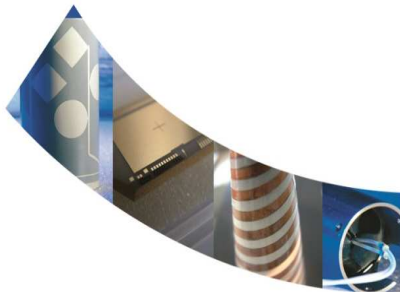


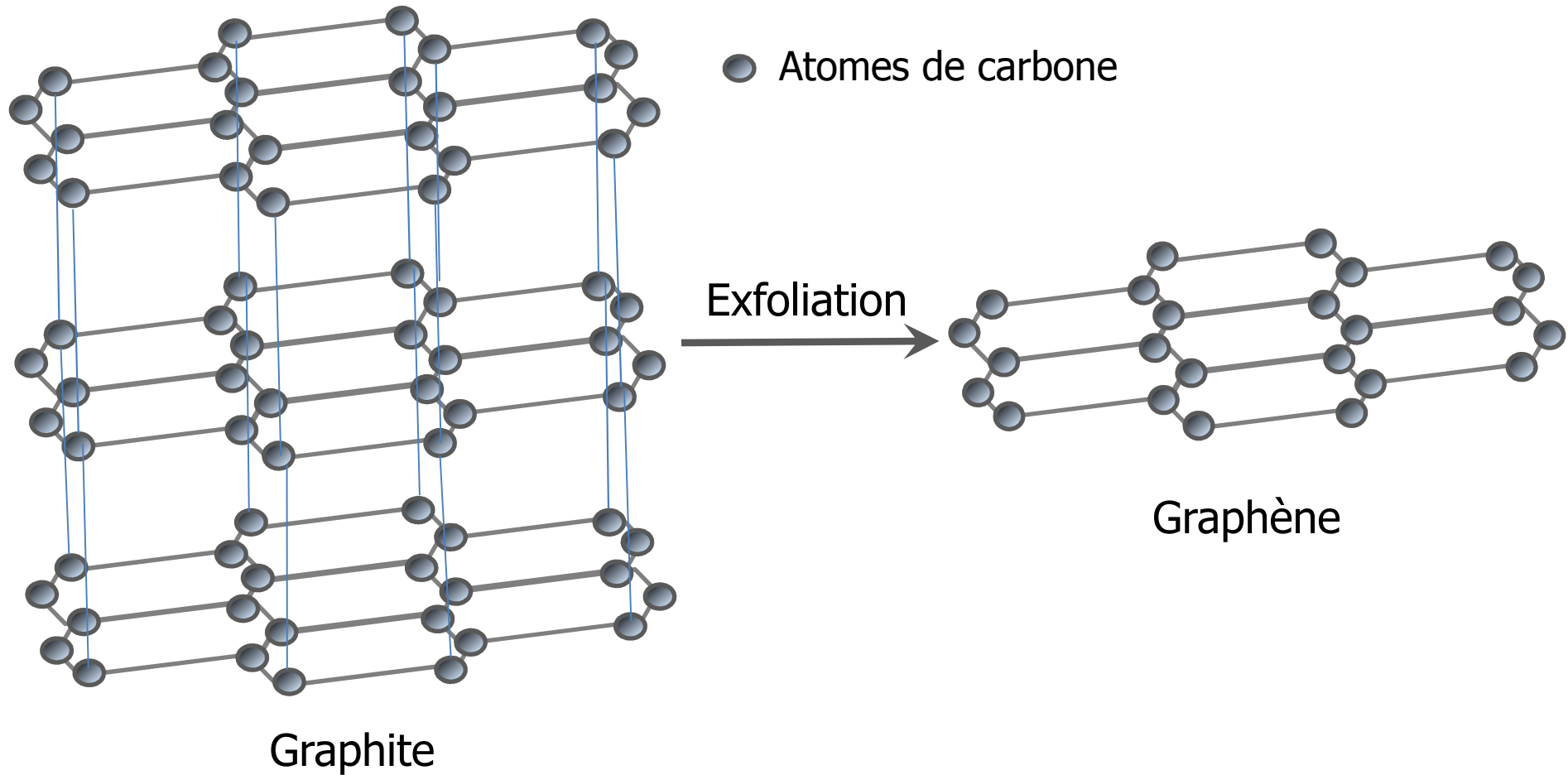


 **Jacquelot PE**

Matériaux thermiquement conducteurs : Le graphène



Définition du Graphène



Conductivités thermiques de matériaux conducteurs

Type de charges	Conductivité thermique à 25 C (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
Graphite	100 – 400
Noir de Carbone	6 - 174
Nanotubes de Carbone (NTC)	2000 - 6000
Graphène	1500 – 5000
Nitrure de Bore	250 – 300
Nitrure d'Aluminium	200
Cuivre	483
Argent	450
Or	345

