

# Effets optiques et magnoniques dans des hétérostructures fonctionnelles multicouches

YULIYA DADOENKOVA

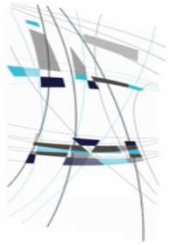
*Enseignante-chercheuse contractuelle, ENIB, Lab-STICC – Équipe NSF*

HDR soutenue le 26/01/2022



- 1 -





# Plan de la présentation

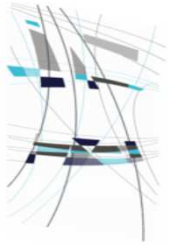
## PARCOURS PROFESSIONNEL

## ACTIVITÉS DE RECHERCHE

### *Principaux domaines de recherche*

- 1. Effets non-spéculaires dans des hétérostructures fonctionnelles*
- 2. Cristaux photoniques-magnoniques*
- 3. Amplification de plasmons polaritons de surface*





# Parcours professionnel



Née à Donetsk (URSS) en 1987

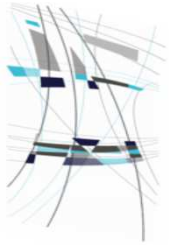
## FORMATION UNIVERSITAIRE

- **Université Nationale de Donetsk** (Ukraine)  
Master ès Sciences obtenu en 2008
- **Institut Physique et Technologique de Donetsk, Académie des Sciences** (Ukraine)  
Doctorat (Ph.D) obtenu en 2013, validé en 2014  
« Effets magnéto-optiques dans des structures photoniques magnétiques et optiquement non-linéaires »  
Directeur de thèse : Pr. Igor Lyubchanskii

## APRÈS LA THÈSE

- **Institut Physique et Technologique de Donetsk, Académie des Sciences** (Ukraine)
  - Chercheuse Junior (2011-2014)
- **Université d'État de Novgorod**
  - Chercheuse contractuelle (2015-2017)
- **Université d'État d'Ulyanovsk** (Russie)
  - Chercheuse contractuelle (2014-2019)
- **École Nationale d'Ingénieurs de Brest** (France)
  - Chercheuse post-doctorale (2019-2020)
  - Enseignante-chercheuse contractuelle (2021- present)





# Principaux domaines de recherche

## LIGNE DIRECTRICE

Modélisation des interactions d'ondes électromagnétiques ou d'ondes de spins avec des structures fonctionnelles pouvant servir à la conception de dispositifs photoniques et/ou magnoniques dans diverses gammes de fréquences (visible, proche IR, THz)

## TECHNIQUES

- ✓ Calculs et modélisations analytiques
  - *Formalisme des matrices de transfert*
  - *Méthodes perturbatives (fonctions de Green)*
  - *Formalisme des ondes couplées*
- ✓ Calculs numériques
  - *MATLAB*
  - *Maple*
  - *COMSOL Multiphysics*

## PRODUCTION SCIENTIFIQUE

- ✓ Articles de revues à comité de lecture : 50
- ✓ Chapitres de livre : 3

## PRINCIPAUX DOMAINES DE RECHERCHE

- EFFETS MAGNÉTO-OPTIQUES LINÉAIRES (effets Kerr et Faraday)
- EFFETS NON-SPÉCULAIRES (DÉCALAGES DE FAISCEAUX) (effets Goos-Hänchen et Imbert-Fedorov)
- CRISTAUX PHOTONIQUES ET/OU MAGNONIQUES COMPLEXES (incluant des milieux supraconducteurs, magnétiques, électro-optiques...)
- GUIDES D'ONDES MAGNÉTIQUES
- PLASMONIQUE (plasmons polaritons de surface)
- MAGNONIQUE (ondes de spin)
- EFFETS OPTIQUES NON-LINÉAIRES (diffraction acousto-optique, diffusion Brillouin)

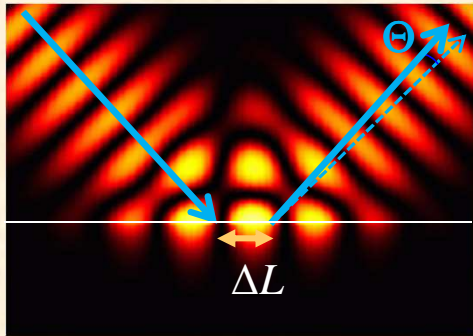


# 1. Effets non-spéculaires

## EFFET GOOS-HÄNCHEN (GH)

Décalage spatial latéral  $\Delta L$

Décalage angulaire  $\Theta$  du faisceau réfléchi



$$\Delta L = -\frac{\partial \arg(\mathcal{R})}{\partial k_x}$$

$\mathcal{R}$ : coefficient de réflexion en amplitude  
 $k_x$ : composante du vecteur d'onde incident parallèle à l'interface

