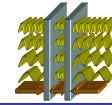


Objectifs du projet

- Compréhension et modélisation des phénomènes physiques intervenants à l'échelle nanométrique
 - Développement de modèles simplifiés pour la simulation des phénomènes physiques à l'échelle submicronique
 - Étude de l'effet Casimir et des transferts radiatifs en champ proche dans des cas réels (conductivité du matériau, rugosité, géométrie)
- Mesure et quantification de ces phénomènes
 - Mise au point de méthodes expérimentales originales et d'outils de caractérisations très sensibles
 - Fabrication de structures de tests spécifiques
- Mise au point de logiciels d'aide à la conception spécifiques aux nano structures mécaniques



La Force de Casimir

Publications récentes :
 - A. Lambrecht and V.N. Marachevsky, *Phys. Rev. Lett.* 101, pp. 160403 (2008)
 - A. Lambrecht, *Nature* 454, pp. 836 (2008)

H.B.G Casimir dérive en 1948 l'énergie d'interaction entre deux plaques parfaitement conductrices de surface A à une distance L :

$$E_{Cas} = -\frac{\hbar c \pi^2}{720 L^3} A$$

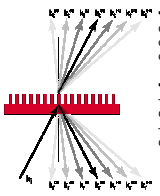
Formulation générale de l'énergie de Casimir

Pour deux surfaces réelles, une formule générale donne l'énergie de Casimir en fonction des matrices de réflexion R_1 et R_2 des deux surfaces :

$$E_{Cas} = \frac{\hbar c A}{8\pi^3} \int_0^\infty d^2k \int_0^\infty d\xi \sum_p \ln \det [1 - R_1(\xi) e^{-\kappa L} R_2(\xi) e^{-\kappa L}]$$

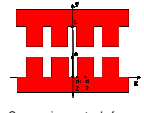
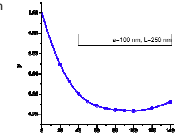
k est le vecteur d'onde transverse, ξ la fréquence imaginaire ($i\xi = \omega$), $\kappa = \sqrt{k^2 + \xi^2}$ et la somme est sur les polarisations p-TE, TM.

Application : surface de silicium nanostructurée



- La matrice de réflexion est calculée pour un réseau de Silicium dont les hauteurs et espacements des corrugations sont arbitraires.
- Les champs sont développés :
 - en séries de Fourier pour tenir compte de la périodicité du réseau.
 - en séries de Rayleigh pour tenir compte des diffractions multiples.

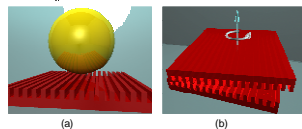
Interaction entre deux réseaux



Comparaison entre la force calculée et l'approximation de proximité pour différentes épaisseurs de corrugations.

Généralisation à des géométries arbitraires

- Interaction entre deux réseaux ayant des géométries différentes
- Force latérale apparaissant pour deux réseaux « décalés »
- Interaction réseau-plan (e.g. hauteur des corrugations nulle)
- Interaction réseau-sphère (Fig. (a))
- Différents matériaux (silicium, or, etc...)
- Couple de rotation (Fig. (b))

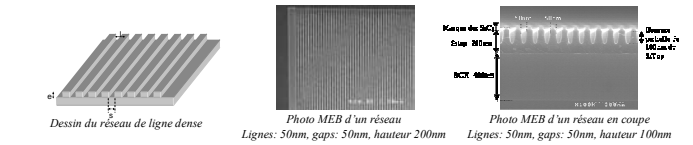
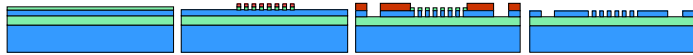


Fabrication de structures de tests

Réseaux de lignes denses pour la mesure des effets diffractifs sur des surfaces nanostructurées

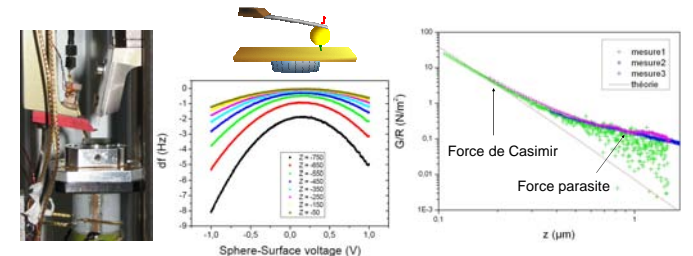
- Homogénéité de gravure sur un wafer 200mm
- Photolithographie mixte e-beam/DUV

l (nm)	s (nm)	e (nm)	Puce
30	70	10, 100 et 200	100 x 100µm²
50	50		



Caractérisation des forces de casimir

L'Institut Néel a développé un outil spécifique pour caractériser la force de Casimir entre une surface d'or et une surface quelconque (métal, semiconducteur, nanostructure). Les atouts de cet appareil sont d'une part le refroidissement cryogénique à la température de 4,2 K permettant de supprimer les dérives thermiques en distance et d'augmenter la sensibilité de mesure en force, et d'autre part l'intégration d'un système de déplacement dans le plan de la surface permettant d'opérer des mesures différentielles sur des surfaces inhomogènes.



Les mesures effectuées ont démontré la grande précision de la méthode de calibration électrostatique de la distance absolue et du facteur de conversion en force. Les résultats obtenus sur la mesure de la force résiduelle montrent que la force de Casimir observée à courte distance devient masquée à partir de 300 nm par une force parasite à plus longue portée dont l'origine est encore mal comprise (électrostatique, fluide, optique).

