

Résonance Paramagnétique Electronique

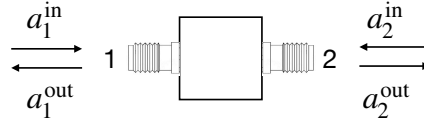
Jérôme Estève, Pierre Grégoire

1 Résonateur diélectrique en KTO

Dans cette première partie, l'objectif est de caractériser le résonateur diélectrique qui sera utilisé dans la troisième partie pour observer la résonance de spin. Pour observer la résonance qui se situe dans le domaine micro-onde (entre 7 et 8 GHz), on utilise un analyseur de réseau vectoriel, en anglais Vector Network Analyzer (VNA).

1.1 Analyseur de réseau (VNA)

Un analyseur de réseau vectoriel permet de mesurer les paramètres de scattering S_{ij} d'un dispositif micro-onde à un ou deux ports.



La matrice de scattering S_{ij} relie les amplitudes diffusées aux amplitudes incidentes

$$\begin{pmatrix} a_1^{\text{out}} \\ a_2^{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^{\text{in}} \\ a_2^{\text{in}} \end{pmatrix}$$

L'analyseur peut mesurer à la fois les coefficients de réflexion S_{ii} et de transmission $S_{i \neq j}$. En général $S_{12} = S_{21}$, mais ce n'est pas forcément le cas. Pour mesurer, par exemple S_{12} , l'appareil émet un signal par le port 2 et mesure le signal sur le port 1. Le VNA mesure le module et le phase de chaque paramètre S_{ij} en fonction de la fréquence.

Les paramètres les plus importants à régler pour la mesure sont:

- le "span", c'est à dire l'étendue du domaine de fréquence Δf qui est balayé pendant un sweep
- le nombre de points N dans le sweep en fréquence qui fixe l'écart $\delta f = \Delta f / N$ entre deux points de mesure
- la largeur de bande (Resolution Bandwidth, "RBW") qui fixe le temps d'intégration ($1/\text{RBW}$) pour chaque point de mesure
- la puissance émise par le VNA pour effectuer la mesure ("Power")

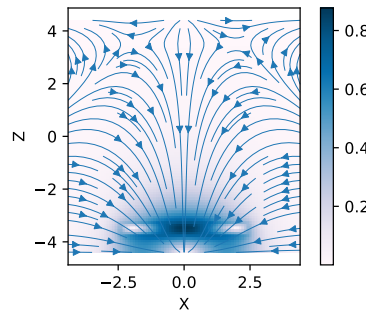
1.2 Calibration du VNA

Avant d'utiliser le VNA pour caractériser un élément, il faut effectuer une calibration afin de s'affranchir de la propagation dans les cables entre le VNA et le dispositif à caractériser. Pour effectuer cette calibration, on applique des standards (open, short, match) sur chaque port, puis on mesure la transmission entre les deux ports (through).

- Branchez deux câbles SMA sur les deux ports du VNA et connectez les deux câbles avec un I. Appuyez sur "Preset" pour appliquer les paramètres de mesure par défaut.
- Explorez les menus "Measurement" et "Format" pour mesurer et afficher le module et la phase ou la partie réelle et imaginaire de différents paramètres de scattering.
- Observez le signal mesuré en transmission S_{12} et en réflexion (S_{11} ou S_{22}). Comparez au signal attendu pour un montage idéal.
- Enlevez le I, et effectuez la calibration "TOSM" en appuyant sur la touche "CAL". Suivez les instructions et branchez chaque élément du kit de calibration sur chaque câble avant de lancer la mesure.
- Enlevez le dispositif de calibration et observez à nouveau les coefficients de réflexion en phase et module. Qu'observez-vous ?
- Connectez à nouveau les deux câbles avec un I et observez la transmission en phase et module. Qu'observez-vous ?
- Remplacez le I par le guide microstrip sur le porte-échantillon. Comment évolue la phase avec la fréquence ? En déduire la vitesse de propagation dans le guide du porte-échantillon. On pourra acquérir une trace et en faire l'analyse dans un notebook Jupyter.
- Utilisez la fonction "Auto length" dans le menu "Offset" pour compenser la propagation dans le guide. Le dispositif est maintenant calibré.

1.3 Caractérisation du résonateur en KTO

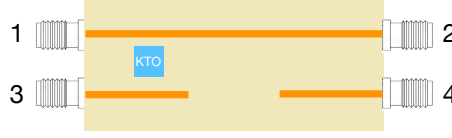
Le résonateur diélectrique utilisé ici est un résonateur paralalipédique en KTO. L'épaisseur du résonateur est 500 μm , bien plus faible que les dimensions latérales qui sont 5x5 mm. En première approximation, on peut donc considérer que la couche de KTO est un guide planaire. Les modes propres sont alors les ondes stationnaires d'un résonateur carré. Le mode fondamental est le mode TE01, dont le champ magnétique ressemble à celui d'un dipôle magnétique. La figure ci-dessous montre l'intensité et les lignes de champ magnétique :



Pour exciter les modes de résonance, il suffit de placer le KTO près du guide d'onde sur le porte-échantillon.

