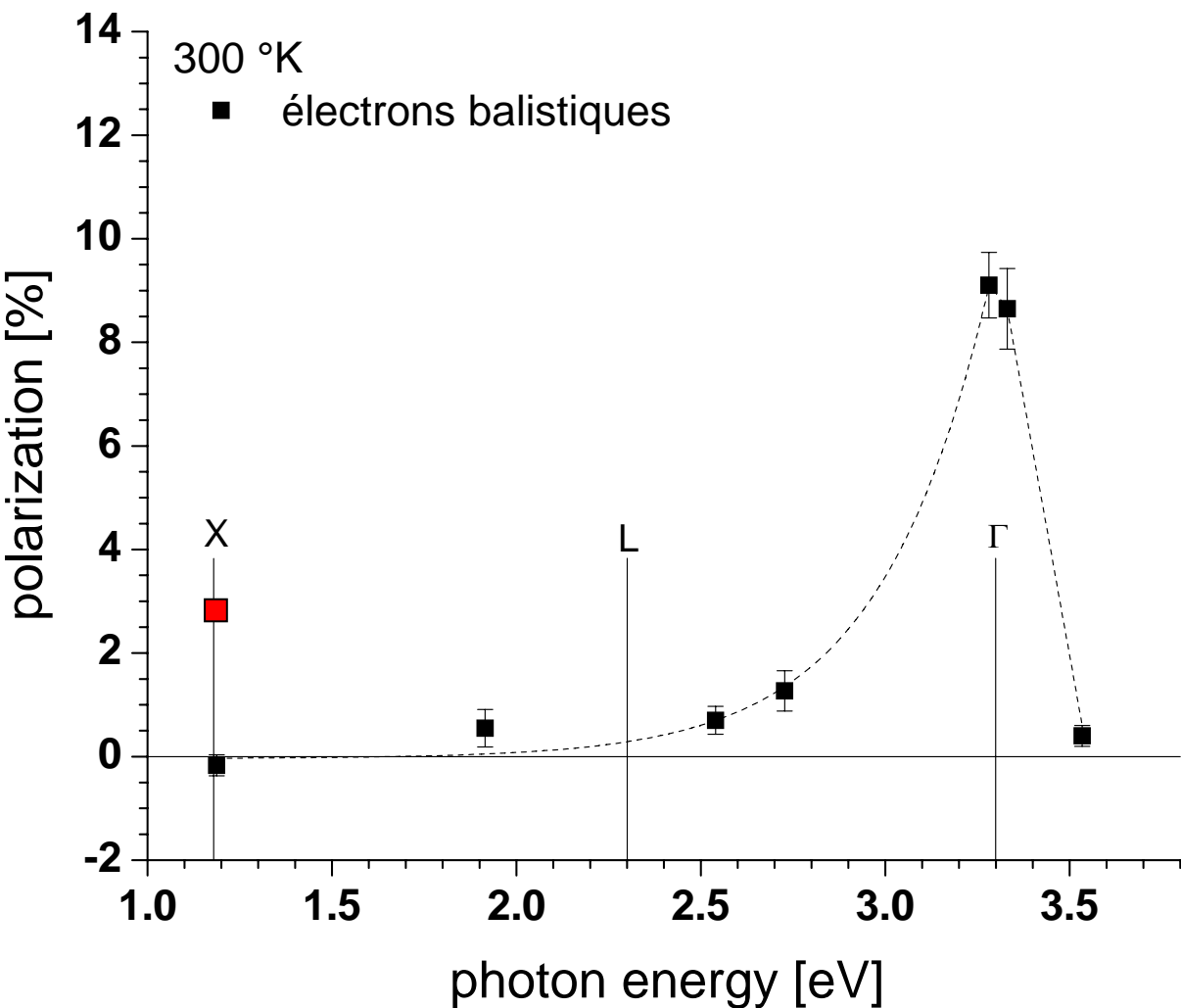
Polarisation en fonction de $h\nu$ Proche de $E_{g,X}$:

$$P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau}} \approx 3\%$$

Proche de $E_{g,\Gamma}$:

$$P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau_{ech}}} \approx P_i$$

Polarisation en fonction de $h\nu$



Proche de $E_{g,X}$:

$$P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau}} \approx 3\%$$

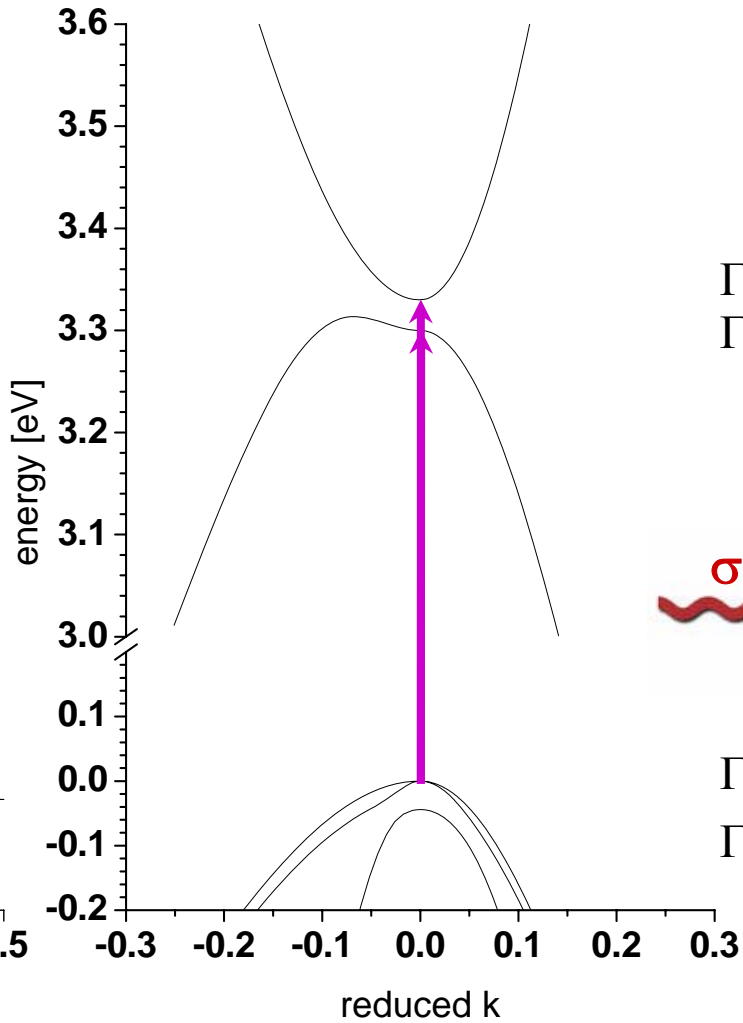
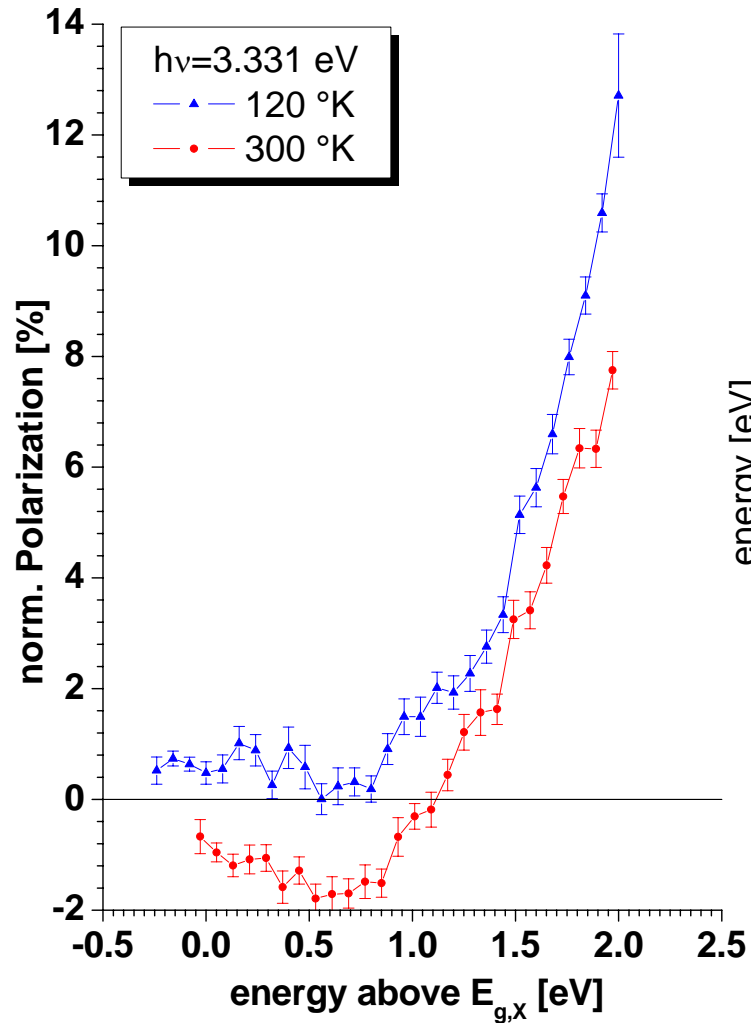
Proche de $E_{g,\Gamma}$:

$$P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \tau_{ech}}} \approx P_i$$