=> Graphène et NTC : Très haute conductivité thermique



Conductivités thermiques de polymères standards

Polymère standard	Conductivité thermique à 25 C (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
Polypropylène	0.11
Polyméthylmethacrylate	0.21
LD polyéthylène	0.30
HD polyéthylène	0.44
ABS	0.33
Polydiméthylsiloxane	0.25
Poly(éthylène vinyl acétate)	0.35

=> Très faibles conductivités thermiques des matrices polymères



Principe de la conductivité thermique des polymères

Mécanisme primaire de transfert de chaleur dans les polymères : Phonons

Equation de Debye :

$$\lambda = C_p v l / 3$$

C_p : Chaleur spécifique par unité de volume

v : Vitesse moyenne des phonons

l : libre parcours moyen des phonons

$$l_{\text{polymère amorphe}} < l_{\text{polymère semi-cristallin}}$$



Estimation de la conductivité thermique de composites (1/2)

Deux modèles extrêmes basiques:

- Modèle parallèle ou des mélanges :

$$\lambda_c = \lambda_p \Phi_p + \lambda_m \Phi_m$$

=> Contact parfait entre les particules dans un réseau percolé

- Modèle série:

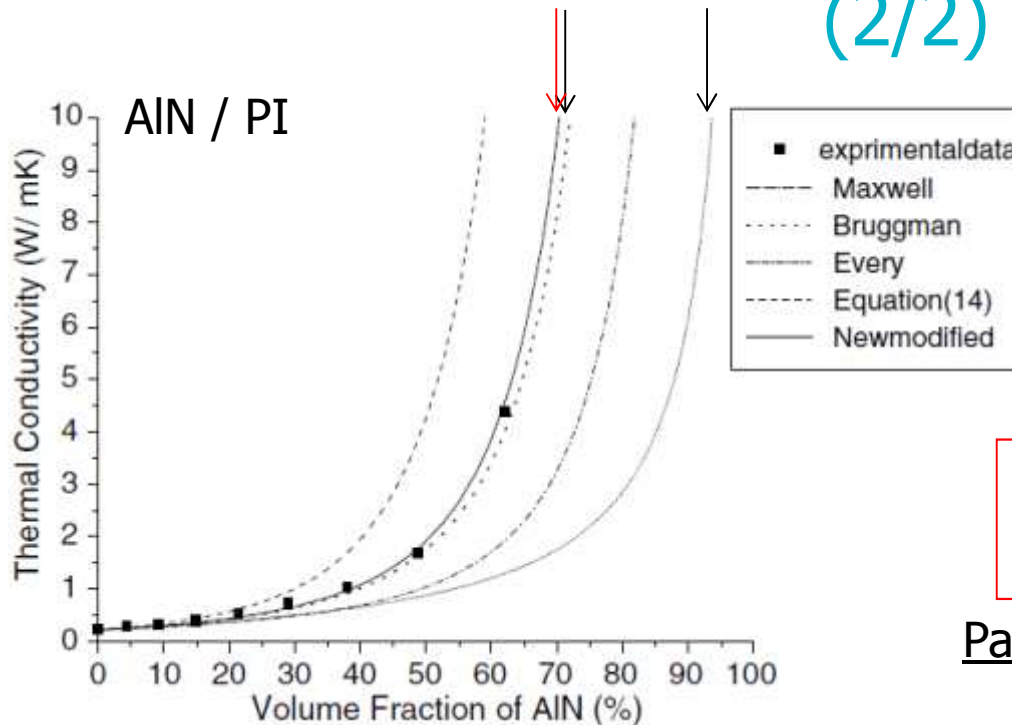
$$\lambda_c = 1 / ((\Phi_m / \lambda_m) + (\Phi_p / \lambda_p))$$

=> Aucun contact entre les particules

=> Nécessité d'étudier les résistance interfaciales et de contact



Estimation de la conductivité thermique de composites (2/2)