Origine : différence de phase entre les faisceaux incident et réfléchi (modèle d'Artmann)

- Valeurs élevées ( $\sim 100 \lambda$ )
- Sensibilité aux changements d'indice de réfraction



- À **prendre en compte** lors de la conception de dispositifs optiques intégrés
- **Applicable à la conception de capteurs** :
  - Biodétection
  - Capteurs chimiques
  - Thermocapteurs
  - Rugosité de surface
  - Mesures d'indices de réfraction

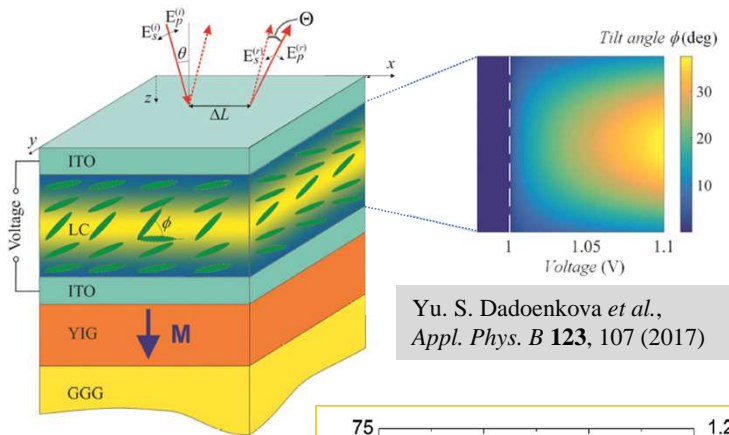


Nécessaire : exaltation et contrôle du décalage GH par des stimuli externes



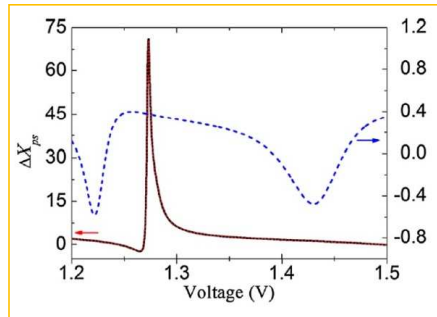
# 1. Effets non-spéculaires – lumière

## COUCHE MAGNÉTIQUE + CELLULE À CRISTAUX LIQUIDES



Yu. S. Dadoenkova *et al.*,  
*Appl. Phys. B* **123**, 107 (2017)

Décalage GH réduit  
 $\Delta X = \Delta S / \lambda_0$  ( $\lambda_0 = 1,15$   
 $\mu\text{m}$  dans le vide) en  
 fonction de la tension  
 appliquée pour  
 aimantation  $\mathbf{M} \uparrow \uparrow z$  et  
 $\mathbf{M} \uparrow \downarrow z$



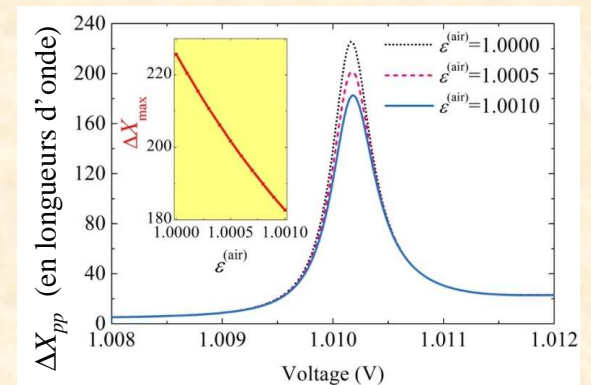
### Couche magnétique :

Anisotropie optique  $\rightarrow$   
 Combinaisons de polarisations des  
 ondes incidente et réfléchié  
 $p \rightarrow p, s \rightarrow s, p \rightarrow s$  et  $s \rightarrow p$

### Cellule à cristaux liquides (CL) :

Tension  $V$  appliquée  $\rightarrow$   
 Rotation  $\phi(V)$  des molécules de la  
 cellule CL  
 Ancrage aux interfaces  $\rightarrow$  Rotation  
 non uniforme au sein de la cellule  
 CL  
 Forme allongée des molécules de  
 la cellule CL  $\rightarrow$  Anisotropie  
 optique