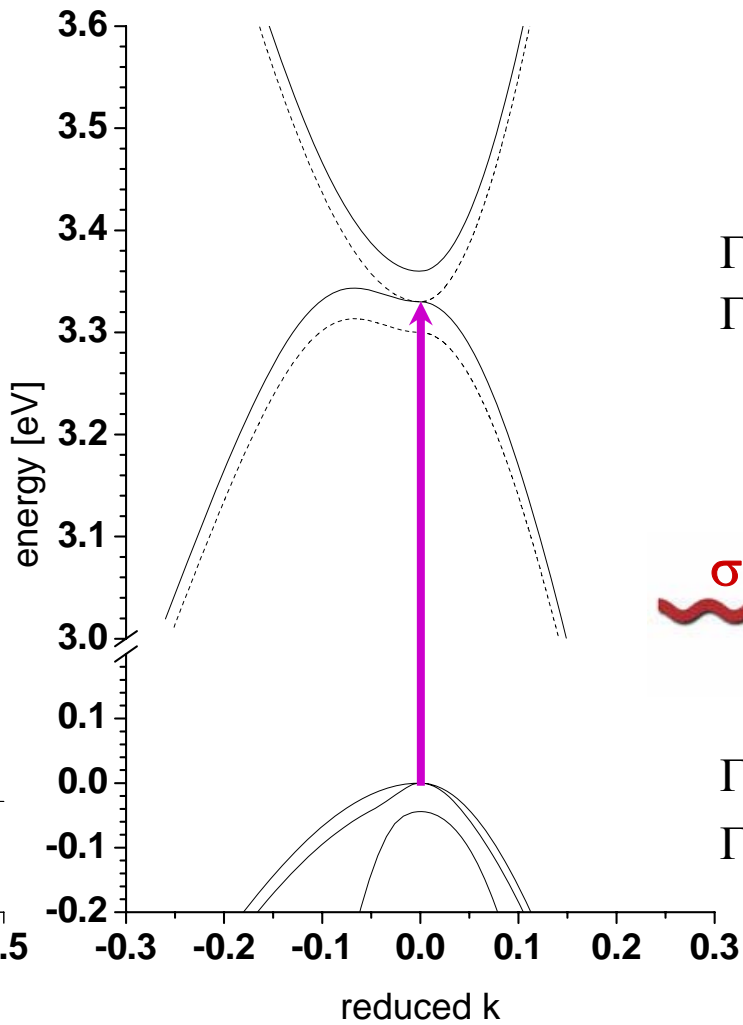
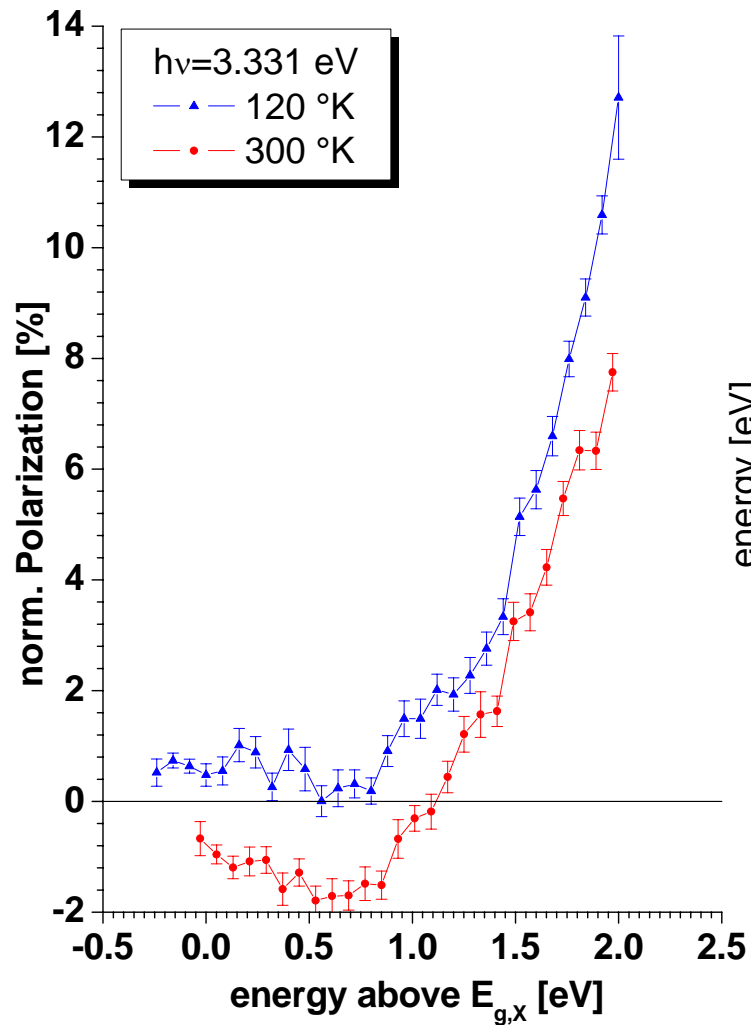
Régime intermédiaire :

τ_{ech} et P_i changent en fonction de $h\nu$?...

Influence de la température



Influence de la température



T=120 K

Plan

1. Problématique
2. Approche
3. Photoluminescence polarisée
4. Photo-émission polarisée
5. Conclusions et perspectives

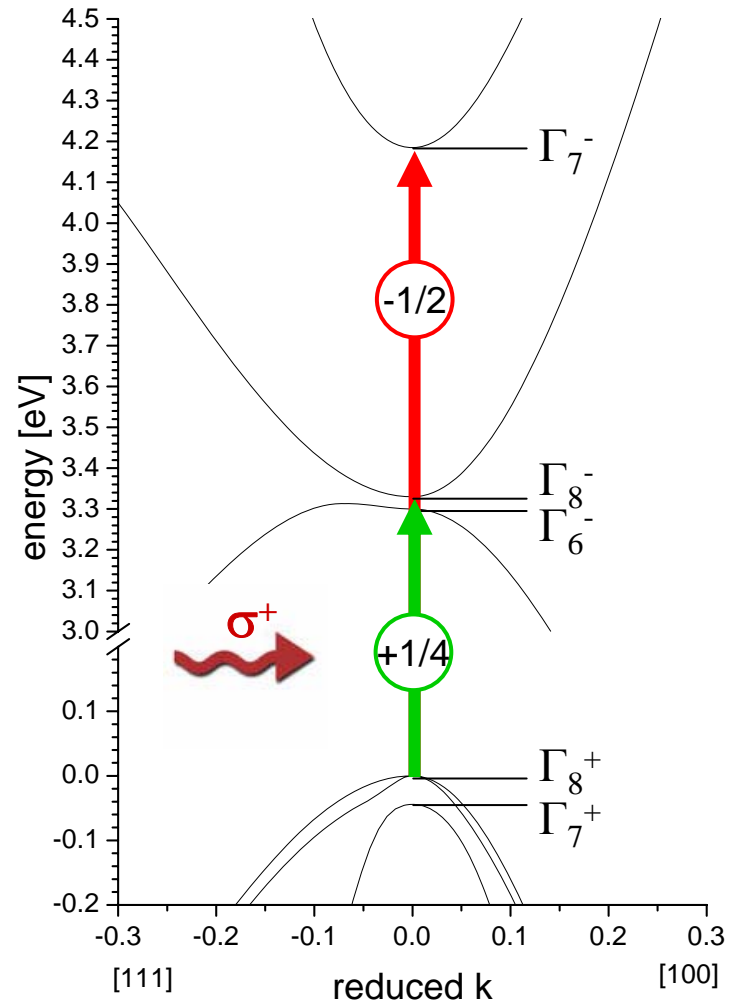
Conclusions et perspectives

- Procédure de mise au point de photocathodes de Si <100> en AEN
- Première étude de photo-émission résolue en énergie et en spin pour une grande gamme d'énergie d'excitation entre $E_{g,X}$ et $E_{g,\Gamma}$, à 77 °K et 300 °K
- Pas de polarisation à basse énergie d'excitation
- Très forte polarisation (15%) au gap direct, en accord avec le calcul
- Première mesure directe résolue en spin du degré d'orientation optique induit dans le Si par pompage optique
- Changement de signe en fonction de l'énergie d'excitation et de la température ?...

Conclusions et perspectives

Pour la suite :

➤ Explorer le régime UV, et UV lointain

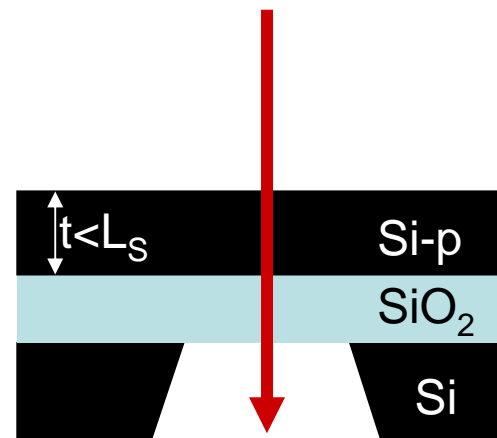


Pour la suite :

- Explorer le régime UV, et UV lointain
- Étude du régime IR-visible : à quoi est due l'absence de polarisation ?
raisons fondamentales : travaux théoriques à développer

Pour la suite :

- Explorer le régime UV, et UV lointain
- Étude du régime IR-visible : à quoi est due l'absence de polarisation ?
 - raisons fondamentales : travaux théoriques à développer
 - raisons expérimentales : étude d'échantillons de faible épaisseur



Pour la suite :

- Explorer le régime UV, et UV lointain
- Étude du régime IR-visible : à quoi est due l'absence de polarisation ?
 - raisons fondamentales : travaux théoriques à développer
 - raisons expérimentales : étude d'échantillons de faible épaisseur
- Pertinence de l'approche en photo-émission en AEN pour l'étude de la structure de bandes et de la physique du spin dans le Si

