

## Capteur de spins à large bande pour appareils de spectrométrie ESR – Détection large bande de résonance de spins basée sur l'inductance cinétique d'un résonateur supraconducteur.



200-35, Radisson  
Sherbrooke QC J1L 1E2  
CANADA  
t 819 821-7961

### Contexte

La résonance de spin électronique (RSE), en anglais «*electron spin resonance*» (ESR) désigne la propriété de certains électrons à absorber, puis à émettre à nouveau l'énergie d'un rayonnement électromagnétique lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique. La détection de la résonance de spins est utilisée en médecine et en biochimie, par exemple, pour l'étude de radicaux libres créés par l'irradiation utilisée dans le traitement de certains cancers.

La méthode conventionnelle pour la détection de la résonance de spins, appelée spectroscopie de résonance paramagnétique électronique, détecte l'absorption des micro-ondes des spins présents dans l'échantillon. L'excitation micro-ondes entre en résonance avec une cavité dans laquelle l'échantillon étudié est placé. Un champ magnétique externe est utilisé afin d'amener en résonance une espèce de spins présente dans l'échantillon avec la cavité micro-ondes.

### Description

La présente invention porte sur une nouvelle méthode de spectroscopie pour la détection de la résonance de spins qui n'est pas basée sur une résonance entre une cavité micro-ondes et les spins à sonder. Une nouvelle méthode permettant de détecter à l'aide de résonateurs supraconducteurs le champ magnétique créé par un ensemble de spins; le résonateur combinant ainsi le contrôle et la mesure dans le même dispositif.

En effet, la méthode développée permet de détecter directement le changement de la polarisation des spins de l'échantillon causé par une excitation micro-ondes. Cette modification de la polarisation des spins occasionne un changement du champ magnétique généré par l'échantillon, à son tour détecté à l'aide d'un résonateur supraconducteur. En effet, la fréquence d'un résonateur supraconducteur peut être sensible à un champ magnétique perpendiculaire à la surface du résonateur grâce à la présence de l'inductance cinétique (vs. induction magnétique). Il est possible d'effectuer l'ingénierie du résonateur supraconducteur pour maximiser son inductance cinétique afin de rendre la fréquence du résonateur hautement sensible au champ magnétique perpendiculaire.

L'invention se distingue par sa simplicité : seul un résonateur supraconducteur est nécessaire pour étudier un large éventail de matériaux alors le champ magnétique et la fréquence de l'excitation micro-ondes peuvent être variés sur une large bande. L'invention ne nécessite que des techniques de fabrication simples (photolithographie) et est compatible avec un balayage à haut champ magnétique. De plus, contrairement aux méthodes de ESR conventionnelles, il n'est pas nécessaire que les spins soient en résonance avec la cavité micro-ondes.

Le développement des matériaux quantiques requière des équipements plus polyvalents que les outils actuellement disponibles, qui ont des plages d'opération

trop limitées. Cette nouvelle technique de spectroscopie par résonance de spin « large bande » a été inventée afin d'étudier ces matériaux quantiques plus efficacement.

La présente invention vise à remplacer les capteurs présentement utilisés dans les spectromètres ESR puisque cette nouvelle méthode de détection est beaucoup plus performante et polyvalente.

### Applications

- Étude des matériaux semi-conducteurs
- Étude de nouveaux matériaux quantiques (MQ) inconnus (capteurs quantiques, ordinateurs quantiques, communications quantiques, etc.)
  - o Sensible aux propriétés de surface exotiques (matériaux quantiques),
  - o Lecture non-destructive d'un état quantique,
  - o Versatile, large bande, polyvalent
  - o Un seul appareil peu importe l'échantillon,
  - o Mesure simple.
- Cette nouvelle technique de spectroscopie ESR « large bande » a été inventée afin d'étudier ces matériaux quantiques efficacement, adressant les problèmes suivants :
  - o **Manque de polyvalence des ESR conventionnels**
    - Différents spectromètres ESR ayant une bande de détection étroite doivent être utilisés pour amener les spins en résonance avec un résonateur.
    - L'utilisation de grands champs magnétiques imposent également des contraintes importantes sur la conception du capteur.
  - o **Plages d'opérations limitées**
    - Certains matériaux avec des défauts de surface nécessitant des champs trop élevés ne pouvant pas être étudiés par ESR conventionnelle.
  - o **Balayage trop ciblé**
    - Les nouveaux défauts quantiques et MQ ont des propriétés ESR à priori inconnues. Une technique de spectroscopie à la fois large bande, ainsi que hautement sensible, est indispensable afin de les étudier efficacement.
- En étant intégré aux **appareils de spectrométrie ESR**, ce nouveau capteur pourra aussi être utilisé dans de nombreuses autres applications commerciales telles que :
  - o Instruments de mesure et de caractérisation des matériaux pour les laboratoires (Systèmes de Mesure des Propriétés Physique (PPMS)).
  - o **Physique** : Défauts dans les semi-conducteurs et hétérostructures, les métaux de transition, l'informatique quantique.
  - o **Chimie** : Cinétique de réaction, chimie des radicaux libres, catalyseurs, chimie bio inorganique, magnétisme moléculaire, chimie redox.
  - o **Biomédical** : Monoxyde d'azote, détection des espèces réactives de l'oxygène.
  - **Éducation** : Ensemble pédagogique optimisé pour un environnement d'enseignement par résonance magnétique. Suite d'expériences avec instructions pour enseigner les techniques courantes d'acquisition et de traitement de données EPR.