## PRINCIPE D'UN DÉTECTEUR DE VAPEURS ACCORDABLE



**Sensibilité :  $4,3 \cdot 10^4$   $\mu\text{m}$  par unité de  $\epsilon^{(\text{air})}$**

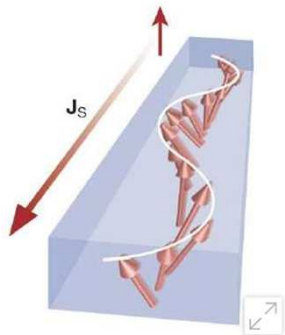
**Comparaison :** autres techniques d'exaltation de décalage GH

**Sensibilité :**  $10^6$   $\mu\text{m}$  par unité de  $\epsilon$  mais non accordable

T. Tang *et al.*, *Appl. Phys. B* **122**, 167 (2016) ;

Y. Nie *et al.*, *Opt. Express* **22**, 8943 (2014)

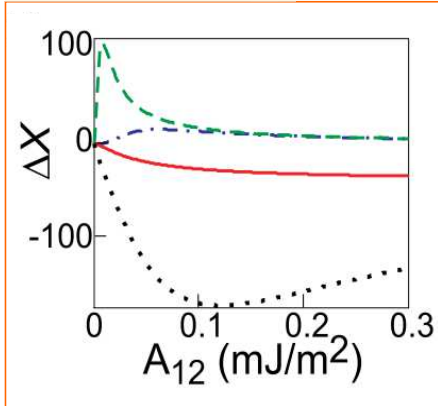
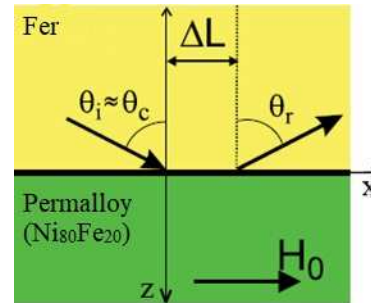
# 1. Effets non-spéculaires – ondes de spin



Réflexion interne totale d'une onde de spins à l'interface entre deux milieux ferromagnétiques

Angle critique :  $\theta_c \approx 62,965^\circ$

Longueurs d'onde  $\lambda = (20 - 60)$  nm



Dépendance du décalage GH réduit  $\Delta X = \Delta L / \lambda$  vis-à-vis de la constante d'échange  $A_{12}$  pour  $\theta_i = 62,95^\circ, 62,96^\circ, 62,97^\circ$  et  $88,20^\circ$

Possibilité de l'effet GH pour les ondes de spin montrée pour la première fois

Yu. S. Dadoenkova *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 042404 (2012)

Équation de Landau-Lifshitz

$$\frac{i\omega}{\gamma\mu_0} \mathbf{m}_k(\mathbf{r}) = [\mathbf{m}_k(\mathbf{r}) + M_{S,k} \hat{x}] \wedge \mathbf{H}_{eff,k}$$

Conditions de passage (Hoffmann)

$$\frac{A_k}{M_{S,k}} \frac{\partial \mathbf{m}_k}{\partial z} + A_{12} \left( \frac{\mathbf{m}_k}{M_{S,k}} - \frac{\mathbf{m}_j}{M_{S,j}} \right) = 0$$

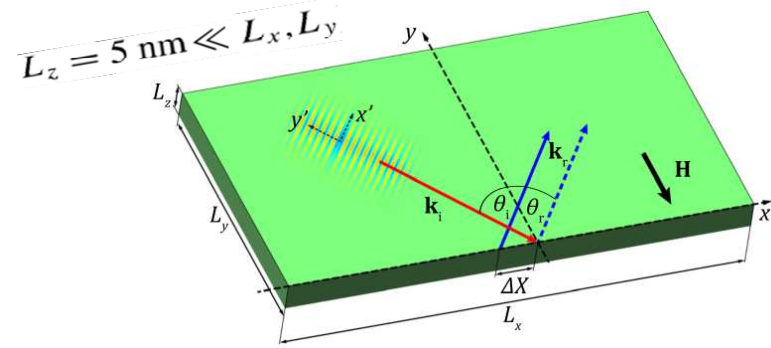
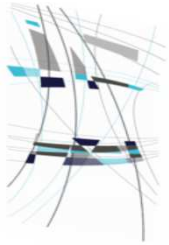
$j, k = \text{fer, permalloy}$

$A_{12}$  : constante d'échange intercouche  
Échange ferromagnétique :  $A_{12} > 0$