Merci de votre attention

Influence de la puissance d'excitation

$$\begin{cases} \frac{dn_e}{dt} = G - v_e \sigma_{fe} n_e n_h \\ \frac{dn_h}{dt} = G - v_h \sigma_{fe} n_e n_h \end{cases}$$

$$\tau_e = \frac{1}{v_e \sigma_{fe} n_h} \propto \frac{1}{n_e}$$

G : taux de génération de paire e-h

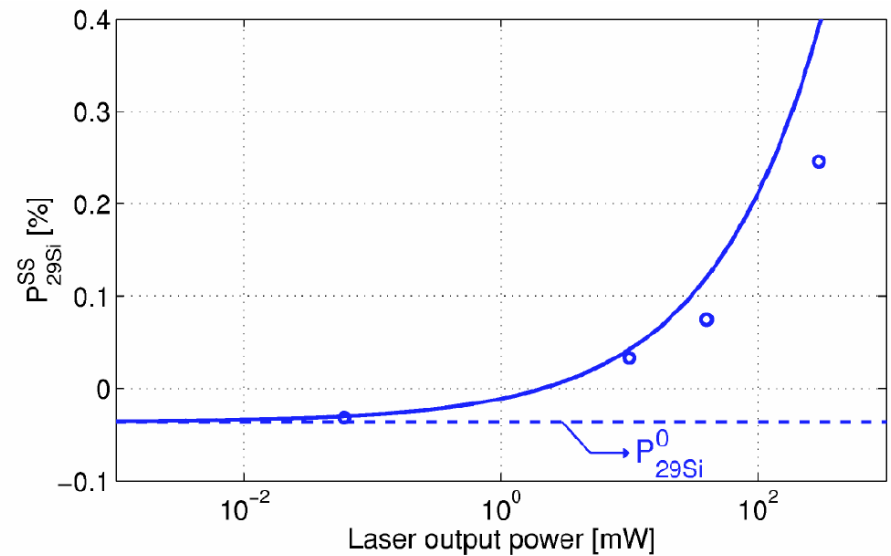
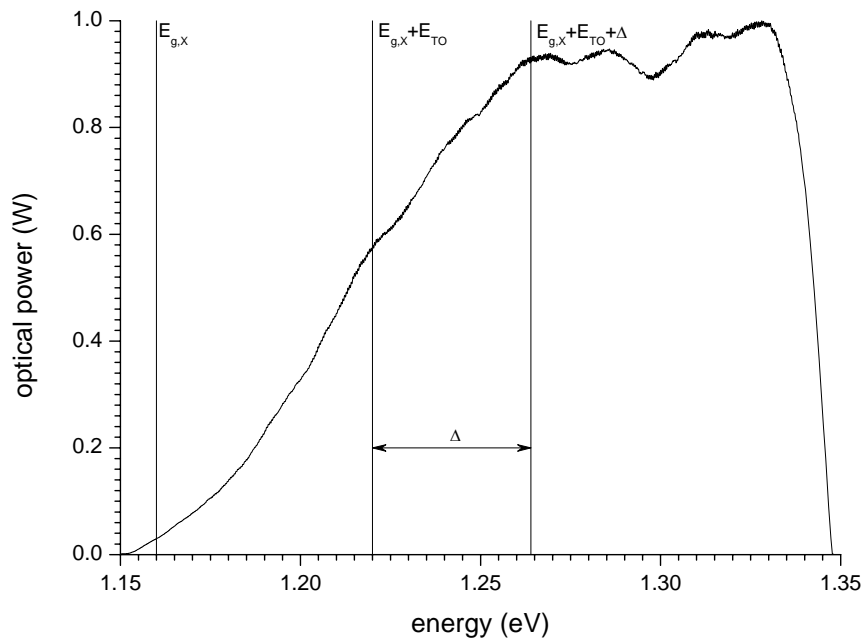
v_e : vitesse des électrons

v_h : vitesse des trous

n_e : densité d'électrons

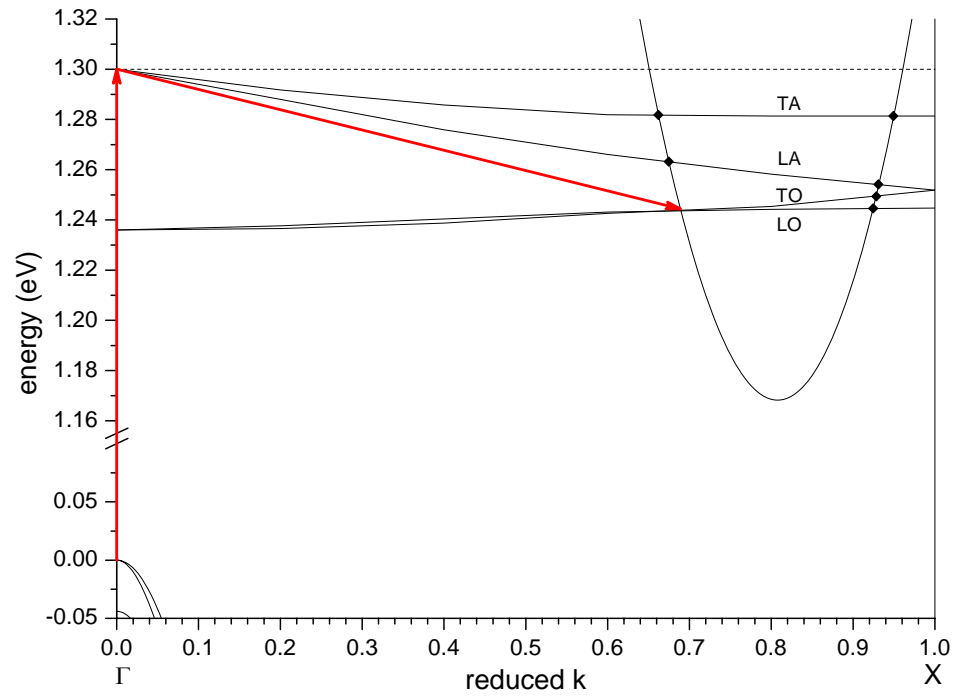
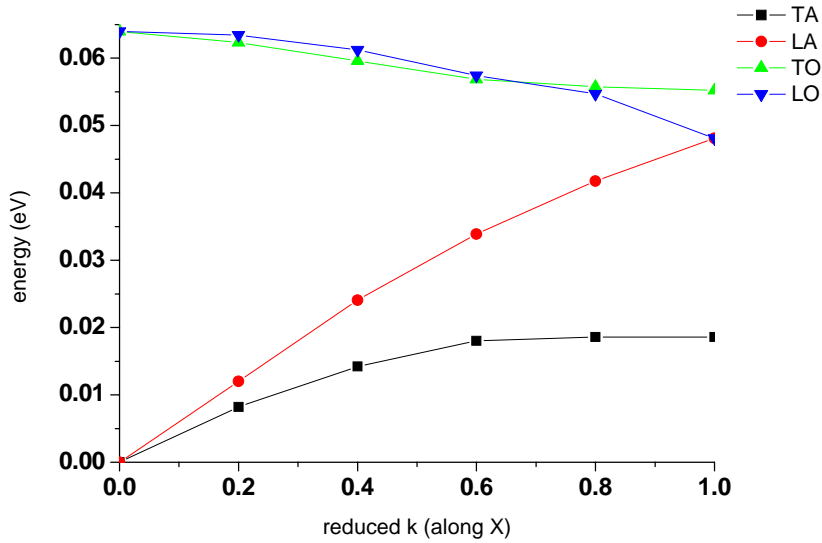
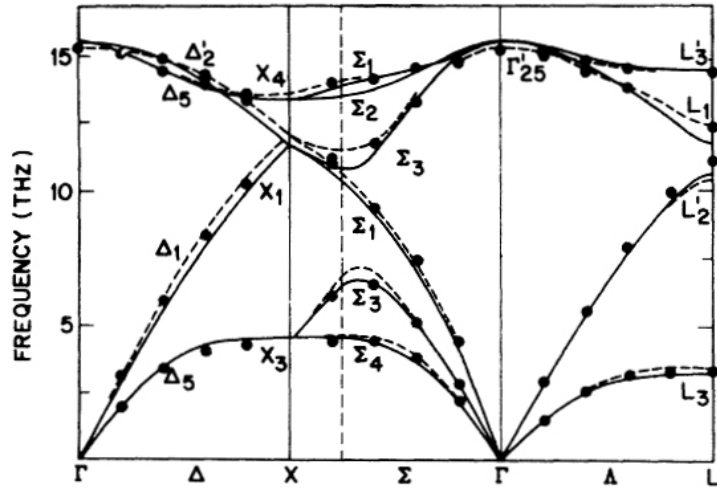
n_h : densité de trous

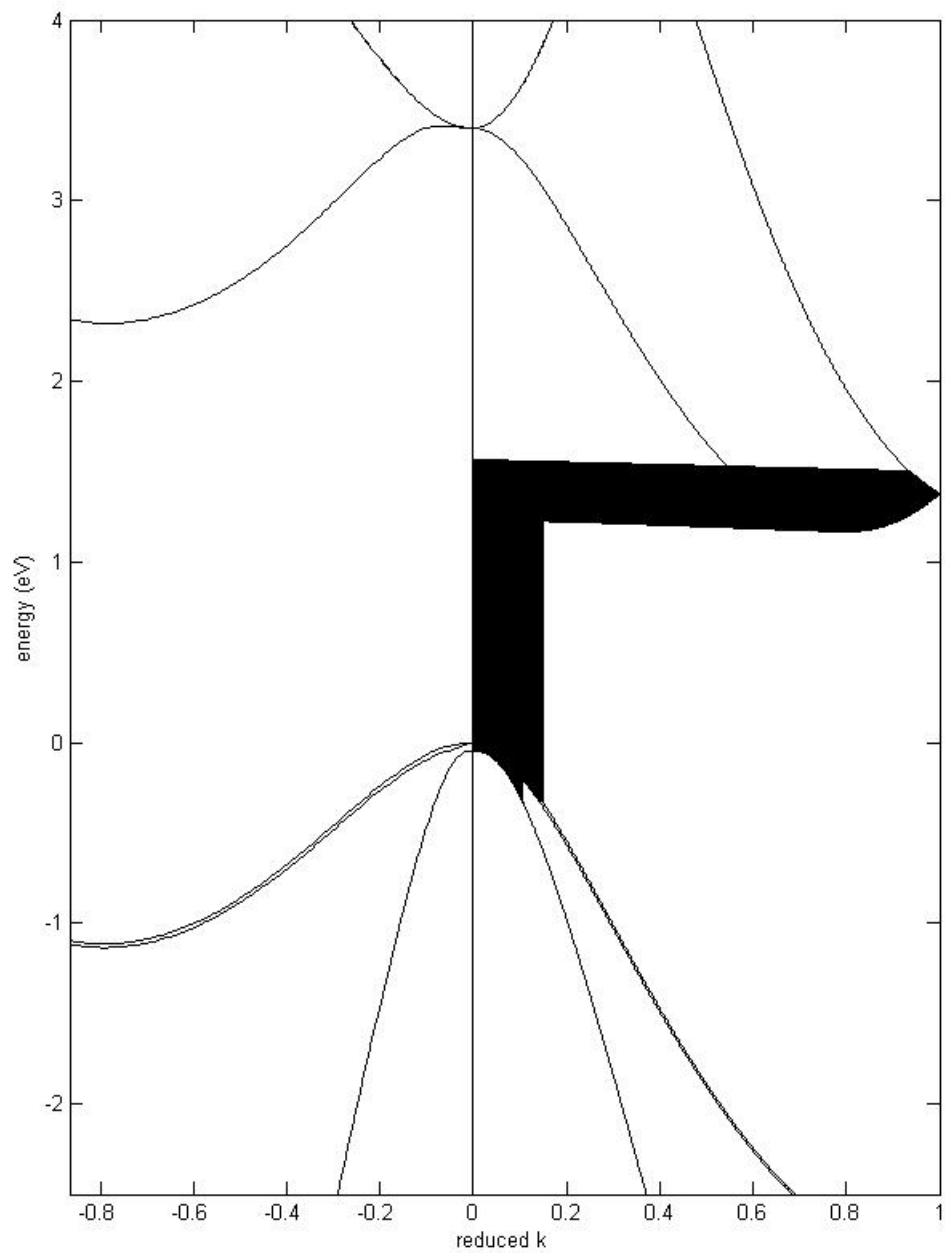
σ_{fe} : section efficace de capture e-h



