HAL
open science

Pertes par rayonnement lors de la caractérisation sous pointes d'inductances à fort Q

Olga Bushueva, Ayad Ghannam, Christophe Viallon, Thierry Parra

To cite this version:

Olga Bushueva, Ayad Ghannam, Christophe Viallon, Thierry Parra. Pertes par rayonnement lors de la caractérisation sous pointes d'inductances à fort Q. 19èmes Journées Nationales Microondes (JNM), Jun 2015, BORDEAUX, France. hal-01198618

HAL Id: hal-01198618

https://hal.science/hal-01198618

Submitted on 14 Sep 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pertes par rayonnement lors de la caractérisation sous pointes d'inductances à fort Q

Bushueva Olga[1, 2], Ayad Ghannam[3], Christophe Viallon[1, 2], Thierry Parra[1, 2]

[1]*CNRS, LAAS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31031 Toulouse, France*
[2]*Université de Toulouse, UPS, LAAS, F-31062, France*
[3]*3DiS Technologies, 478 Rue de la Découverte, 31670 Labège, France*
cviallon@laas.fr, parra@laas.fr

Résumé

Ce papier traite des écarts importants constatés entre les mesures et les simulations électromagnétiques (EM) pour un solénoïde intégré de 3 nH, notamment une valeur du facteur de qualité maximum prévue à 45 mais mesurée à 36. Une interaction parasite de la pointe RF avec la structure est identifiée et confirmée par l'introduction d'un modèle simplifié de la pointe RF dans les simulations EM. Une solution est ensuite proposée et testée pour réduire les pertes par rayonnement induites par cette interaction. Une fois appliquée à l'inductance, le facteur de qualité mesuré retrouve le niveau initialement prévu en simulation.

1. Introduction

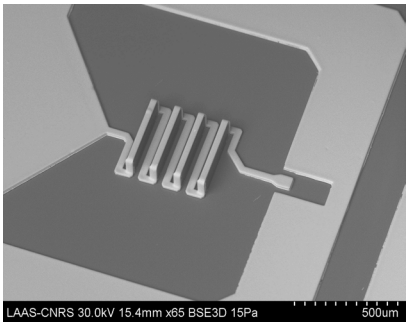
Lorsque des inductances à fort coefficient de qualité sont caractérisées, plusieurs erreurs aux origines diverses peuvent entacher la mesure, empêchant l'extraction des performances réelles du composant [1]-[4]. Dans ce papier, nous examinons un problème de mesure qui n'a pas encore été détaillé dans la littérature mais qui a tendance à s'exprimer dès lors que des inductances présentant un coefficient de surtension Q supérieur à 30 doivent être caractérisées sous pointes [1]. Il se traduit par l'extraction expérimentale d'une valeur maximum de Q sous-évaluée et d'une fréquence de résonance de l'inductance différente, par rapport à la simulation. Bien que démontré à travers l'exemple d'un solénoïde tridimensionnel (3D), ce problème n'est pas spécifique à une structure particulière. Nous l'avons également rencontré pour des inductances spirales de *Q* élevé.

Un rayonnement lié à la pointe est identifié, qui résulte des difficultés pour réaliser une bonne référence de masse. Ce phénomène est confirmé par des simulations EM, qui permettent en outre de quantifier sa contribution au niveau des pertes totales. En améliorant la référence de masse sur la base de ces constatations, la mesure du même solénoïde conduit alors à l'extraction du facteur de qualité maximum simulé initialement.

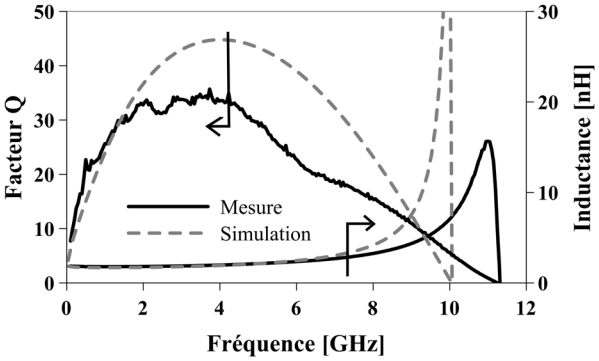
2. Caractérisation d'un solénoïde à fort-Q

Pour illustrer le problème étudié, nous avons choisi de présenter les mesures réalisées sur un solénoïde à 4 tours (figure 1a). Ce composant est fabriqué sur un substrat de silicium haute résistivité en utilisant un procédé technologique original permettant la croissance électrolytique 3D du cuivre en une seule étape technologique [5]. Ce procédé se déroule en quatre étapes :

1. Déposition et structuration d'une résine épaisse (SU-8) sur la surface du substrat.
2. Déposition d'une couche d'accrochage 3D.
3. Réalisation d'un moule épais en résine BPN pour le dépôt électrolytique du cuivre.
4. Croissance de la couche de métallisation 3D.