Le décalage GH a lieu lorsque

$$A_{12} \neq 0$$

# 1. Effets non-spéculaires – ondes de spin



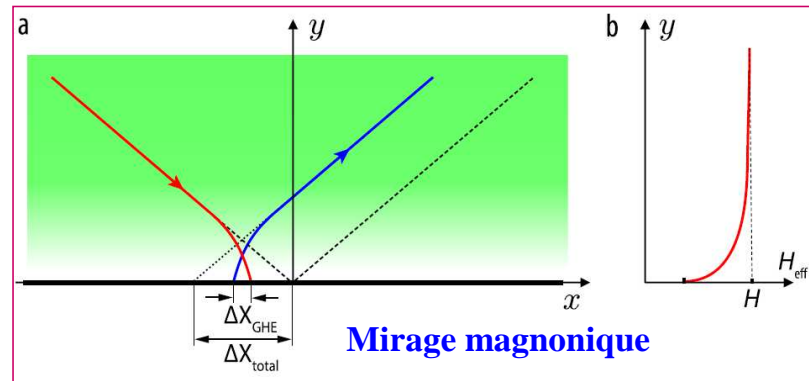
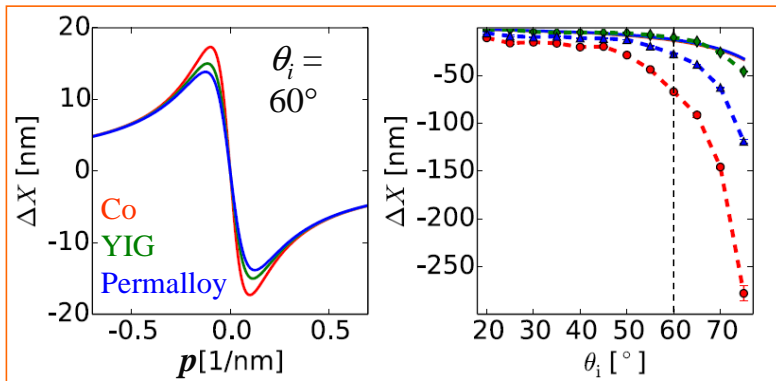
Conditions de passage (Rado-Weertman)

$$\left[ \frac{\partial m(y)}{\partial y} + p m(y) \right]_{y=0} = 0$$

$$\Delta X = \frac{-2p \tan \theta_i}{p^2 + (k \cos \theta_i)^2}$$

$p$  : paramètre d'épinglage  
(dépend de l'épaisseur de la couche, de l'anisotropie de surface...)

- $p = 0$  spins totalement libres
- $p = \pm \infty$  spins totalement épinglés au bord de la couche



Mirage magnétique

P. Gruszecki *et al.*,  
*Appl. Phys. Lett.*  
105, 242406 (2014)



# 2. Cristaux photoniques-magnoniques

CRISTAL PHOTONIQUE :  
couches alternées avec différents *indices de réfraction*

CRISTAL MAGNONIQUE :  
couches alternées avec différentes *propriétés magnétiques*

ondes électromagnétiques (*photons*)

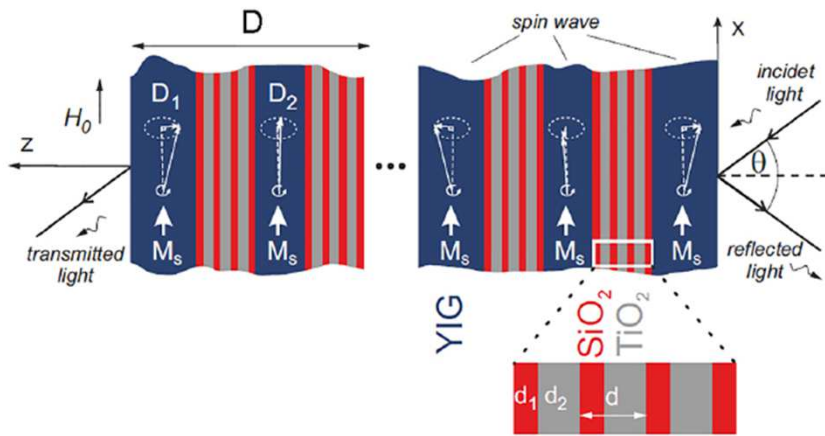
Bandes interdites dans les spectres des...

ondes de spin (*magnons*)

PHz (proche IR)