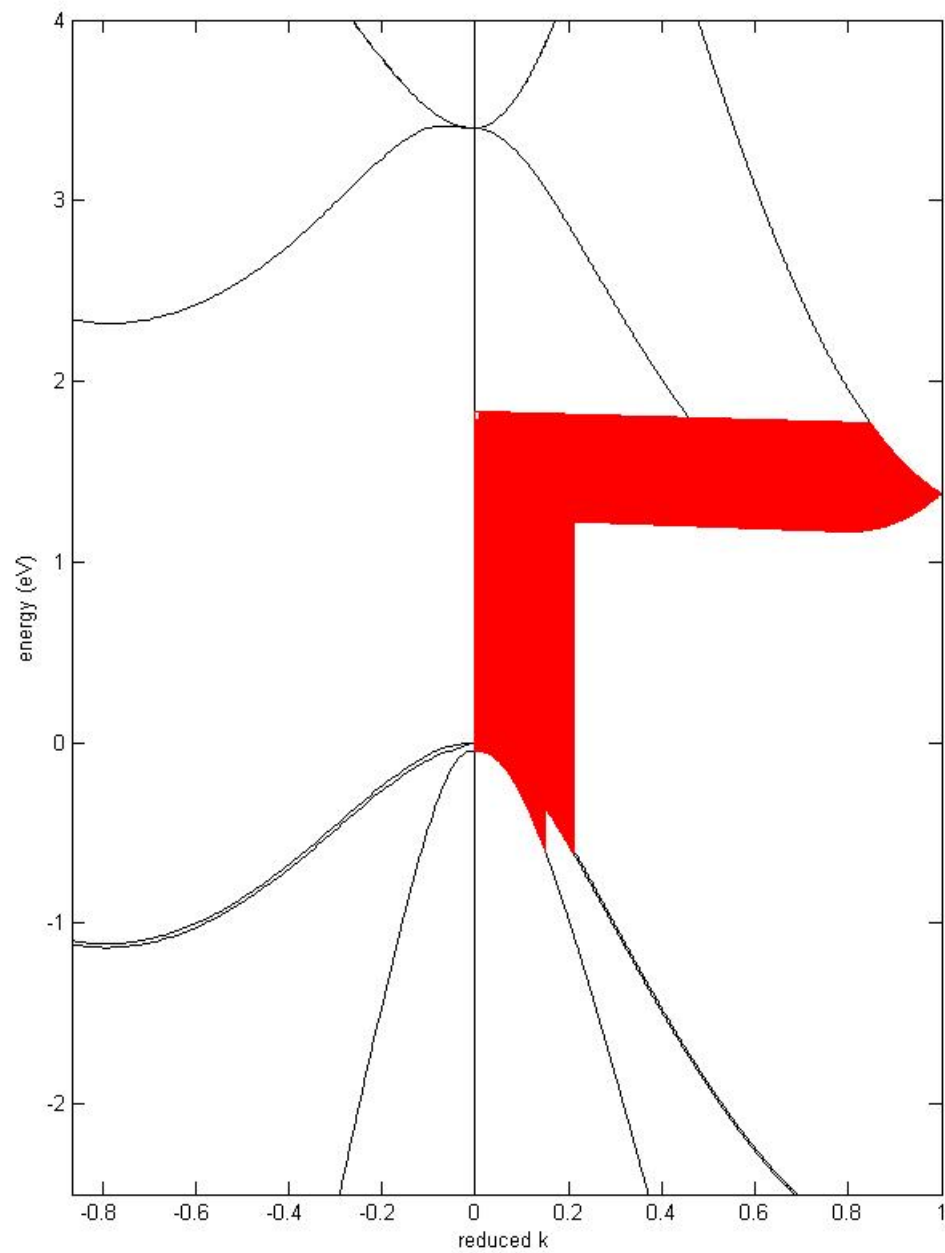
Verhulst : Phys. Rev B **71**, 235206 (2005)