(a)



(b)

Figure 1. Microphotographie MEB du solénoïde (a), Facteur de qualité *Q* et inductance *L* simulés et mesurés (b).

L'inductance est mesurée à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel et d'une pointe coplanaire de type GSG. Un calibrage SOLT (Short, Open, Load, Thru) est réalisé pour localiser le plan de référence du signal RF au niveau de la pointe. Les simulations EM sont effectuées avec l'aide du logiciel ANSYS HFSS en utilisant un port interne de 50 Ohms. Le facteur Q ainsi que la valeur de l'inductance L sont calculés à partir du paramètre Y_{11} à l'aide des relations (1) et (2).

$$Q = -\frac{\mathrm{Im}(Y_{11})}{\mathrm{Re}(Y_{11})} \quad (1)$$

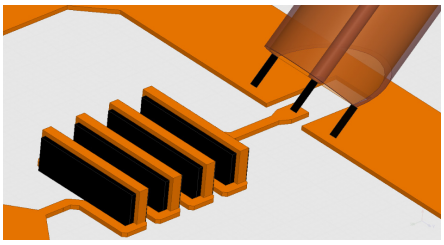
$$L = \frac{\mathrm{Im}(Y_{11}^{-1})}{\omega} \quad (2)$$

Le facteur Q et la valeur de l'inductance L simulés et mesurés sont tous les deux reportés sur la figure 1b. Ces résultats montrent un écart significatif avec des mesures qui sous-évaluent le coefficient Q. La valeur maximale (Q_{max}) mesurée vaut 36 au lieu de la valeur 45 simulée. La fréquence de résonance de l'inductance est également différente.

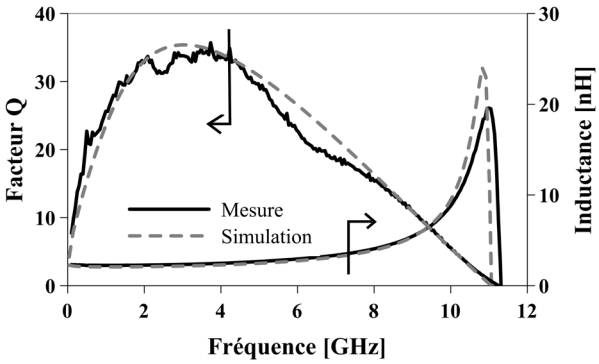
3. Identification du problème

3.a. *Simulation électromagnétique*

Afin d'extraire les origines de ces écarts, nous avons cherché à rapprocher les conditions de simulation des conditions de mesure. L'extrémité simplifiée de la pointe RF a donc été ajoutée au modèle simulé du solénoïde (figure 2a). La pointe est épluchée jusqu'à son extrémité dans le simulateur HFSS.



(a)



(b)

Figure 2. Modèle de l'inductance avec la pointe (a), nouvelles simulations comparées aux mesures (b).

Cette fois-ci un très bon accord est constaté avec les mesures (figure 2b). A partir de ce résultat, le simulateur EM peut être utilisé pour interpréter les différences constatées précédemment. Pour ce faire, nous avons cherché à extraire du simulateur l'énergie stockée, la puissance dissipée dans le volume ainsi que la part de puissance perdue par rayonnement. Les énergies électrique W_e et magnétique W_m moyennes stockées dans le volume sont déterminées à partir des champs électrique $\boldsymbol{E}$ et magnétique $\boldsymbol{H}$ calculés par le simulateur EM en utilisant les expressions suivantes [6] :

$$W_e = \frac{\varepsilon}{4}\int_V \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{E}^* dv \quad (3)$$

$$W_m = \frac{\mu}{4}\int_V \boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{H}^* dv \quad (4)$$

ε représente la permittivité électrique et μ la perméabilité magnétique du volume V utilisé pour le calcul.