- Placez le résonateur près du guide et observez la transmission au VNA entre 7 et 8 GHz.
- Comment varie la résonance avec la distance au guide ?

Pour comprendre l'évolution de la résonance, on introduit le taux de perte par couplage κ_c et le taux de perte intrinsèque κ_i . Les pertes totales sont $\kappa = \kappa_c + \kappa_i$, l'énergie stockée dans le résonateur décroît comme $\exp(-\kappa t)$ avec le temps. On distingue deux régimes limites: le régime sur-couplé $\kappa_c \gg \kappa_i$ et le régime sous-couplé $\kappa_c \ll \kappa_i$. Sans faire de calcul, essayez de tracer S_{12} , S_{13} et S_{33} dans chaque régime. Les numéros des ports sont définis sur le schéma ci-dessous:



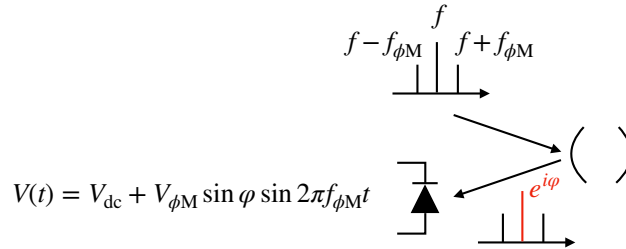
Effectuez les mesures au VNA pour vérifier vos prédictions. Sauvez quelques traces au format HDF5 qui vous serviront à illustrer votre rapport et essayez d'estimer κ_i pour le résonateur.

Pour mesurer la résonance de spin, on cherche à mesurer le plus précisément possible la fréquence de résonance du résonateur.

- Dans quel régime de couplage faut-il se placer ?
- Trouvez une configuration où ce régime est à peu près atteint pour la mesure S_{12} .

2 Montage Pound-Drever-Hall

Le montage de Pound-Drever-Hall est surtout utilisé en optique pour asservir un laser sur une cavité. Il peut être adapté au régime micro-onde avec une source et un résonateur. A la résonance, l'intensité du signal transmis ou réfléchi par le résonateur passe par un maximum ou un minimum avec une dérivée nulle. La méthode développée par Pound, Drever et Hall permet d'obtenir un signal d'erreur qui passe par zéro lorsque la fréquence de la source traverse la fréquence de résonance de la cavité. La page [Wikipedia](#) explique en détail la technique. La méthode est utilisée le plus souvent en réflexion mais fonctionne également en transmission.



Pour obtenir un signal d'erreur, la source est modulée en phase à une fréquence $f_{\phi M}$. Le signal arrivant sur le résonateur contient trois fréquences: une porteuse à f et deux bandes latérales à $f \pm f_{\phi M}$. En notation complexe, l'amplitude émise par la source incidente sur le résonateur s'écrit:

$$A^{\text{in}} = A_0 e^{2i\pi f t} (1 + \epsilon e^{2i\pi f_{\phi M} t} - \epsilon e^{2i\pi f_{\phi M} t})$$

Notez bien la présence du signe moins entre les amplitudes des deux bandes latérales. Le signal est réfléchi par le résonateur, que l'on suppose sans perte. Le coefficient de réflexion est de module unité et les trois composantes subissent juste un déphasage à la réflexion. Supposons que $f_{\phi M} \gg \kappa$, les bandes latérales

ne sont alors pas affectées par le résonateur et ne sont donc pas déphasées. L'amplitude réfléchie est

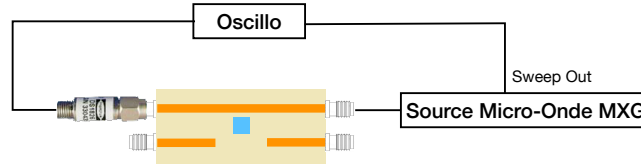
$$A^{\text{ref}} = A_0 e^{2i\pi f t} (e^{i\phi} + \epsilon e^{2i\pi f_{\phi M} t} - \epsilon e^{2i\pi f_{\phi M} t})$$

Au premier ordre en ϵ , la puissance réfléchie est

$$P^{\text{ref}} = \frac{1}{2} (1 + 4\epsilon \sin \phi \sin 2\pi f_{\phi M} t)$$

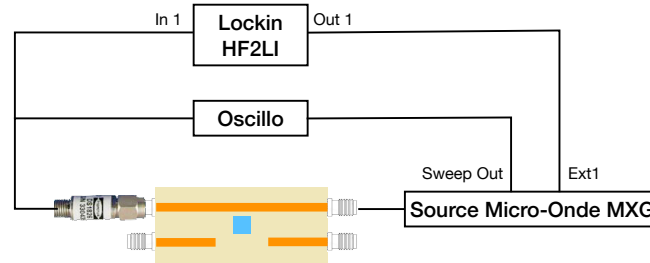
On voit donc que la phase ϕ , qui passe par zéro à la résonance, peut être mesurée en démodulant la tension en sortie de la diode à la fréquence $f_{\phi M}$. Le signe moins entre bandes latérales permet d'obtenir $\sin \phi$ (et non $\cos \phi$).