Phonons

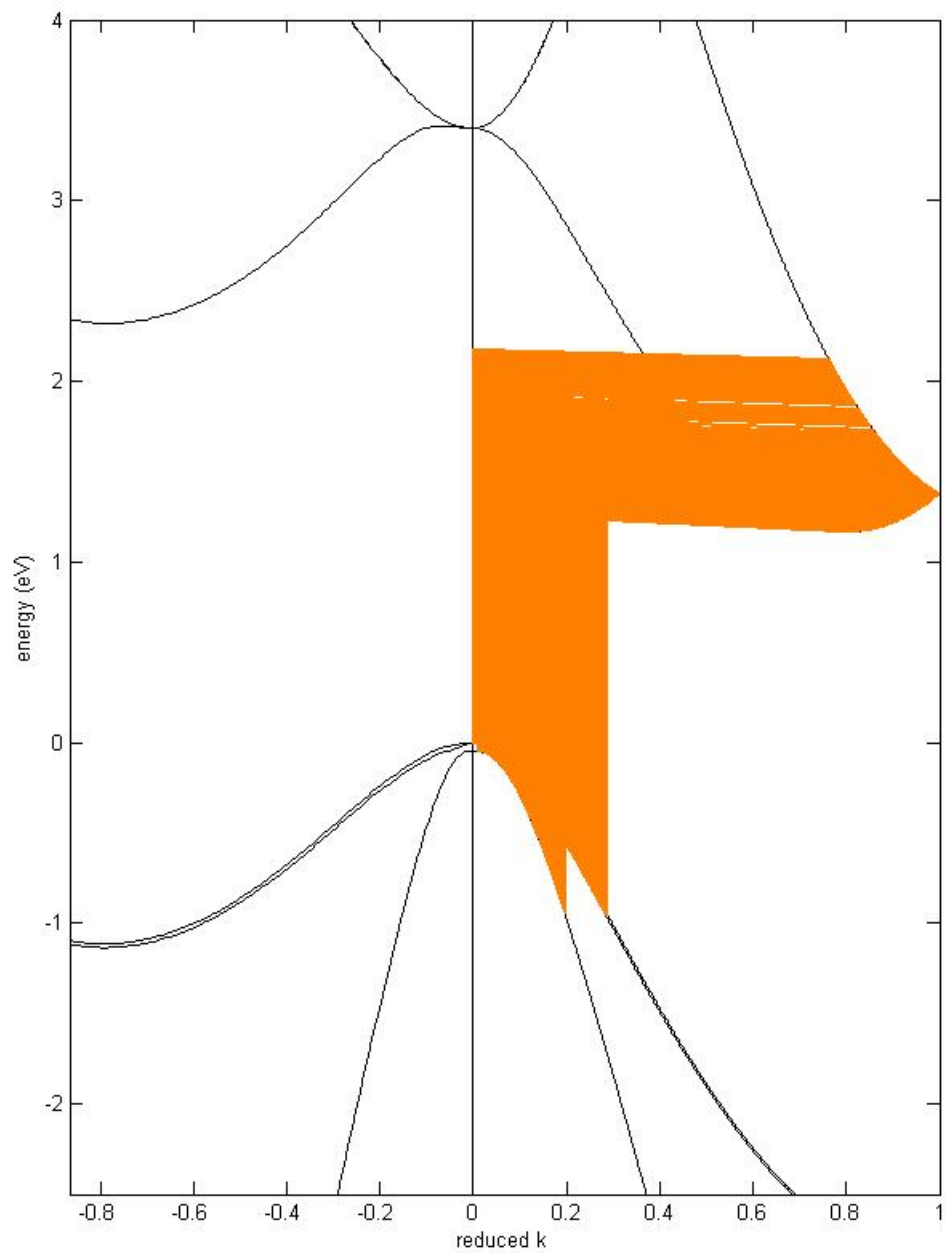




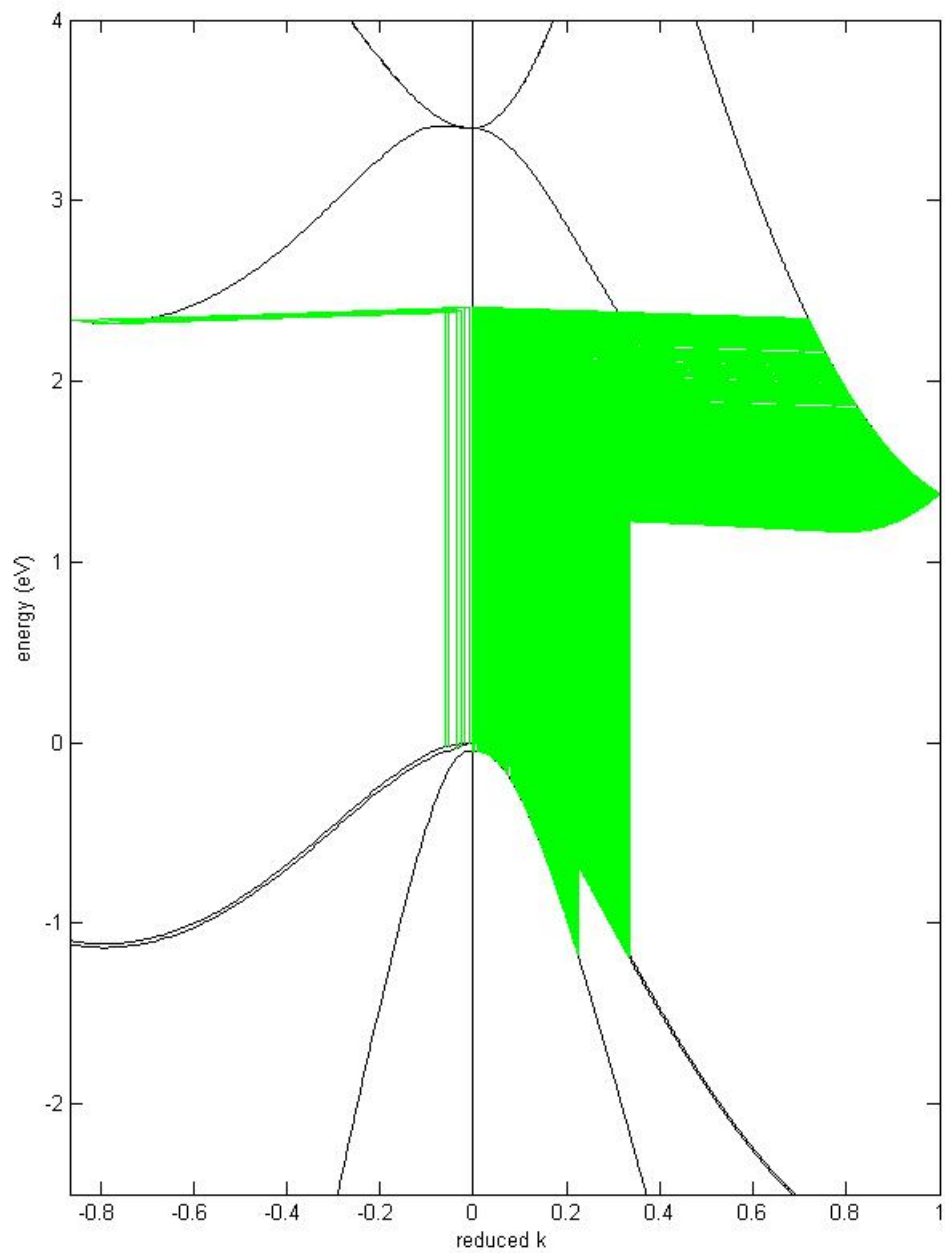
1.563



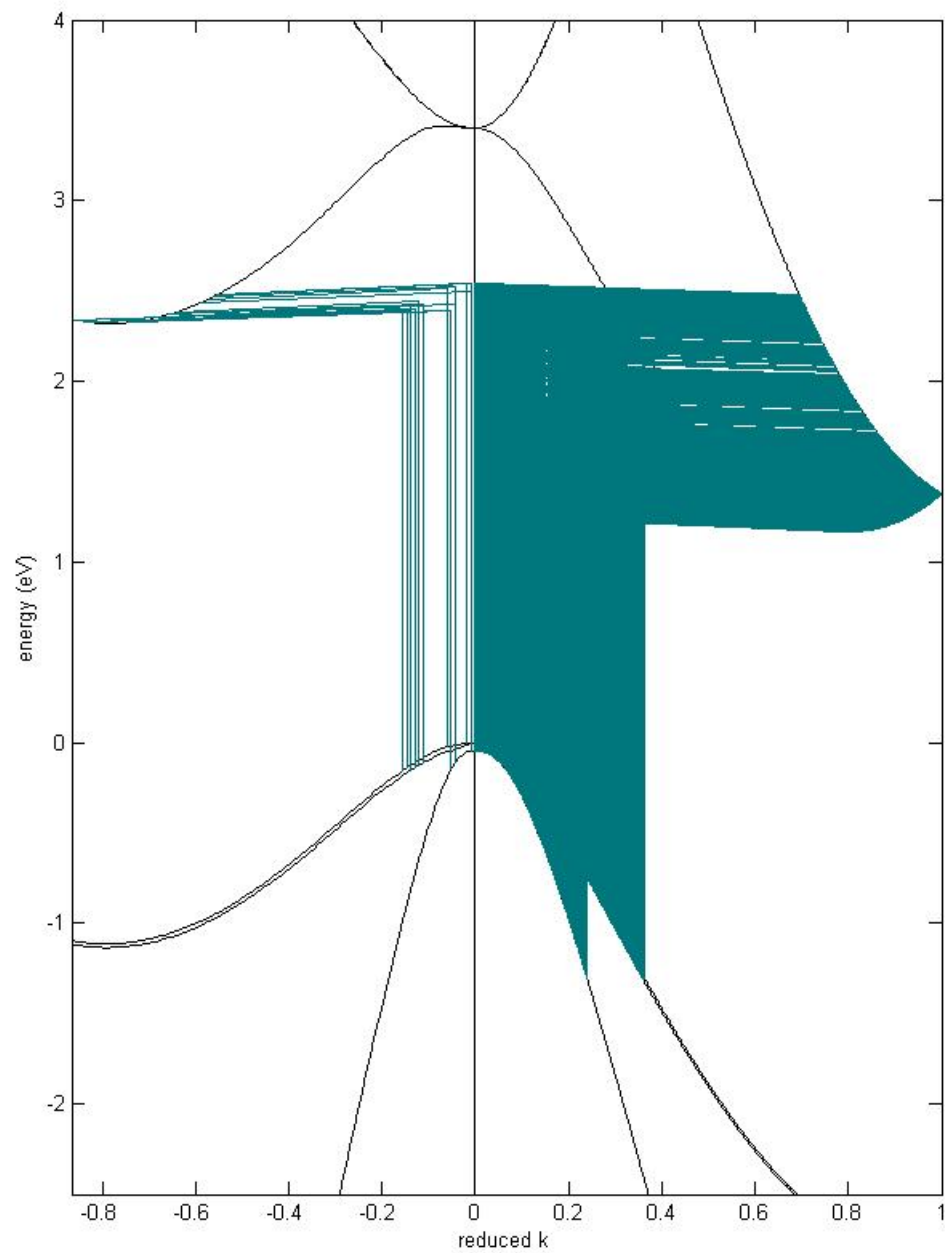
1.832



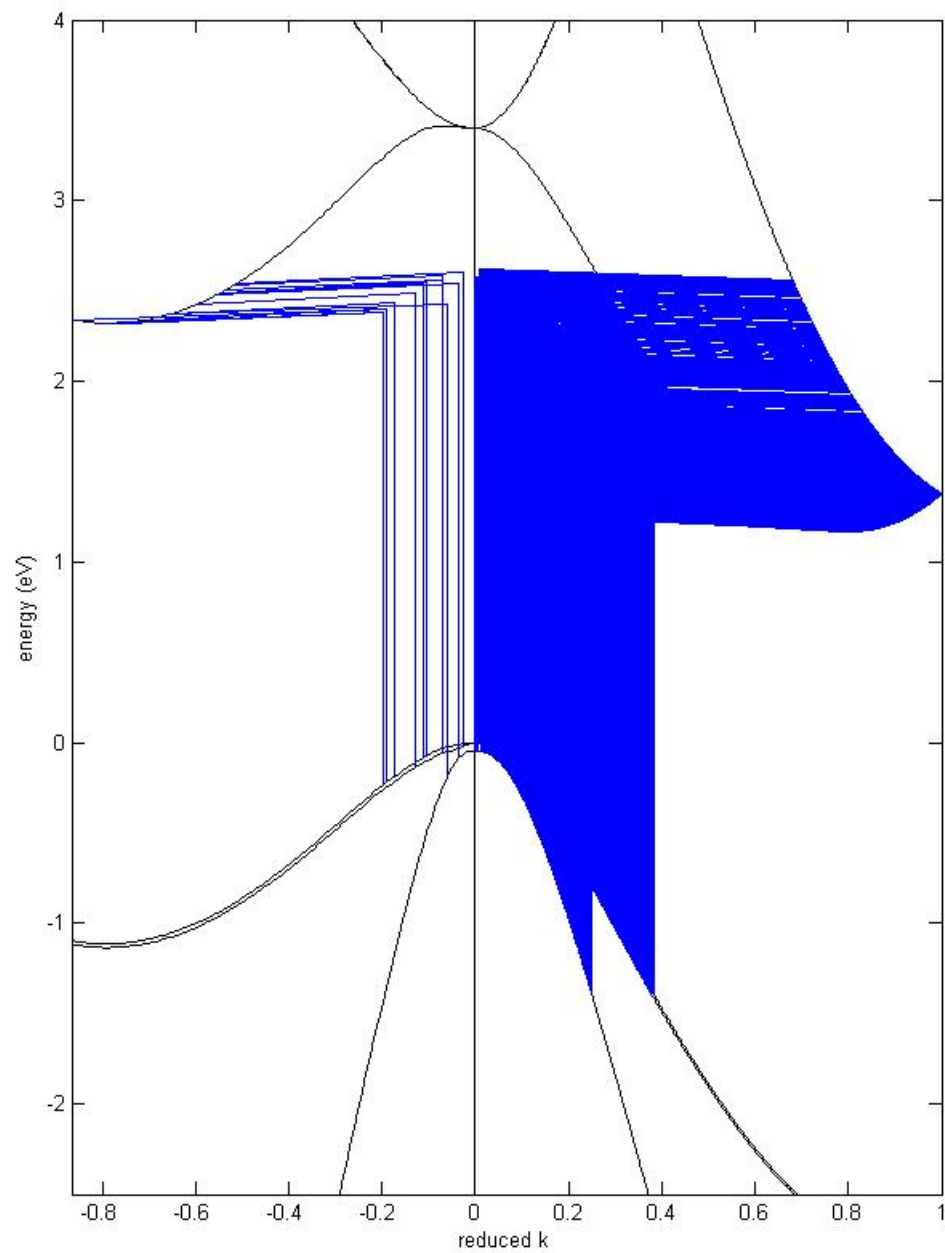
2.181



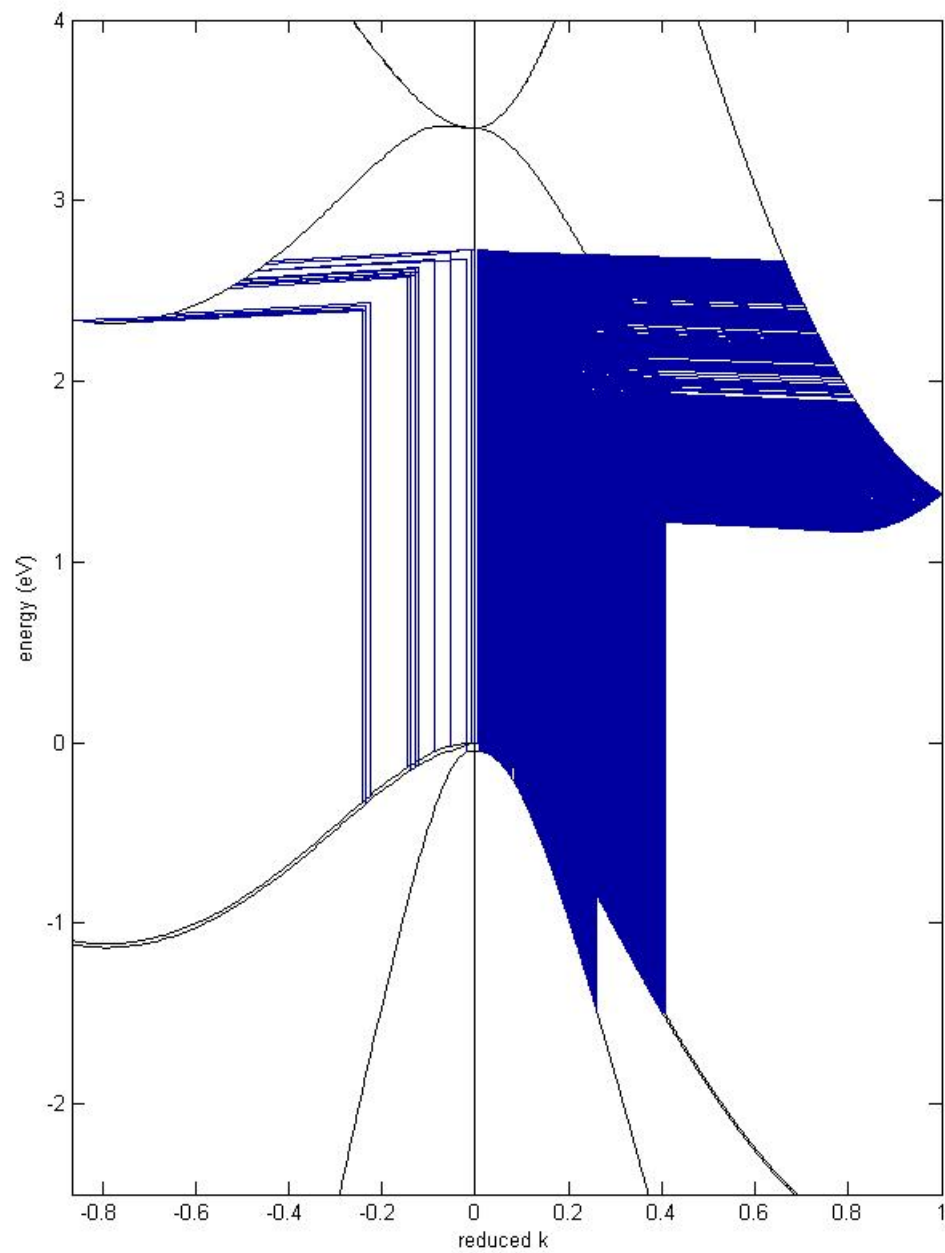