Les mesures différentielles en cours de développement devraient permettre d'analyser ce phénomène parasite et d'étudier la force de Casimir sur des surfaces aux propriétés technologiques intéressantes comme le silicium

Mesure du flux thermique radiatif à l'échelle du nanomètre

Emmanuel Rousseau¹, Alessandro Siria^{2,3}, Guillaume Jourdan⁴, Sebastian Volz^{2,1}, Fabio Comin⁴, Joël Chevrier² and Jean-Jacques Greffet¹.
¹Unité d'optique ²Institut Néel ³CEA/LETI MINATEC ⁴ESRF ⁵EM2C-CNRS École Centrale Paris

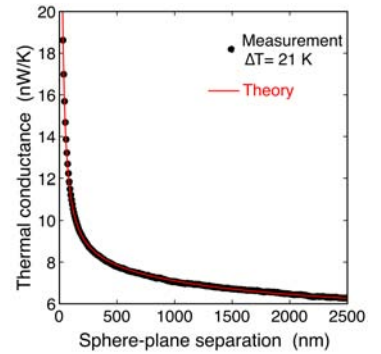
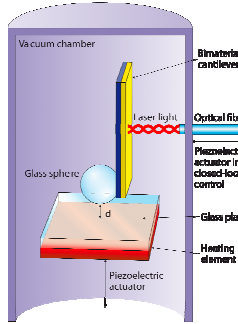


Schéma de l'expérience: Le flux radiatif est mesuré entre une sphère et un plan en verre. Le plan est chauffé et monté sur un élément piézoélectrique. Le flux est mesuré à l'aide d'un bilame par méthode interférométrique. Schéma d'après [4].

Évolution de la conductance thermique en fonction de la distance: La conductance thermique (flux radiatif divisé par la différence de température) a été mesurée en fonction de la distance (points noirs). En rouge a été superposée la prédiction théorique.

Des prédictions théoriques [1] datant des années 70 prédisent que le flux radiatif échangé entre deux plans peut dépasser de plusieurs ordres de grandeur le flux calculé avec la loi du rayonnement de corps noir lorsque les distances sont inférieures à une centaine de nanomètres. Plus récemment, il a été prédit [2] que la contribution des phonons polaritons peut exalter notablement ce flux pour des matériaux polaires. Nos mesures qui viennent d'être publiés [3] sont en accord quantitatif avec ces prédictions.

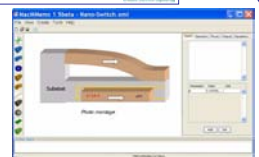
Le plan est chauffé tandis que la sphère reste à température ambiante. Un moteur piézoélectrique approche le plan de la sphère. La distance entre les deux varie de 5 µm à 30 nm. Le transfert radiatif est mesuré à l'aide d'un bilame. La déformation du bilame est mesurée par méthode interférométrique en utilisant un dispositif expérimental développé par l'Institut Néel pour la mesure de la force de Casimir.

[1] Polder D., Van Hove M. Theory of Radiative Heat Transfer between Closely Spaced Bodies. *Phys. Rev. B* 4, 3303-3314 (1971).
 [2] Mulet J.P. et al., Nanoscale radiative heat transfer between a small particle and a plane surface, *APL* 78, 2931 (2001)
 [3] E. Rousseau, A. Siria, G. Jourdan, S. Volz, F. Comin, J. Chevrier, J.J. Greffet, Radiative heat transfer at the nanoscale, DOI: 10.1038/NPHOTON.2009.144
 [4] A. Kittel, Probing near-field thermal radiation, *News & View Nature Photonics*, 3 (2009)

Outils de simulation NEMS

Nano-Switch à actionnement magnétique

- Application: Interrupteur d'alimentation, Convertisseur DC/DC...
- Principe: La poutre en aimant (ou en ferromagnétique) déformée sous le champ d'un autre aimant, créé un contact mécanique.
- Modélisation: Couplage Magnéto-Structural avec l'ajout de la force de Casimir

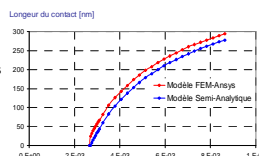


Outils de Couplage Magnéto-Structural

- FEM: Ansys, Comsol => générique mais calculs longs, inadaptés à l'optimisation.
- Semi Analytique: MacMMems => rapide mais spécifique, adapté à l'optimisation

MacMMems: Logiciel de modélisation pour l'optimisation de microsystèmes magnétiques

- Calcul de champ, forces et couples sur des aimants, conducteurs, ferro et diamagnétiques
- Validation par Flux2D/3D, résultats fiables, beaucoup plus rapides et moins bruyés
- Facilité d'ajouter des équations (telle que la force de Casimir...)
- Dédié à faire de l'optimisation sous contraintes (calcul formel de la sensibilité)

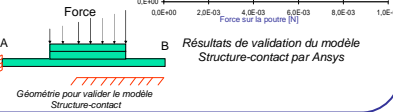


Objectif : Développement et intégration des déformations de structure dans MacMMems

Modèle structural semi-analytique de la poutre

Calcul déformation et contact :

- Spécificité du magnétisme : distribution de force et couple
 - répartition en forces ponctuelles
 - principe de superposition
- Méthode itérative pour trouver la longueur du contact
- Validation le modèle de contact par Ansys



Contacts

CEA/LETI - MINATEC: B.Reig (coordinateur)
 bruno.reig@cea.fr, tél: 04 38 78 25 04

Institut Néel: J. Chevrier
 joel.chevrier@grenoble.cnrs.fr

ENS/LKB: A. Lambrecht
 astrid.lambrech@spectro.jussieu.fr

ECP/EM2C: J.J. Greffet
 greffet@em2c.ecp.fr

CEDRAT: V. Leconte
 Vincent.leconte@cedrat.com