GHz

Applications : *filtres optiques et magnoniques, commutateurs...*



CRISTAL PHOTONIQUE-MAGNONIQUE  $[M(AB)^N A]^K M$

A, B : couches diélectriques de  $TiO_2$  et de  $SiO_2$

M : couche magnétique de YIG

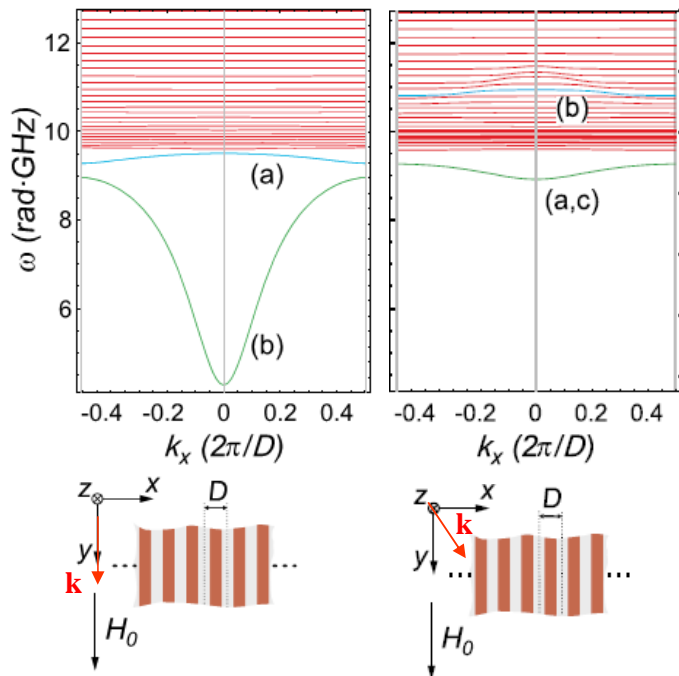
N cellules unitaires diélectriques dans chaque couche intercalaire non magnétique

K cellules unitaires magnétiques

$D_{YIG} = 7 \mu m$      $d = 1,9 \mu m$

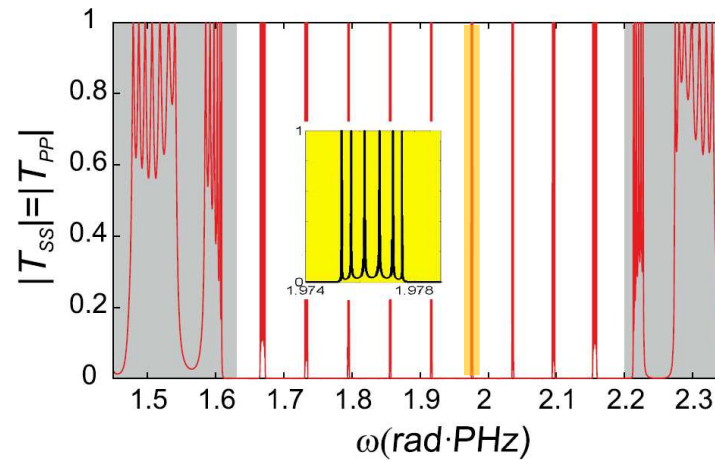
# 2. Cristaux photoniques-magnoniques

## DISPERSION DES ONDES DE SPIN (structure infinie)



## SPECTRE DE TRANSMITTIVITÉ DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Structure finie  $[M(AB)^N A]^K M$  pour  $K = 7, N = 7$

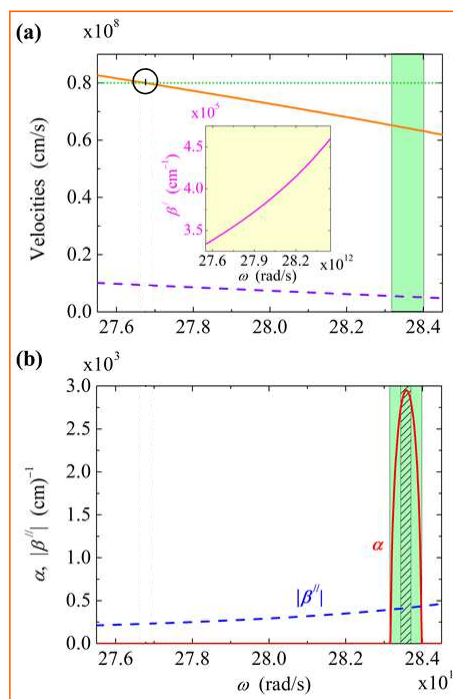
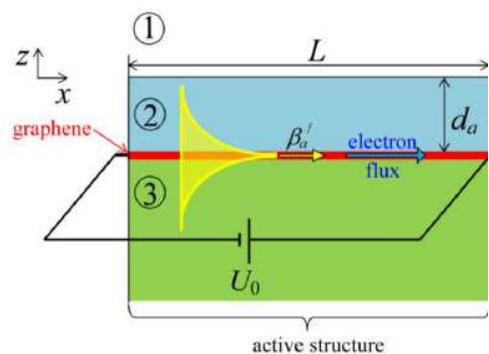


