HAL
open science

Solution de récupération d'énergie pour les dispositifs hyperfréquences en technologie micro-ruban

Miguel Sanchez-Soriano, Yves Quéré, V. Le Saux, Cédric Quendo

To cite this version:

Miguel Sanchez-Soriano, Yves Quéré, V. Le Saux, Cédric Quendo. Solution de récupération d'énergie pour les dispositifs hyperfréquences en technologie micro-ruban. Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01710476

HAL Id: hal-01710476

https://hal.science/hal-01710476

Submitted on 21 Feb 2018

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.

Solution de récupération d'énergie pour les dispositifs hyperfréquences en technologie micro-ruban

Miguel Sanchez-Soriano[1], Yves Quéré[1], Vincent Le Saux[2], Cédric Quendo[1]

[1]*Lab-STICC, Université de Bretagne Occidentale, 6 avvenue Le Gorgeu, 29238 Brest*
[2]*ENSTA Bretagne, 2 rue François Verry, 29806 Brest*
m.sanchez.soriano@ieee.org, yves.quere@univ-brest.fr

Résumé

Ce papier décrit une méthode de récupération de l'énergie, issue des pertes en puissance, de circuits réalisés en technologie micro-ruban. Un thermo-générateur (TEG), utilisant l'effet Seebeck, convertit la chaleur provenant de la puissance dissipée en puissance électrique DC. Une solution d'intégration ainsi que des règles de dessin sont proposées pour optimiser la récupération d'énergie tout en gardant une bonne isolation entre le TEG et la fonction hyperfréquence. Pour une puissance de l'ordre de 1-5 Watts, l'énergie récupérée est significative. Un démonstrateur a été réalisé à partir d'un filtre passe-bande et d'un TEG et des mesures électriques et thermiques sont présentées.

1. Introduction

Les dispositifs passifs en technologie micro-ruban sont largement utilisés dans le domaine des radio et hyperfréquences, que ce soit pour les émetteurs ou récepteurs. Ils sont utilisés en tant que supports de propagation, pour la combinaison/division de puissance et le filtrage de signaux [1], [2]. Les lignes micro-ruban présentes trois mécanismes de pertes : métalliques, diélectriques et par rayonnement. Les deux premiers sont proportionnellement linéaires à la puissance du signal d'entrée et génèrent de la chaleur dans le circuit entraînant ainsi des différences de température [3], [4]. Les systèmes hyperfréquences en technologie planaire peuvent généralement supporter des niveaux de puissance modérés de signaux. La partie active des systèmes de communication (amplificateurs, mélangeurs etc.) constitue le plus souvent la partie la plus chaude du fait de leur forte consommation en puissance. Cependant, pour des niveaux de puissance modérés de signaux (1-5W), la chaleur générée dans les dispositifs passifs à base de matériaux conventionnels, type polymères ou téflon, peut être aussi importante et des températures supérieures à 60°C sont facilement atteintes [1], [4].

D'autre part, le besoin en terme d'efficacité énergétique est aujourd'hui très important et la récupération d'énergie (solaire, vibrations, thermique, RF) est dans ce contexte un domaine de recherche en plein essor. Il est ainsi proposé dans ce papier de tirer avantage de l'énergie perdue dans les dispositifs micro-ruban passifs et pouvant être utilisée, par exemple, pour alimenter un autre sous-système hyperfréquences. Un thermo-générateur (TEG), basé sur l'effet Seebeck, est intégré dans le circuit micro-ruban pour convertir une partie de la puissance dissipée en puissance électrique DC. Cette intégration, pouvant être évidente pour des composants actifs en boîtier où le TEG peut être placé sur le dessus ou sur la masse, pose des problèmes de couplage électromagnétique pour les dispositifs passifs. Des règles de dessin sont ainsi proposées pour l'optimisation de la récupération d'énergie tout en gardant une bonne isolation entre le TEG et le signal RF. De plus, le TEG agit comme un système de refroidissement et la capacité en puissance du circuit se trouve ainsi augmentée. Un démonstrateur du concept, basé sur un filtre passe-bande pour application WiMax associé à un TEG, a été réalisé et mesuré. Une puissance de l'ordre de 250 μW a été récupérée pour une onde continue de 2 W à 3,48 GHz.

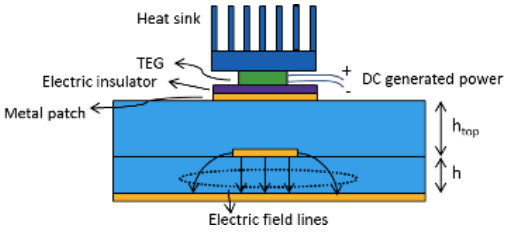

Figure 1. Vue en coupe du TEG intégré au circuit micro-ruban.

