

Rapport de DEA :

Etude des potentialités hyperfréquences des nanotubes de carbone

Responsables : Katia Grenier et David Dubuc

Résumé :

A ce jour, les nanotubes de carbone paraissent extrêmement prometteurs en terme d'intégration, de performances, de coûts... Beaucoup d'études et d'expériences en continu ou en basses fréquences ont été menées. De façon surprenante, très peu d'équipes de recherche se sont orientées vers des applications hautes fréquences.

Ce stage intitulé « étude des potentialités hyperfréquences des nanotubes de carbone » constitue le départ de la recherche sur le thème nanotubes de carbone pour l'équipe CISHT (Composants et Intégration de Systèmes Hyperfréquences pour Télécommunications) du LAAS-CNRS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes). Au terme de cette étude (programmé dans trois ans), le but est d'intégrer des nanotubes de carbone dans des NEMS (Nano ElectroMechanical Systems) en tant que circuits passifs (déphaseurs, antennes, filtres...) et parties mobiles (interrupteurs HF).

Le travail effectué au cours de ce stage a porté sur plusieurs aspects de cette étude :

- Dans un premier temps, il a fallu modéliser un nanotube de carbone en terme de transport en hautes fréquences. Le modèle obtenu a permis de concevoir, en parallèle des contraintes technologiques, un dispositif permettant leur caractérisation (de 1 à 110 GHz). Une méthode d'extraction des paramètres du modèle à partir des mesures a été également mise au point.
- Les premières étapes technologiques ont été réalisées, mais malheureusement, la fermeture de la salle blanche du LAAS nous a empêché de poursuivre la réalisation des structures, et aucune mesure n'a pu être effectuée dans le cadre de ce stage.
- Dans un second temps, la physique du problème d'actionnement des nanotubes a été étudiée. Il ne s'agissait pas ici de concevoir un interrupteur HF, mais de « dégrossir » ce thème dans l'optique d'une réalisation ultérieure.
- Enfin dans un dernier temps, quelques applications prospectives ont été sondées, et les gains que pourraient amener les nanotubes de carbone à ces applications ont été quantifiés.

PLAN :

Chapitre 1 : INTRODUCTION

- 1.1 : Sujet et contexte du stage
- 1.2 : Généralités sur les nanotubes de carbone

Chapitre 2 : CARACTÉRISATION HF DES NANOTUBES DE CARBONE

- 2.1 : Modèles
 - 2.1.1 : Modèle du nanotube de carbone monoparoi
 - 2.1.1.1 : Modèle initial du nanotube de carbone monoparoi
 - 2.1.1.2 : Modèle complet du nanotube de carbone monoparoi
 - 2.1.1.3 : Valeurs « initiales » des paramètres du modèle
 - 2.1.1.4 : Passage des paramètres primaires aux paramètres secondaires
 - 2.1.1.5 : Contact du nanotube de carbone
 - 2.1.2 : Géométrie et modèle du dispositif de mesures
- 2.2 : Simulations du modèle
 - 2.2.1 : Extraction via la théorie des lignes
 - 2.2.2 : Simulations du modèle : influence des paramètres
 - 2.2.2.1 : Etude avec $C_{PARASITE} = 0$
 - 2.2.2.1.1 : Comparaison avec le modèle localisé
 - 2.2.2.1.2 : Cas de contacts ohmiques
 - 2.2.2.1.3 : Influence de $C_{COUPLAGE}$
 - 2.2.2.1.4 : Influence de C_{EFF_LIN}
 - 2.2.2.1.5 : Influence de R_{lin}
 - 2.2.2.2 : Méthode d'extraction des paramètres
 - 2.2.2.3 : Complément de la méthode d'extraction
 - 2.2.2.4 : Etude avec $C_{PARASITE}$ non nulle
 - 2.2.2.4.1 : Cas sans calibrage
 - 2.2.2.4.2 : Cas d'un calibrage imparfait
 - 2.2.2.5 : Cas symétrique où plusieurs CNTS seraient connectés
 - 2.2.2.6 : Etude de la dissymétrie de $C_{COUPLAGE}$
 - 2.2.2.6.1 : Cas du circuit symétrique
 - 2.2.2.6.2 : Cas du circuit réel
 - 2.2.2.7 : Cas réel de plusieurs CNTs connectés
 - 2.2.2.8 : Cas de nanotubes bi-parois
- 2.3 : Technologie de réalisation
 - 2.3.1 : Electrodes
 - 2.3.2 : Peignage moléculaire
 - 2.3.2.1 : Technique du peignage
 - 2.3.2.2 : Silanisation
 - 2.3.3 : Calibrage
 - 2.3.4 : Process de fabrication
 - 2.3.5 : Rugosité
 - 2.3.6 : Caractérisation longueur des CNTS

Chapitre 3 : VERS LES NEMS

3.1 : Physique du problème

- 3.1.1 : introduction - lois d'échelle
- 3.1.2 : notations
- 3.1.3 : principe physique
- 3.1.4 : phénomène de pull-in
- 3.1.5 : effets des Forces de Van der Waals
- 3.1.6 : autres phénomènes

3.2 : modélisation

- 3.2.1 force électrostatique
- 3.2.2 : forces de van der Waals
 - 3.2.2.1 : nombre de couches de graphite à considérer
 - 3.2.2.2 : forme des F_{VDW}
- 3.2.3 : comparaison forces électrostatiques et forces de Van der Waals

3.3 : méthode analytique

- 3.3.1 : modèle de base
- 3.3.2 : instabilité
- 3.3.3 : prise en compte de l'influence des F_{VDW}
 - 3.3.3.1 : tension de pull-in V_{P-IN}
 - 3.3.3.2 : géométries de pull-in
 - 3.3.3.3 : hystérésis
 - 3.3.3.4 : application : géométrie à mémoire
- 3.3.4 : influence des phénomènes annexes
 - 3.3.4.1 : concentration de charges
 - 3.3.4.2 : non-linéarités cinématiques
 - 3.3.4.3 : Zone de validité des F_{VDW}

ANNEXES

Annexe 1 : utilisations prospectives des nanotubes de carbone dans des circuits

Annexe 2 : formation technologique à l'A.I.M.E.

Annexe 3 : impact de la fermeture de la salle blanche sur le déroulement du stage

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS :

CNT	nanotube de carbone
e	charge élémentaire
h_p	constante de Planck
L	longueur du nanotube
λ	longueur d'onde
h	hauteur par rapport au plan de masse
V_F	vitesse de Fermi
c	vitesse de la lumière
Z_c	impédance caractéristique
V_p	vitesse de propagation
R_{lin}	résistance linéique
Att_{lin}	atténuation linéique

MOTS CLÉS :

Nanotubes de carbone

Nanotechnologie

Hyperfréquences

Caractérisation

NEMS

Van der Waals

Pull-in