Modes à l'intérieur de la bande interdite dans les spectres de transmittivité :  $(K - 1)$  sous-pics

- J. W. Klos *et al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 174311 (2014)
- J. W. Klos *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 2504404 (2014)
- Yu. S. Dadoenkova *et al.*, *J. Appl. Phys.* **120**, 073903 (2016)

# 3. Amplification de plasmons polaritons de surface par un courant électrique

## COUCHE SEMI-CONDUCTRICE + GRAPHÈNE : AMPLIFICATION SIMPLE-PASSAGE



### Dispersion spectrale de

- (a) vitesse de phase  $V_{ph}$  du PPS
- vitesse de groupe  $V_g$  du PPS
- vitesse  $V_0$  du courant de dérive
- constante de propagation  $\beta'$  du PPS
- (b) coefficient d'amplification  $\alpha$
- valeur absolue du coefficient de perte  $|\beta''|$

**Cercle :**  $V_{ph} = V_0$  (synchronisme)

**Zone verte :** régime d'amplification  $\alpha > |\beta''|$   
sur gamme de largeur  $\Delta\omega_\alpha \approx 0,08 \cdot 10^{12}$  rad/s

**Zone hachurée :** régime d'amplification résonante en cavité distribuée (voir transparent suivant)

I. O. Zolotovskii et al., *Ann. Phys.* **529**, 1700037 (2017)

Le champ électrique du PPS module l'amplitude du courant électrique

Influence mutuelle du champ électrique du PPS et du courant électrique → dépendance conjointe de leurs amplitudes

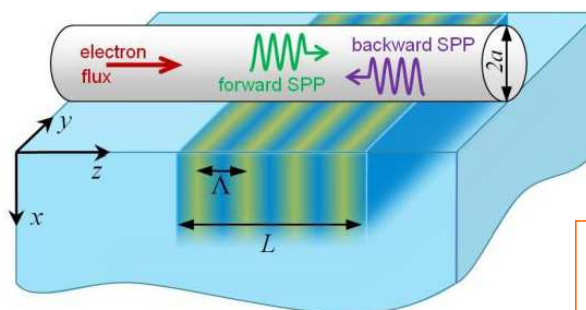
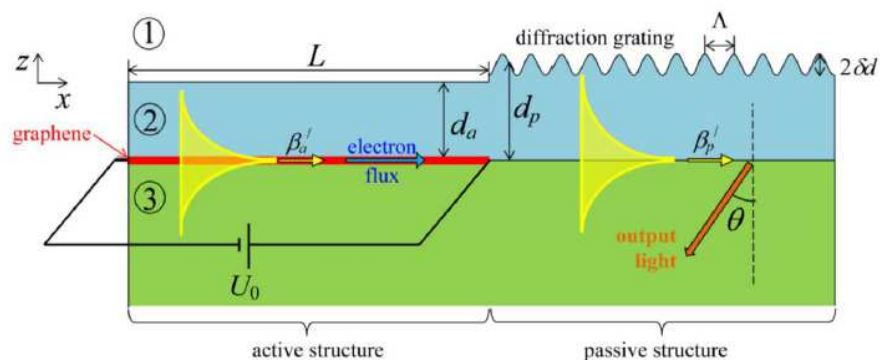
**Amplification du PPS :** la vitesse de phase du PPS doit être égale à la vitesse de dérive des porteurs de charge (condition de synchronisme)

→ PPS lent : couche semiconductrice

→ Électrons rapides : graphène, nanotube de carbone

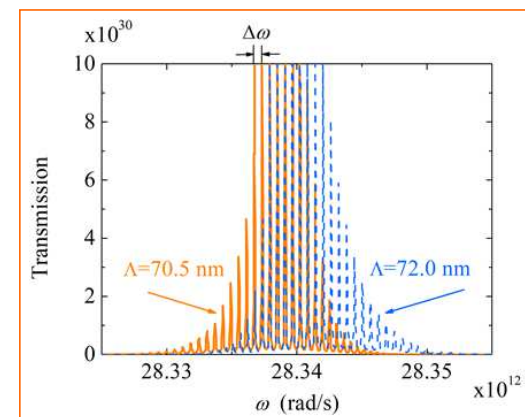
# 3. Amplification de plasmons polaritons de surface par un courant électrique