2.409



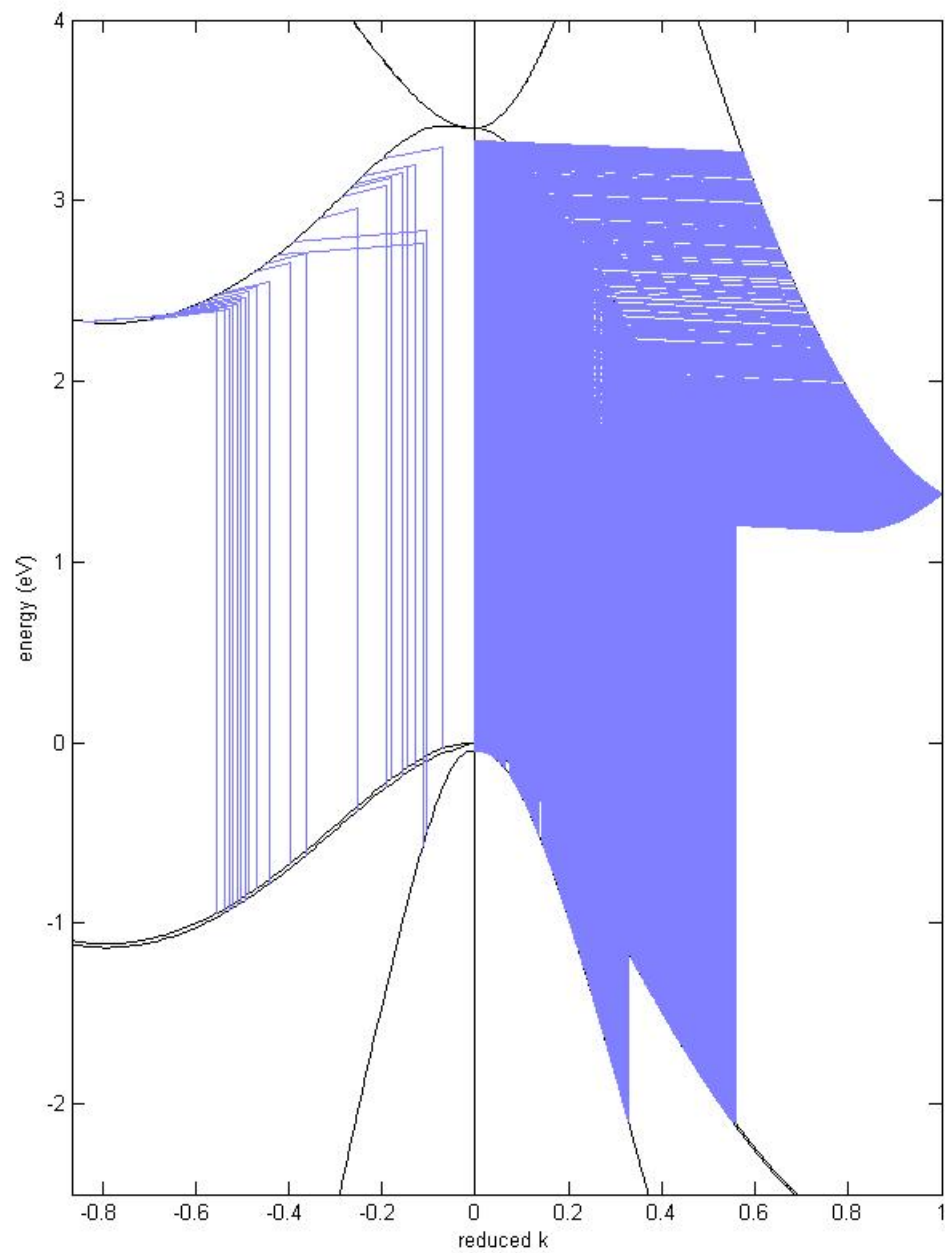
2.540



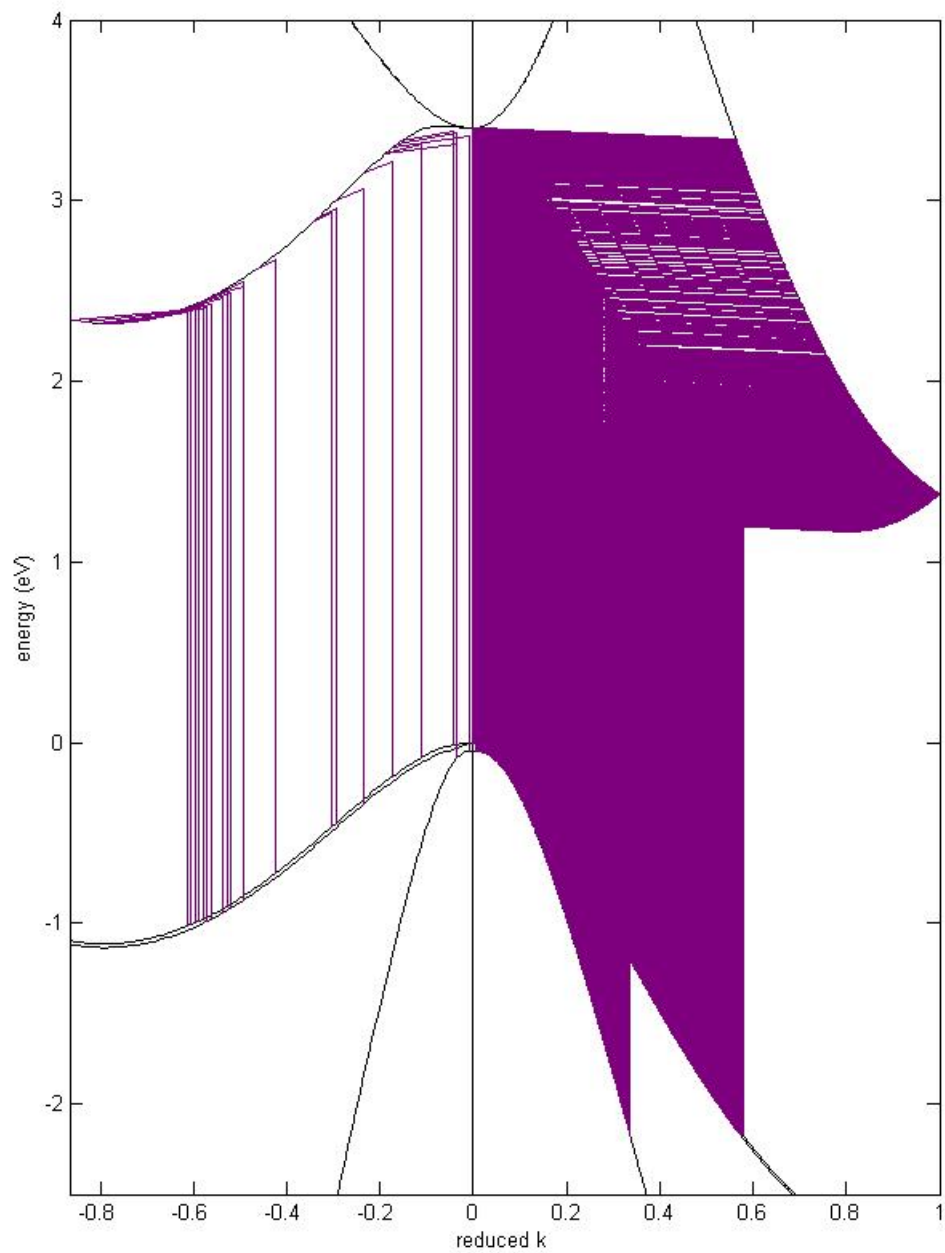
2.622



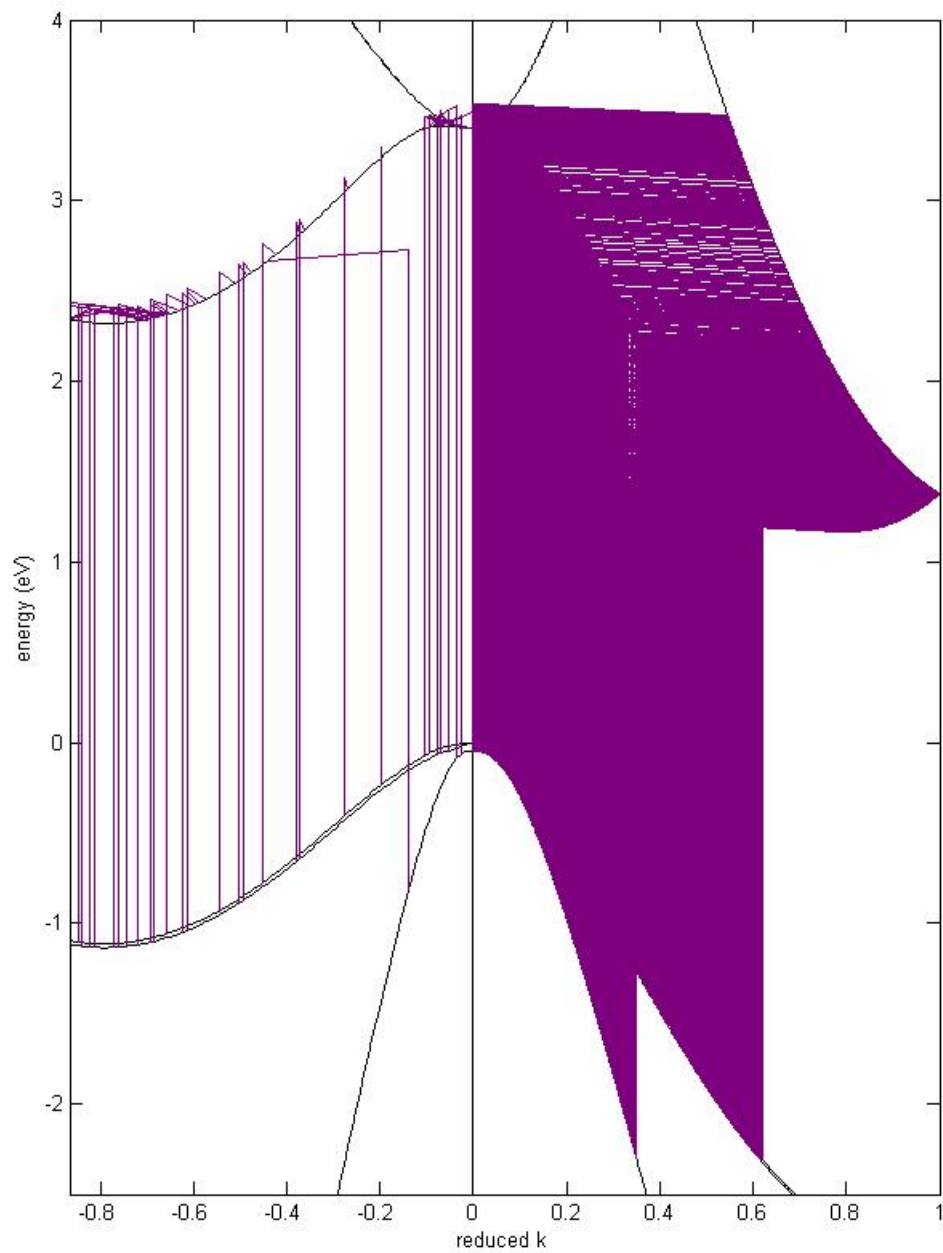
2.727



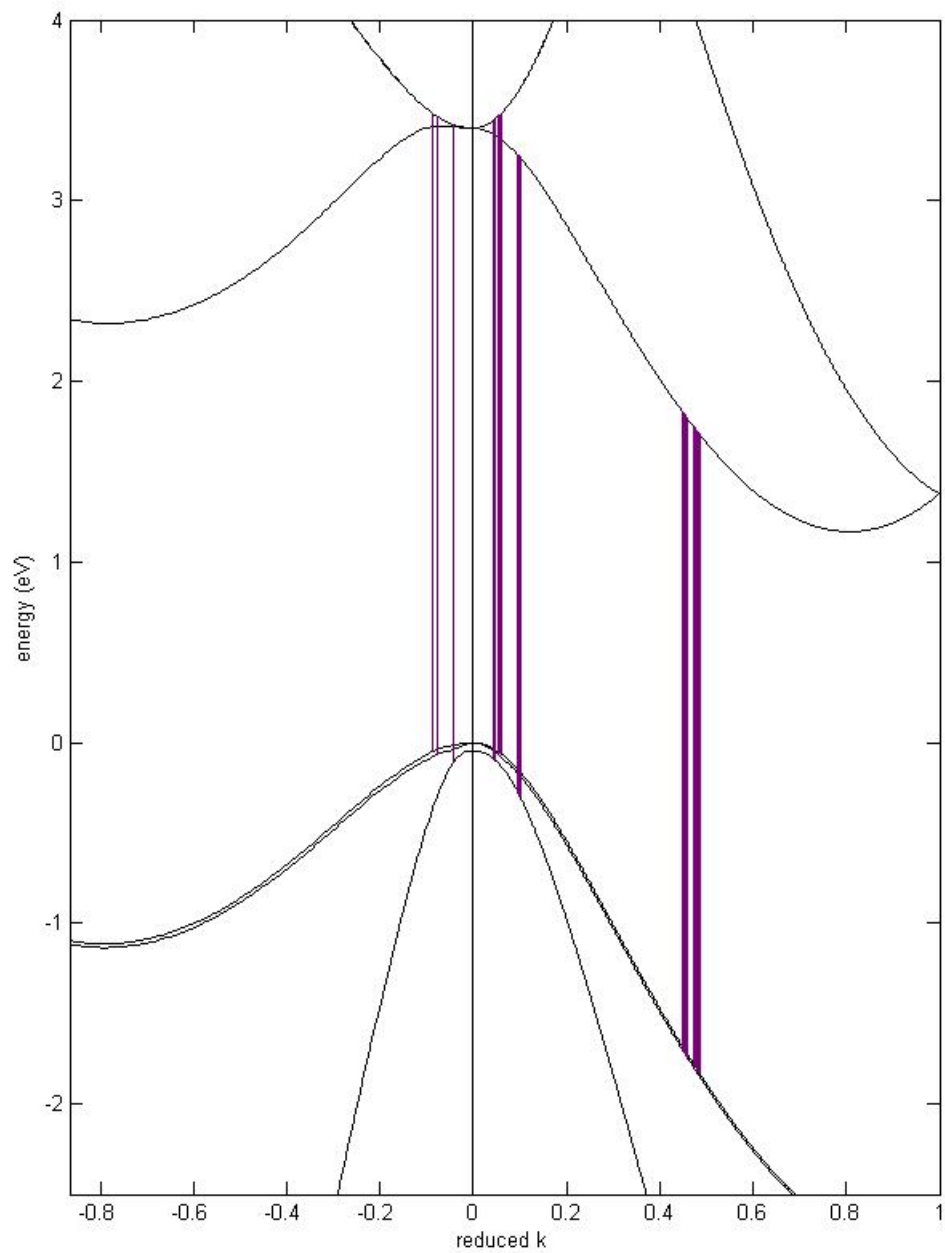
3.331