- **Biologie** : Protéines membranaires, protéines intrinsèquement désordonnées (IDP), métallo-enzymes, photosynthèse, ARN, ADN, marquage / piégeage de spin, oxydes d'azote, ROS et RNS.
- **Science des matériaux** : Dégradation des polymères, propriétés de la peinture, cellules solaires, piles à combustible, impuretés dans le verre optique, batteries.
- **Industrie** : Radicaux libres dans les polymères et la polymérisation, sciences de l'alimentation et boissons, stabilité à l'oxydation, capacité antioxydante, dégradation photo/oxydante des API

## Avantages

- Flexibilité : étant donné que le balayage est à large bande : bande de détection infinie.
  - o Ne nécessite pas de condition de résonance, donc plus grande flexibilité en comparaison avec l'ESR pour la spectroscopie des spins.
- Réduction CAPEX et OPEX – un appareil remplace plusieurs appareils.
- Un type de spins peut être étudié en fonction du champ magnétique. Champ fixe in situ
- Fabrication simple du capteur.
- Mesures simple
- **Polyvalence**: un seul appareil pour tous les types de matériaux, peu importe l'échantillon
- Sensible aux propriétés de surface exotiques (matériaux quantiques)
- **Détection large bande : Versatilité/Flexibilité**
  - o La caractérisation de défauts de spins dans les matériaux avec les spectromètres ESR conventionnels est un processus complexe et coûteux. Une technique de spectroscopie large bande et hautement sensible est alors indispensable afin de les étudier plus efficacement et à moindre coûts.
  - o Procédé nouveau : La nouvelle méthode proposée change complètement la méthode d'analyse alors qu'il est possible de détecter des transitions de spins à des fréquences très éloignées de celle du résonateur tout en profitant du gain de sensibilité permis par le résonateur.
    - Cette flexibilité est inégalée et permet de sonder en fréquence plusieurs espèces de spins situées à des fréquences très différentes pour une même valeur du champ magnétique externe.
    - De plus, ces spins peuvent être étudiés en fonction du champ magnétique et permet d'avoir une caractérisation complète du spectre de transition et une validation plus rapide avec les modèles théoriques. Cet avantage concurrentiel permettra aux chercheurs d'être plus efficaces dans la recherche et le développement des MQ.
  - o **Meilleure détection : une lecture non-destructive.** La rétroaction des spins sur le résonateur permet une lecture quantique non destructive de leur état. En plus des applications pour la détection de la résonance de spins, l'invention est ainsi d'un grand intérêt pour le développement de mémoires quantiques basées sur les ensembles de spins.
- **Économique : Réduction des frais d'acquisition :**

- **Un dispositif remplace plusieurs appareils** : La grande polyvalence du nouvel appareil permettra de couvrir une plage de balayage où plusieurs appareils actuels sont requis. Les clients sauveront alors des frais d'acquisitions importants, puisque chaque appareil est actuellement vendu à 200K\$/unité.
- **Coût de revient inférieur du capteur** : L'invention se distingue par sa simplicité : seul un résonateur supraconducteur est nécessaire pour étudier un large éventail de matériaux. Fabriqué à l'aide de procédés standards (photolithographie) mais un système de cryogénie doit être intégré, le coût de revient du capteur devrait être égal ou inférieur à celui des capteurs conventionnels.
- **Analyse des données simplifiées** : La nouvelle technique permet d'obtenir directement le spectre des spins sur une large gamme de fréquences et de champs magnétiques. La modélisation théorique est alors facilitée et l'analyse du système de spins alors plus efficace et précise. Ceci permet d'obtenir des résultats rapides et d'économiser sur le temps et les frais d'analyses.

### Mots clés

- Induction cinétique, résonance paramagnétique électronique, caractérisation des matériaux, sondes électroniques pour cryostats, systèmes de mesure des propriétés physiques (SMPP).

### Maturité de la technologie

Niveau de préparation technologique (TRL)

- TRL 3
  - Preuve de concept faite. Une première démonstration du principe a été réalisée sur un prototype démontrant les signatures des défauts magnétiques dans le diamant avec cette méthode.

### Propriété intellectuelle

Brevets déposés – États-Unis (US20210208231A1) et Allemagne.

### Ce que nous recherchons

Partenaires de développement. Investissements. Licences.

- Entreprises ciblées – fabricants de sondes et d'équipement de mesure :
  - Bruker, Quantum Design Inc., Attocube Systems, Magritek, others.

#### Contact Inventeur

Michel Pioro-Ladrière

[Michel.Pioro-Ladriere@USherbrooke.ca](mailto:Michel.Pioro-Ladriere@USherbrooke.ca)

819 821-8000, poste 65402

<https://www.usherbrooke.ca/iq/personne/michel-pioro-ladriere/>

<https://www.cifar.ca/bio/michel-pioro-ladriere>

#### TransferTech Sherbrooke

François Nadeau

[f.nadeau@transfertech.ca](mailto:f.nadeau@transfertech.ca)

873 339 2028

[www.transfertech.ca](http://www.transfertech.ca)