2.1 Schéma du montage



- Réalisez le montage ci-dessus, l'élément à gauche est la diode permettant de détecter la puissance du signal micro-onde. La tension en sortie est proportionnelle à la puissance micro-onde en entrée. Il ne faut pas dépasser 0 dBm en entrée et la zone de fonctionnement linéaire se situe en dessous de -10 dBm.
- Programmez un sweep en fréquence sur la source micro-onde et observez la résonance en mesurant la tension à la sortie de la diode. Vous devez obtenir un pic de tension, comparable à la mesure obtenue en module avec le VNA.

Pour obtenir un signal d'erreur, il faut moduler en phase la source et démoduler le signal en sortie de la diode de détection. Pour cela, on utilise une détection synchrone (lockin), ici un HF2LI de Zürich Instruments.



- Modifiez le montage comme ci-dessus pour brancher la modulation du lockin à $f_{\phi M}$ sur l'entrée externe de la source micro-onde et la sortie de la diode sur l'entrée de mesure du lockin.
- Programmez la source micro-onde pour obtenir une modulation en phase pilotée par l'entrée externe. Utilisez le mode ϕM High Bandwidth et mettez l'amplitude de modulation de phase au maximum.

2.2 Réglage du lockin

L'interface de contrôle du lockin est accessible [ici](#).

- Programmez le lockin pour effectuer une mesure à $f_{\phi M}$ de l'ordre de quelques MHz (typiquement 2 MHz), utilisez une amplitude de modulation de 1 Vpp maximum.
- Réglez la démodulation jusqu'à observer un signal d'erreur lorsque la source effectue un sweep en fréquence.
- Programmez le lockin pour envoyer le résultat de la démodulation sur la voie auxiliaire 1 afin de pouvoir l'observer sur l'oscillo.
- Optimisez les paramètres, fréquence, déphasage, amplitude de modulation, position du KTO... pour maximiser l'amplitude du signal d'erreur.
- Sauvez quelques traces d'oscillo montrant les différents signaux en fonction de la rampe de fréquence.
- Estimez la sensibilité de la mesure de la fréquence de résonance

3 Observation de la résonance de spin

Pour observer la résonance de spin, on dispose d'un électroaimant pouvant générer un champ magnétique variable entre 0 et 1 T. En plaçant un matériau avec des spins électroniques non appariés à la surface du résonateur au centre de l'aimant et en ajustant le champ magnétique pour que la fréquence de résonance des spins $g\mu_B B/h$ coïncide avec la fréquence du résonateur, on s'attend à observer une modification de la fréquence de résonance du résonateur que l'on détecte avec le montage Pound-Drever-Hall.

Pour améliorer la sensibilité de la mesure, on réalise un deuxième montage de détection synchrone. Le champ magnétique est modulé à environ 100 Hz et on démodule à cette fréquence le signal de sortie du montage Pound-Drever-Hall (PDH).

3.1 Calibration de l'aimant

- A l'aide du gauss-mètre, mesurez l'intensité du champ magnétique au centre de l'aimant pour quelques valeurs de courant. Tracez la courbe de calibration de l'aimant.
- Estimez le champ magnétique permettant de mettre les spins en résonance avec le mode du résonateur et le courant correspondant à mettre dans les bobines.

3.2 Montage à double détection synchrone

- Programmez le H2FLI pour obtenir une modulation à 117 Hz sur la sortie 2
- Connectez la modulation à l'ampli de courant alimentant les bobines de modulation
- Ajustez le courant pour obtenir une modulation d'environ 1 A à travers les bobines

- Envoyez la sortie de la démodulation du montage PDH qui est disponible sur la sortie auxiliaire 1 vers l'entrée 2 du lockin
- Ajustez les paramètres du lockin, notamment la constante de temps pour optimiser le rapport signal à bruit.

Remarque 3.1 Un paramètre important dans une détection synchrone est la constante de temps d'intégration en sortie pour filtrer la composante à $2f_m$ et minimiser le bruit. Plus le temps d'intégration est long, meilleur est le rapport signal/bruit mais plus le temps de réponse est lent. Vous pouvez lire la documentation sur le site de Zürich Instrument [ici](#). En particulier, le temps de stabilisation du signal est donné par le tableau ci-dessous, le temps τ est la constante de temps indiqué dans le panneau de configuration

Table 3.2

Filter order	50%	63% ($1 - 1/e$)	90%	95%	99%
1st	0.7τ	1.0τ	2.3τ	3.0τ	4.6τ
2nd	1.7τ	2.1τ	3.9τ	4.7τ	6.6τ
3rd	2.7τ	3.3τ	5.3τ	6.3τ	8.4τ
4th	3.7τ	4.4τ	6.7τ	7.8τ	10.0τ
5th	4.7τ	5.4τ	8.0τ	9.2τ	11.6τ
6th	5.7τ	6.5τ	9.3τ	10.5τ	13.1τ
7th	6.7τ	7.6τ	10.5τ	11.8τ	14.6τ
8th	7.7τ	8.6τ	11.8τ	13.1τ	16.0τ