Jiajun W. (2004)

$$\lambda_c = \lambda_m \frac{\lambda_p + 2\lambda_m - 2\phi_p(\lambda_m - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_m + \phi_p(\lambda_m - \lambda_p)}$$

$$1 - \phi_p = \lambda_m \frac{\lambda_p - \lambda_c}{\lambda_p - \lambda_m} \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_c} \right)^{1/3}$$

$$(1 - \phi_p)^n = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_c} \right) \left(\frac{\lambda_c - \lambda_p(1 - \alpha)}{\lambda_m - \lambda_p(1 - \alpha)} \right)^n$$

Paramètre d'interface

$$\alpha = \frac{R_B \lambda_M}{a}$$

R_B : Résistance thermique interfaciale

Facteur de forme

n

$n=3$ pour des sphères



Composites Polymère / Nanotubes de carbone (NTC)

Nanotubes de carbone

2000 – 6000 W.m⁻¹.K⁻¹

Matrice	Nature des NTC	Pourcentage NTC	Conductivité thermique des composites (W/m ⁻¹ K ⁻¹)
Epoxy	MWNTC ⁽³⁾	6% en poids	0,8
Epoxy	MWNTC revêtus silice ⁽¹⁾	1% en poids	0,243
Epoxy	MWNTC greffé acide benzenetricarboxylique ⁽¹²⁾	5% en poids	0,96
PVDF	SWNTC ⁽³⁾	10% vol.	1,02
PMMA	SWNTC ⁽²⁾	9% vol.	0,5

- Agrégation des NTC en colliers ou en paquets
- Résistance thermique interfaciale causée par l'incohérence des phonons.



Composites Polymère / Graphène

Graphène

1500 – 5000 W.m⁻¹K⁻¹

Matrice	Nature du graphène	Pourcentage de graphène	Conductivité thermique des composites (W/m ⁻¹ K ⁻¹)
Epoxy	Nanoplaquettes de graphène (GNP)/NTC ⁽⁴⁾	25% vol. NTC et 25% vol. GNP	7,3
Epoxy	Flocons de graphène fonctionnalisé de façon non covalente ⁽⁹⁾	10 % en poids	1,53
Epoxy	Nanofeuilles de Py-PGMA-graphène ⁽¹⁰⁾	4 %vol.	1,91
Epoxy	Graphène multicouche / graphène ⁽⁸⁾	10 %vol.	5,1
PEG	Graphène sulfoné ⁽⁷⁾	4 %vol.	1,42

- Bonne conductivité thermique quand mélangé avec des NTC
- Quand le pourcentage de graphène augmente, bonne conductivité thermique



Composites Polymère / Graphène

Patent No.: **US 7,999,027 B2**

Date of Patent: **Aug. 16, 2011**

PRISTINE NANO GRAPHENE-MODIFIED TIRES

Inventors: **Aruna Zhamu**, Centerville, OH (US);
Bor Z. Jang, Centerville, OH (US)

Assignee: **Nanotek Instruments, Inc.**, Dayton, OH (US)