Pour rester en accord avec la définition du facteur de qualité électrique calculé par la relation (1), l'énergie stockée W_{sto} d'une inductance est définie comme suit :

$$W_{sto} = W_m - W_e \quad (5)$$

La puissance totale rayonnée est donné par le flux du vecteur de Poynting traversant une surface S :

$$P_{rad} = \mathrm{Re}\left(\oiint_S \boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}^* ds\right) \quad (6)$$

La puissance active acceptée par l'inductance vaut :

$$P_{acc} = |a_1|^2\left(1-|S_{11}|^2\right) \quad (7)$$

Dans cette expression, le terme $|a_1|^2$ désigne la puissance disponible fixée par le logiciel au niveau du port d'excitation.

La puissance P_{diss} dissipée par l'inductance dans la matière est déduite de P_{acc} et P_{rad} en utilisant la relation suivante :

$$P_{acc} = P_{diss} + P_{rad} \quad (8)$$

Simulation	W_{sto} (pJ)	P_{acc} (μW)	P_{diss} (μW)	P_{rad} (μW)
Port interne	0,22	340	332	8
Avec pointe RF	0,24	512	341	171

Tableau 1. Valeurs des puissances extraites à 5 GHz.

Le Tableau 1 rapporte les valeurs extraites pour l'énergie stockée (W_{sto}), la puissance dissipée dans la structure (P_{diss}), la puissance rayonnée (P_{rad}) et la puissance acceptée (P_{acc}) à 5 GHz. Celui-ci montre que la puissance rayonnée augmente considérablement (20×) lorsque la pointe RF est prise en compte dans la simulation. En outre, l'énergie stockée est pratiquement la même dans les deux cas. La légère différence peut être attribuée à une légère incertitude dans l'épluchage effectué par HFSS pour ramener le plan de mesure à l'extrémité de la pointe RF.

3.b. *Définition et calcul des facteurs de qualité*

Pour vérifier la pertinence de ces résultats, nous avons cherché à re-calculer le facteur de qualité global à partir de ces puissances et énergies. Celles-ci doivent permettre de retrouver le facteur de qualité « électrique », c'est-à-dire déterminé à partir du coefficient de réflexion (cf. expression (1)). A partir des données précédentes, deux facteurs de qualité associés au rayonnement (Q_{rad}) et aux pertes dans les matériaux (Q_{diss}) sont définis. Ces deux facteurs de qualité

conduisent à la définition du facteur de qualité total Q [7] :

$$Q_{diss} = \frac{2\omega \cdot W_{sto}}{P_{diss}} \quad (9)$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega \cdot W_{sto}}{P_{rad}} \quad (10)$$

$$Q = \frac{2\omega \cdot W_{sto}}{P_{acc}} = \left(\frac{1}{Q_{diss}} + \frac{1}{Q_{rad}} \right)^{-1} \quad (11)$$

Les facteurs de qualité Q_{diss} et Q_{rad} sont reportés sur la Figure 3 pour les deux cas simulés, avec un port interne et avec la pointe RF. La Figure 4 permet de vérifier l'équivalence des résultats issus des expressions (1) et (11) en reportant les facteurs Q déterminés par ces deux méthodes.

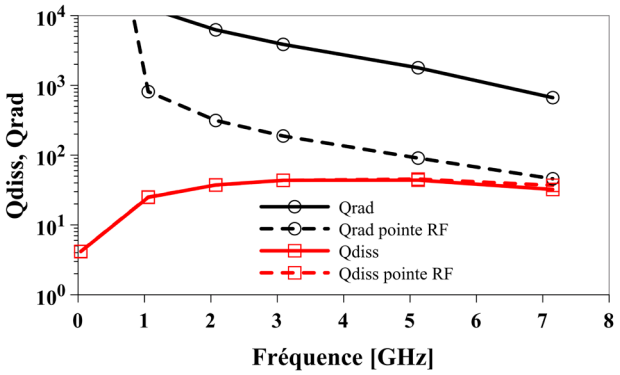


Figure 3. Q_{rad} et Q_{diss} calculés à partir des puissances et énergies simulées.