## COUCHE SEMI-CONDUCTRICE + GRAPHÈNE : AMPLIFICATION RÉSONANTE



Application potentielle : laser à plasmons polaritons de surface (spaser)

Phys. Rev. A **97**, 053828 (2018)  
Ann. Phys. (Berlin) **530**, 1800197 (2018)



Le champ électrique du PPS module l'amplitude du courant électrique

Influence mutuelle du champ électrique du PPS et du courant électrique → dépendance conjointe de leurs amplitudes

Amplification du PPS : la vitesse de phase du PPS doit être égale à la vitesse de dérive des porteurs de charge (condition de synchronisme)

- PPS lent : couche semiconductrice
- Électrons rapides : graphène, nanotube

Évolution du coefficient de transmission  $T$  avec la fréquence angulaire  $\omega$  et la période  $\Lambda$

# Merci pour votre attention !

## MES COLLABORATEURS :

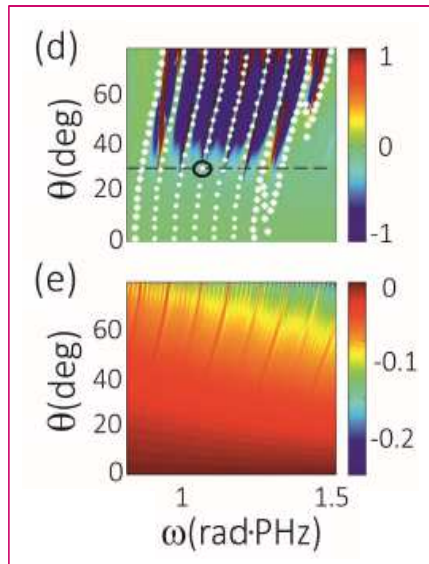
Florian BENTIVEGNA (Lab-STICC, ENIB)  
Yann BOUCHER (FOTON, ENIB)  
Igor GLUKHOV (ENIB + U. d'Etat d'Ulyanovsk, Russie)  
Maciej KRAWCZYK (U. De Poznan, Pologne)  
Igor LYUBCHANSKII (Institut Physique et Technologique de Donetsk, Ukraine)

Igor ZOLOTOVSKII † (U. d'Etat d'Ulyanovsk, Russie)  
Sergey MOISEEV (U. d'Etat d'Ulyanovsk, Russie)  
Dmitry SANNIKOV (U. d'Etat d'Ulyanovsk, Russie)  
Mirza BICHURIN (U. d'Etat de Novgorod, Russie)

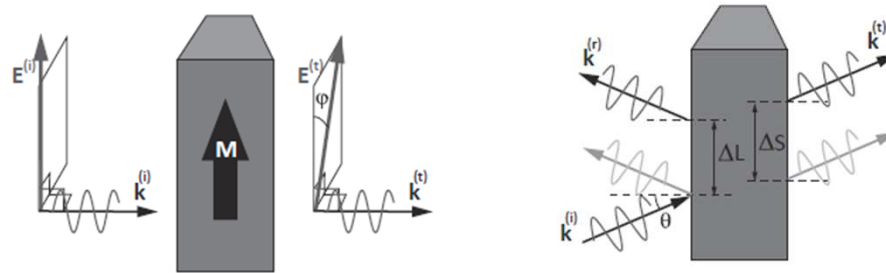




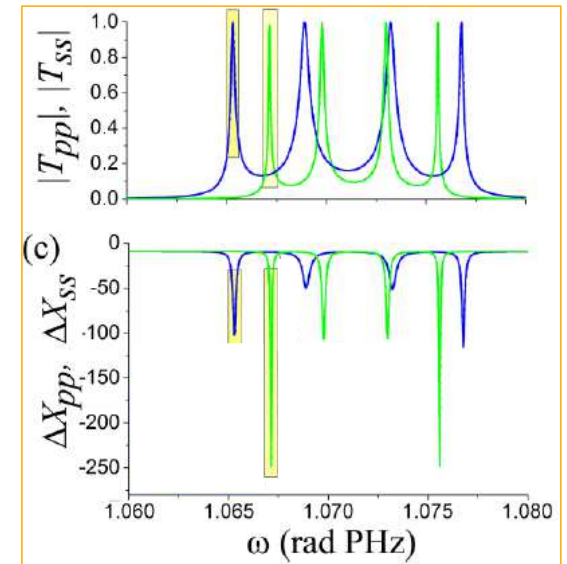
# 2. Cristaux photoniques-magnoniques



## EFFETS FARADAY ET GOOS-HÄNCHEN



J. Klos et al., in *Optomagnonic Structures: Novel Architectures for Simultaneous Control of Light and Spin Waves*, ed. E. Almpanis (World Scientific, 2021)