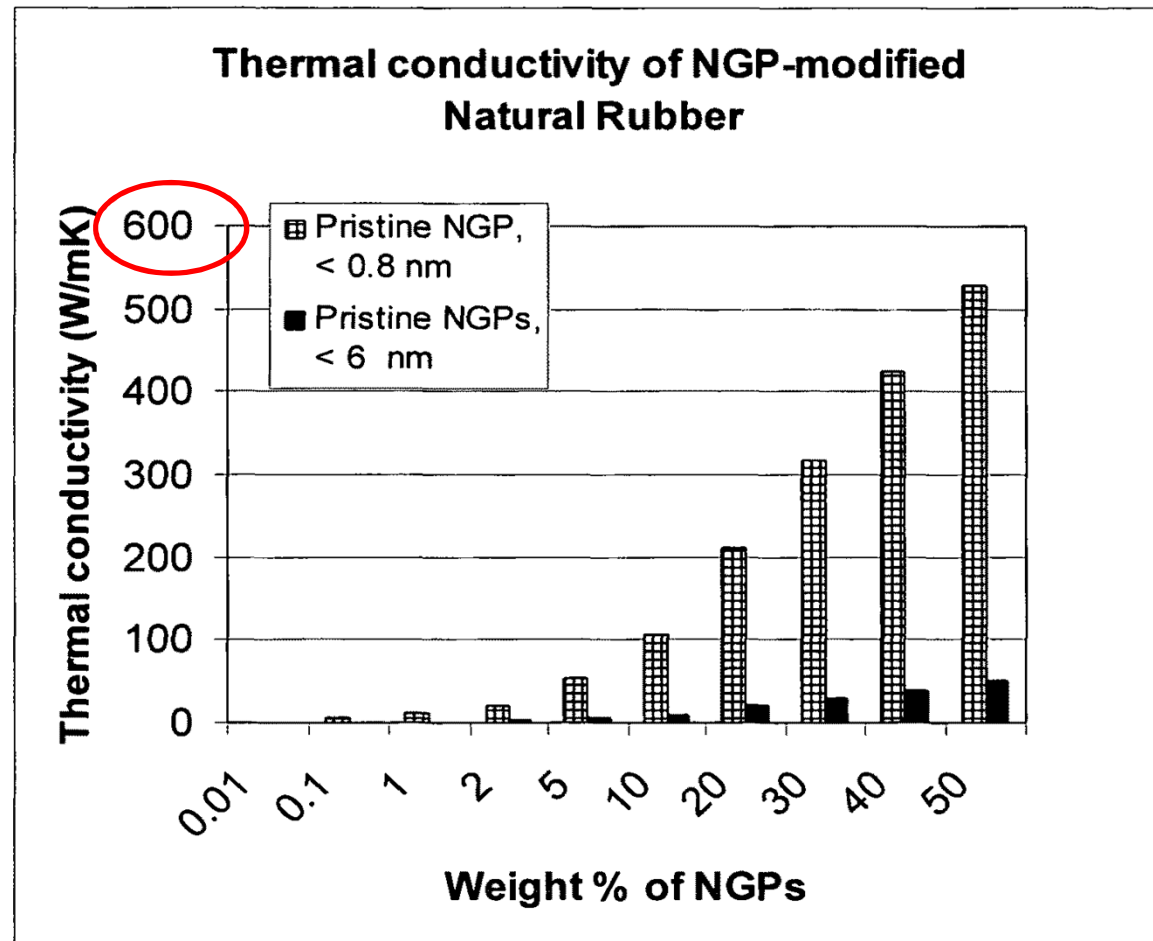
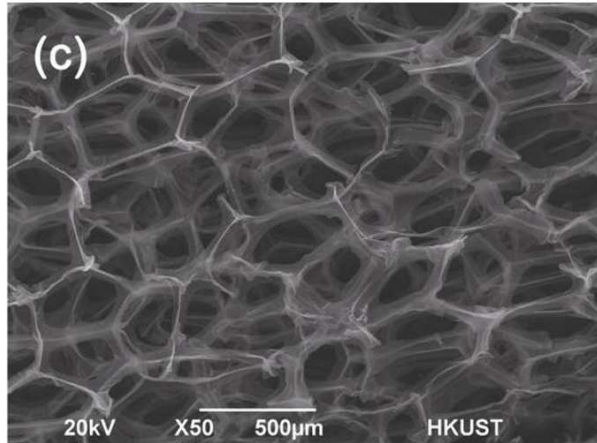


FIG. 3



Mousses de graphène



Zhang X., 2014, carbon, Exceptional thermal interface properties of a three-dimensional graphene foam

Conductivité des mousses de graphène = $120-150 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Avantages :

- Elimination de la résistance thermique interfaciale
- Dissipation de chaleur en 3D
- Flexibilité
- Facilité de mise en œuvre (Procédé CVD)
- Contrôle de l'épaisseur

Désavantages :

- Conductivité électrique
- Fragilité (pression = 230 kPa)



Perspectives

- Utilisation de composites hautes performances thermiques pour la réalisation de gap-pads, gapfillers, graisses thermiques
- Dispositifs hyperfréquences de haute puissance tels que les amplificateurs
=> Réalisation de plan de masse et/ou dépôt sur le packaging (boîtier)
(résistivité = 10 nOhm.m)
- Utilisation de mousses de graphène pour réaliser des substrats ferromagnétiques => Fonctionnalisation du graphène avec des groupements nitrophényles⁽⁵⁾ => Mousse de graphène ferromagnétique
-