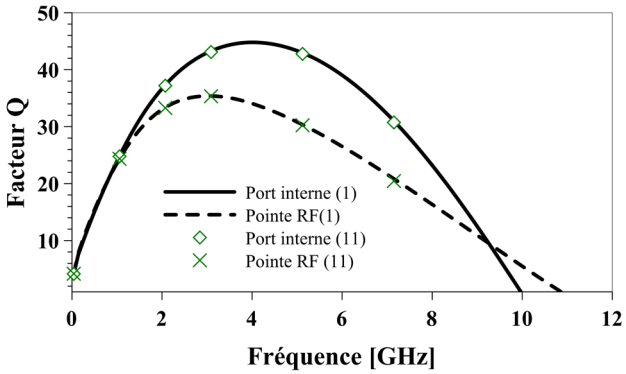


Figure 4. Facteurs de qualité issus de l'expression (1) et de l'expression (11).

La Figure 3 montre que le facteur Q découle principalement des pertes dissipées (Q_{diss}) lorsque l'inducteur est simulé en utilisant un port interne. Q_{rad} reste très élevé et n'affecte pas le facteur Q. Lorsque la pointe RF est ajoutée Q_{rad} diminue d'environ deux décades sur toute la plage de fréquence et impacte le facteur Q notablement. A 5 GHz, cette valeur chute de 42 à 30 lorsque la pointe RF est incluse dans la simulation. Q_{diss} reste inchangé dans les deux cas. Le rayonnement parasite est induit par une interaction entre la pointe et la structure testée. L'observation des lignes de champs dans le simulateur permet de déduire que l'ensemble s'apparente à un dipôle rayonnant. La première branche du dipôle est constituée par l'inductance et son anneau métallique tandis que l'extérieur de la partie terminale de la pointe réalise la seconde partie. La différence de potentiel qui s'installe entre ces deux éléments crée le rayonnement.

4. Elimination du rayonnement parasite

Une grande partie du rayonnement engendré par ce dipôle rayonnant peut être éliminée en rétablissant l'équipotentialité de l'anneau métallique qui entoure l'inductance, ce qui peut être effectué en plaçant cet l'anneau au même potentiel RF que celui du support métallique de la station de mesure. L'expérimentation conduite est illustrée par la microphotograhie de la Figure 5. L'inductance est reportée sur un circuit imprimé de type FR4 métallisé sur toute sa surface et en contact électrique avec le support métallique de la station de mesure. Le contact électrique entre l'anneau métallique entourant l'inductance et ce plan métallisé est assuré par une série de fils micro-soudés. L'inductance placée dans cette nouvelle configuration a été caractérisée avant et après l'ajout des fils micro-soudés.

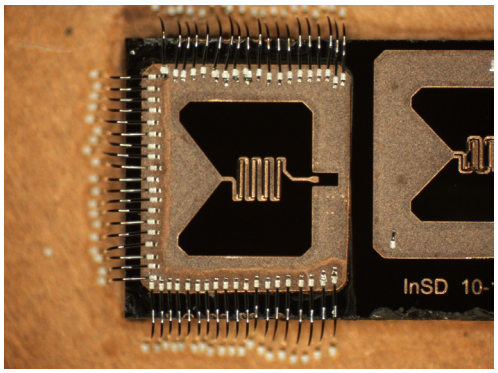


Figure 5. Photographie de l'expérience.

Grace à cette manipulation, un nouveau facteur de qualité est extrait de la mesure (figure 6) et comparé au facteur initialement simulé à l'aide d'un port interne (figure 1b). Un parfait accord des nouvelles mesures est observé avec les simulations réalisées initialement jusqu'à 6 GHz environ, et la valeur de 45 est bien retrouvée pour Q_{max}. Au-delà de 6 GHz, les écarts visibles proviennent essentiellement de la couche isolante ajoutée par la colle utilisée pour le report du composant sur le support métallique non considérée par la simulation initiale mais vérifiée par la simulation EM de cette expérience.

Les valeurs des facteurs de qualité Q_{diss} et Q_{rad} extraites des simulations EM de l'expérience avant et après la connexion de l'anneau à la masse confirment la réduction des pertes par rayonnement qui en découle (Figure 7). Q_{rad} est considérablement augmentée lorsque l'inductance est reliée à la plaque métallique par les fils micro-soudés, Q_{diss} est toujours inchangé dans les deux cas.