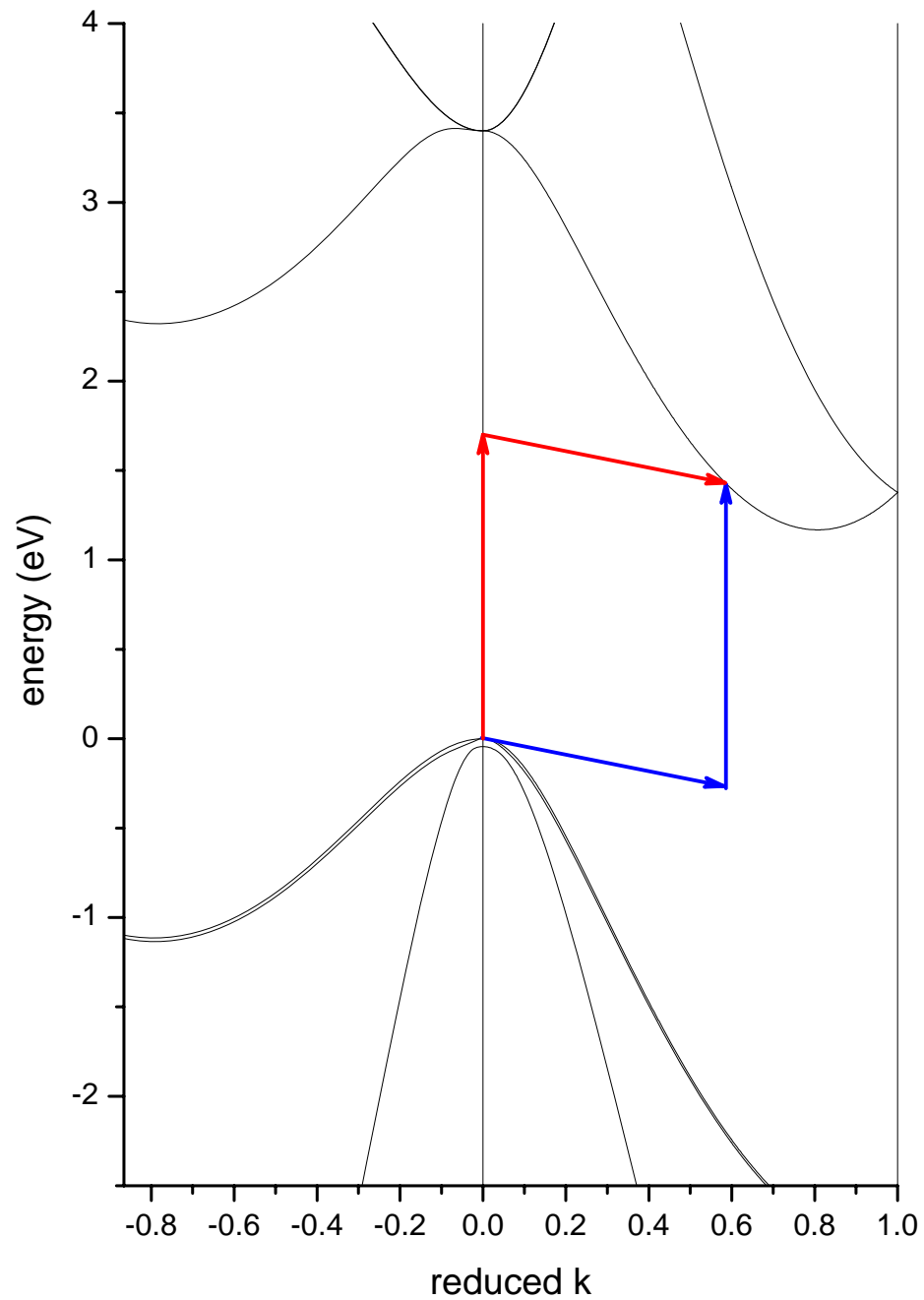
3.340



3.534

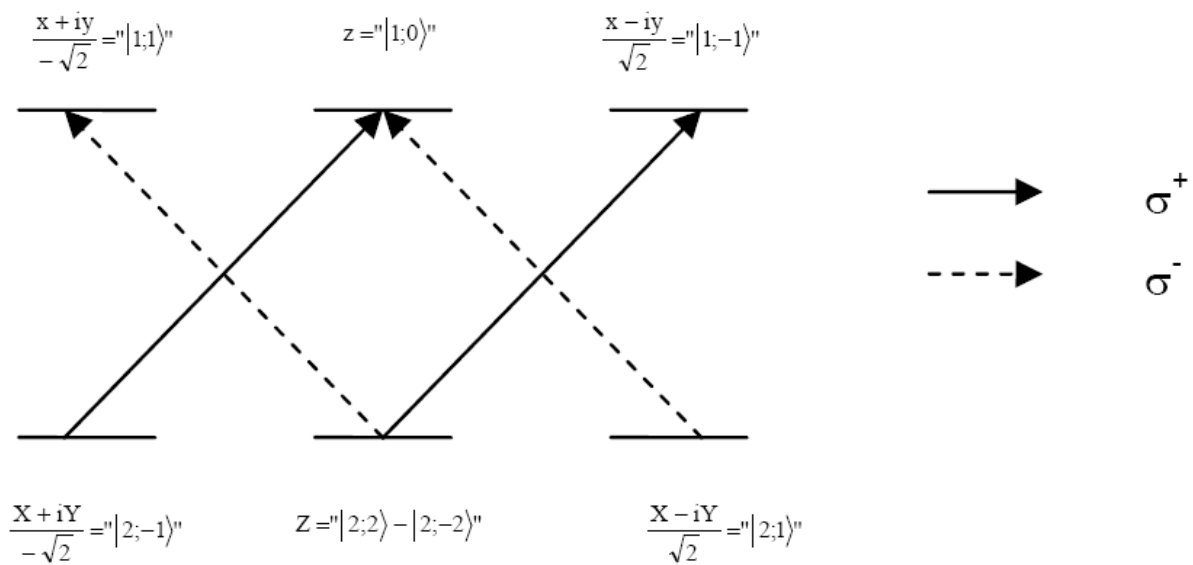


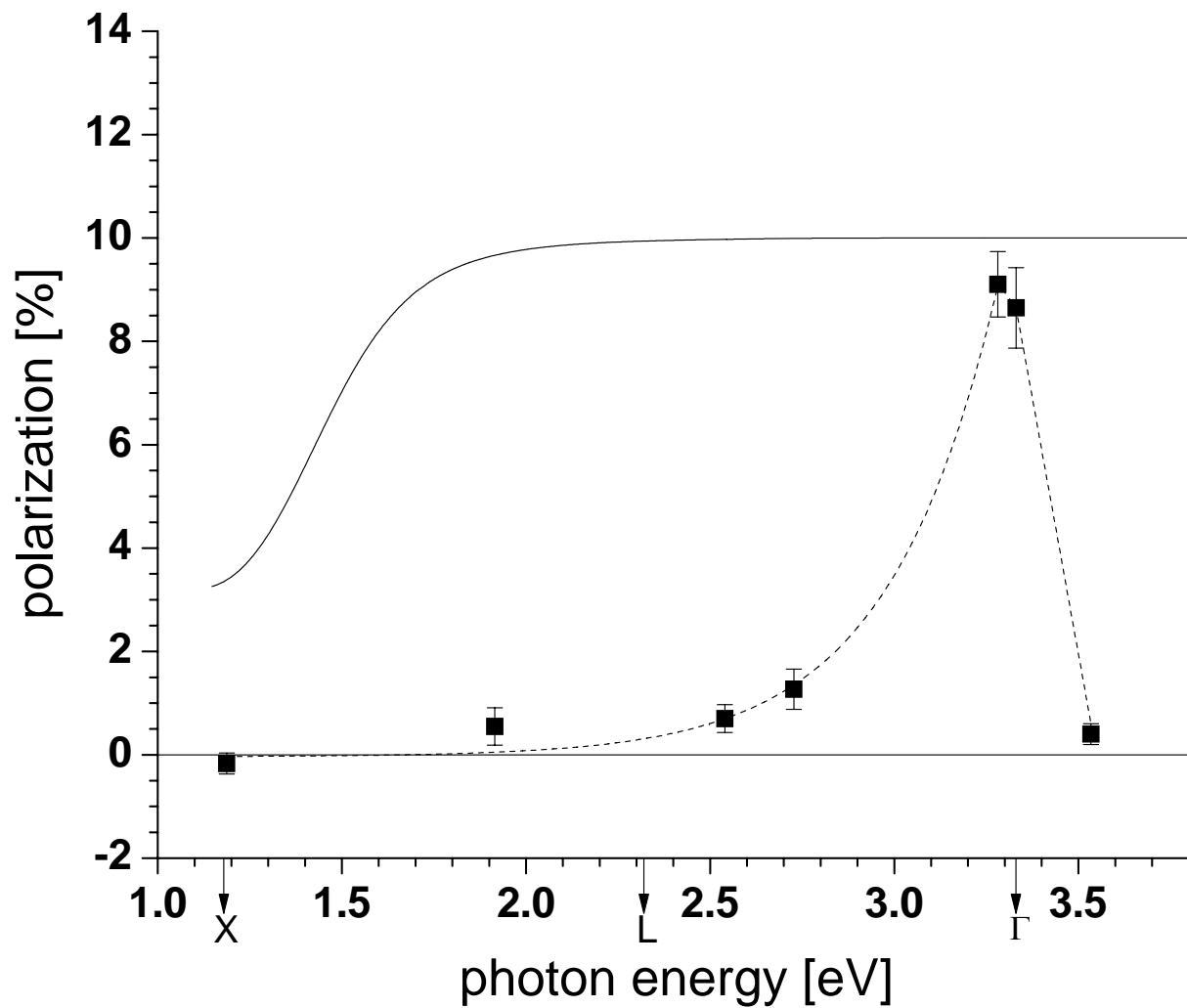
3.534
direct



$$H = H_{\text{op}} + H_{\text{él-ph}}$$

$$H^2 = H_{\text{op}}^2 + H_{\text{él-ph}}^2 + H_{\text{op}} H_{\text{él-ph}} + H_{\text{él-ph}} H_{\text{op}}$$





$$\frac{1}{L_{\text{ech}}} = \frac{1}{L} + \alpha$$

$$P = P_i \sqrt{\frac{T_1}{T_1 + \frac{L_{\text{ech}}^2}{D}}}$$

Influence de la température