Bibliographie

- (1) Cui W. and al., 2011, Improving thermal conductivity while retaining high electrical resistivity of epoxy composites by incorporating silica-coated multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 49, 495-500.
- (2) Guthy C. and al., Thermal conductivity of single-walled carbon nanotube/PMMA nanocomposites, 2007, *Journal of heat transfer*, 129, 1096-1099.
- (3) Han Z. and al., Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites, 2011, *Progress in polymer science*, 36, 914-944.
- (4) Huang XY and al., Toward effective synergetic effects from graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on thermal conductivity of ultra high volume fraction nanocarbon epoxy composites, 2012, *Journal of physics and chemistry C*, 116, 23812-23820.
- (5) Hong J. and al., Chemically engineered graphene-based 2D organic molecular magnet, 2013, *ACS nano*, 7, 10011-10022.
- (6) Jiajun W. and al., Effects of interfacial barrier resistance and particle shape and size on the thermal conductivity of AlN/PI composites, 2004, *Composites science and technology*, 64, 1623-1628.



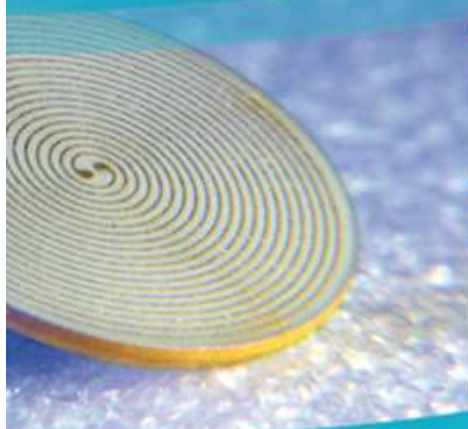
- (7) Li H. and al., Aqueous preparation of polyethylene glycol/sulfonated graphene phase change composite with enhanced thermal performance, 2013, Energy conversion and management, 75, 482-487.
- (8) Shahil K.M.F. and al., Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials, 2012, Solid State Communications, 152, 1331-1340.
- (9) Song S.H. and al., Enhanced thermal conductivity of epoxy-graphene composites by using non-oxidized graphene flakes with non-covalent functionalization, 2013, Advanced Materials, 25, 732-737.
- (10) Teng C-C. and al., Thermal conductivity and structure of non-covalent functionalized graphene/epoxy composites, 2011, Carbon, 49, 5107-5116.
- (11) Wang H., Reducing thermal contact resistance using a bilayer aligned CNT thermal interface material, 2010, Chemical Engineering Science, 65, 1101-1108.
- (12) Yang S.Y. and al., Effect of functionalized carbon nanotubes on the thermal conductivity of epoxy composites, 2010, carbon, 48, 592-603.
- (13) Zhang X. and al., Exceptional thermal interface properties of a three-dimensionel graphene foam, 2014, Carbon, 66, 201-209.



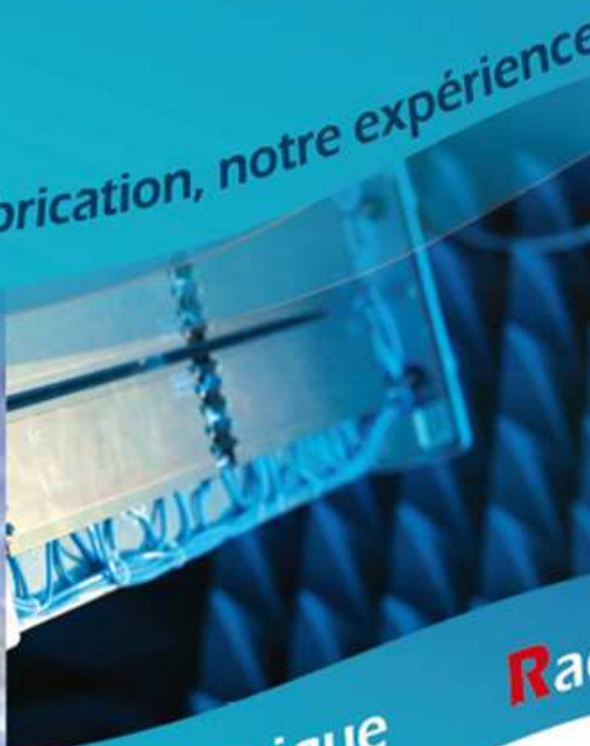
Qualité **Haute** Créativité et innovation

Moyens techniques importants
Expertise technique variée

De l'étude à la fabrication, notre expérience au service de votre performance.



Mécanique



Électronique



Radiofréquence



Intégration

 **Jacquelot PE**

Ingénierie et Production