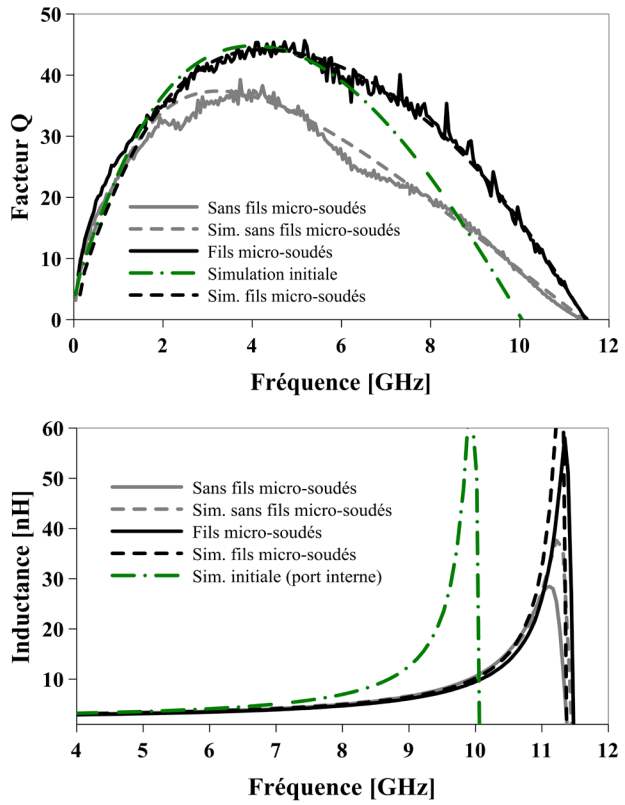


Figure 6. Facteur *Q* et inductance *L* après amélioration de la référence de masse.

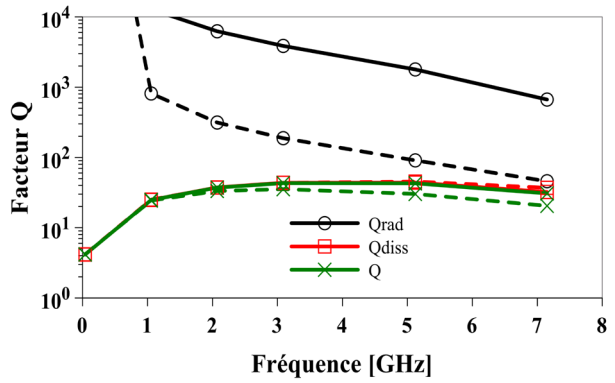


Figure 7. Q_{rad}, Q_{diss} et Q de la structure de test sans les fils micro-soudés (lignes pointillées) et avec (traits pleins).

5. Conclusion

Dans cet article, nous montrons que les structures de test telles que dessinées classiquement ne sont plus adaptées pour la caractérisation d'inductances intégrées à fort coefficient de surtension. Une interaction parasite de l'élément testé avec la pointe RF est observée et empêche l'extraction des véritables performances du composant. Une nouvelle structure de test est ensuite conçue pour limiter le phénomène parasite. Les résultats obtenus permettent finalement de retrouver les performances initialement calculées à partir de la simulation électromagnétique.

6. Bibliographie

[1] W. B. Kuhn, A. P. Bootz, *« Measuring and Reporting High Quality Factors of Inductors Using Vector Network Analyzers »*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 58, n°4, pp. 1046–1055, Jan. 2010.

[2] J. C. Rautio, R. Groves, *« A potentially significant on-wafer high-frequency measurement calibration error »*, Microw. Mag. IEEE, Vol. 6, n°4, pp. 94–100, Apr. 2005.

[3] B. Rejaei, et al. *"Effect of local ground and probe radiation on the microwave characterization of integrated inductors »*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 55, n°10, pp. 2240–2247, Oct. 2007.

[4] C. Andrei, & al. *« Coupling on-wafer Measurement Errors and their Impact on Calibration and De-embedding up to 110 GHz for CMOS Millimeter wave Characterizations »*, IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures, ICMTS '07, March 2007.

[5] A. Ghannam, et al. *« 3-D Multilayer Copper Interconnects for High-Performance Monolithic Devices and Passives »*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol.3, n°6, pp. 935–942, June 2013.

[6] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. J.Wiley & Sons, New York, 2nd ed., 1998.

[7] K. O, *« Estimation methods for quality factors of inductors fabricated in silicon integrated circuit process technologies »*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 33, n°8, pp. 1249–1252, Aug. 1998.