**Angles de rotation Faraday  $\phi_s$**  dans la bande interdite dans les structures (d)  $[M(AB)^4A]^5M$  et (e)  $[MA]^5M$

Lignes pointillées : positions des bords de la bande interdite et des modes à l'intérieur de la bande interdite

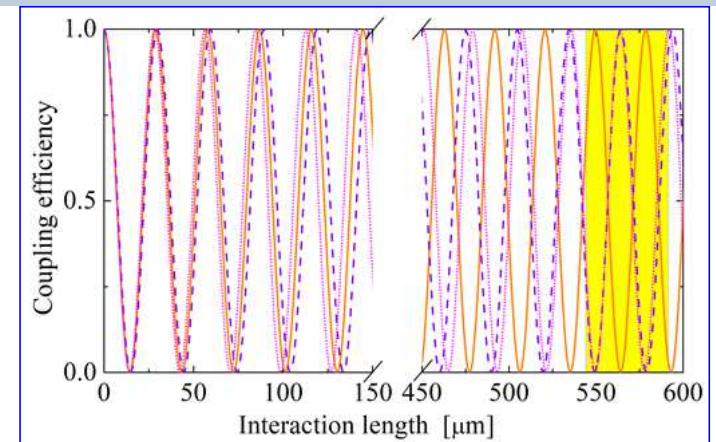
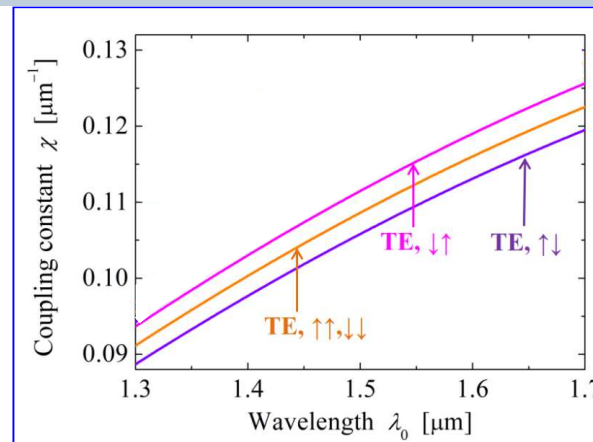
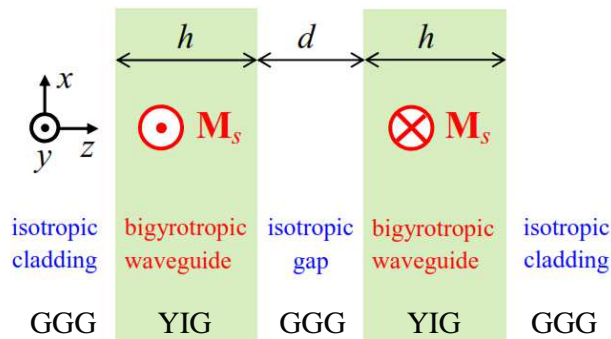
Interaction entre les ondes électromagnétiques et les ondes de spin dans un cristal photonique-magnonique

P. A. Pantazopoulos et al., *Phys. Rev. B* **96**, 104425 (2017)

**Transmittivité et décalage GH** dans la bande interdite dans la structure  $[M(AB)^4A]^5M$

Angle d'incidence :  $\theta = 30^\circ$

# 4. Guides d'ondes magnétiques couplés



Quatre configurations magnétiques :

- deux **parallèles**  
(« haut-haut » et « bas-bas »)
- deux **anti-parallèles**  
(« haut-bas » et « bas-haut »)

**Idee : contrôler les supermodes du système couplé en commutant l'aimantation dans l'un des guides d'ondes**

**Dispersion modale de la constante de couplage** ( $\chi = \pi/(2L_c)$ ,  $L_c$  est la distance sur laquelle la puissance transportée par un guide est totalement transférée dans l'autre) pour  $h = 0,75 \mu\text{m}$  et  $d = h/4$

Y. G. Boucher *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.* **54**, 6200208 (2018)

**Efficacité de couplage vs longueur d'interaction pour le mode TE dans les configurations parallèle ↑↑ et antiparallèle ↓↓ et ↓↑**

Région jaune : longueur d'interaction pour laquelle un excellent contraste de transmission peut être obtenu entre les configurations ↑↑ et ↓↓, ↓↑