2. Description du circuit intégré proposé

Le TEG est placé au niveau des points chaud du circuit passif où la puissance à récupérer peut être maximisée. Ces points chauds correspondent aux zones où l'énergie est stockée et donc où les pertes sont les plus importantes, c'est à dire, au niveau des résonateurs pour un filtre dans la section de la ligne de transmission où une onde stationnaire est formée. Ce papier démontre que l'utilisation de technologies multi-couche permet d'intégrer facilement le TEG tout en optimisant l'énergie récupérée et en gardant une bonne isolation avec le signal RF. La Figure 1 montre la section de coupe du système proposé. L'intervalle $1{,}5h < htop < 3h$ est défini de manière à faciliter le transfert de chaleur et garder la

bonne isolation entre le TEG et le signal. Un patch métallique est disposé pour accueillir le TEG. En fonction de la taille de ce patch, des résonances peuvent apparaître. Celles-ci peuvent cependant être réduites en utilisant un ensemble de petits éléments métalliques isolés au lieu d'un patch métallique plein.

La Figure 2 décrit le comportement thermique du dispositif par un circuit de résistances thermiques. T_{hot} et T_{amb} correspondent respectivement à la température sur le patch métallique et la température ambiante. La résistance thermique $R_{th,HS}$ décrit le mécanisme de transfert de chaleur du dissipateur et $R_{th,TEG}$ est la résistance thermique associée au TEG. Ainsi, le gradient effectif du TEG est obtenu en en appliquant l'analogie circuit électro-thermique :

$$\Delta T_{TEG} = \frac{(T_{hot} - T_{amb})R_{th,\mathrm{TEG}}}{R_{th,\mathrm{TEG}} + R_{th,\mathrm{HS}}} \quad (1.$$

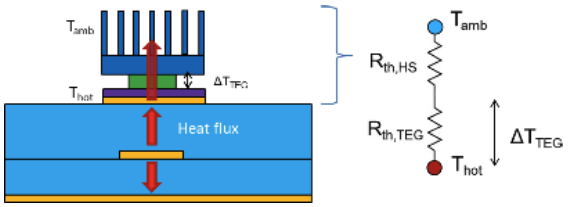

Figure 2. Circuit de résistances thermique équivalent.

3. Exemple d'application

Un filtre passe-bande d'ordre 3 couvrant la bande WiMAX de 3,3 à 3,5 GHz est proposé pour valider le concept. Le circuit est fabriqué en technologie multi-couche avec un substrat Megtron 6 de chez Panasonic. Les caractéristiques sont les suivantes : permittivité relative = 3.6, tangente de perte *tan δ* = 0.006, épaisseur du niveau de cuivre t = 20 µm et conductivité thermique K = 0.4 W/m·°C. Le filtre est enterré avec h = 0.32 mm et h_{top} = 0.56 mm. Des connecteurs SMA sont inclus pour la mesure sur le niveau top. La transition entre les accès et le filtre sont des via laser de cuivre de diamètres 0.14 mm. Le schéma du dispositif est montré Fig. 3. Le filtre est constitué de trois résonateurs couplés demi-onde en circuit-ouvert. La figure 4 montre les résultats de simulation électromagnétique et de mesure où l'on peut constaté un bon accord. Le filtre présente une forte sélectivité avec des niveaux de réjection hors bande supérieurs à 30dB. Les pertes du filtre, définies par

$$LF = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2.$$

sont illustrées sur la figure 5. Comme attendu, elles sont maximales autour des fréquences de résonance, où le délai de groupe est aussi maximal (à 3.38 GHz et 3.56 GHz pour la simulation et à 3.34 GHz et 3.48GHz pour la mesure). Cependant, un signal d'entrée dans la bande avec une fréquence de 3.48 GHz peut limiter la capacité en puissance du filtre mais, pour cette fréquence, la récupération de puissance attendue est supérieure.

La figure 6 présente les profils thermiques, simulés à partir d'ANSYS Multiphysics, du filtre implémenté pour une puissance de signal de 2W à 3.56 GHz et sans TEG. Les maximums de température sont situés comme attendu sur le niveau intermédiaire. A 3.56 GHz, les deux résonateurs (vu du signal d'entrée) montrent plus de pertes que le troisième, ce qui explique que les zones les plus chaudes soient à cet endroit. A la fréquence centrale, le second résonateur est celui qui présente le plus de pertes, tandis que le troisième le moins sur toute la bande de fréquence, comme l'illustre la figure 7. Ainsi, le TEG sera placé au niveau des deux premiers résonateurs. Il est important de préciser que les simulations ont été réalisées en considérant une convection naturelle sur le niveau *top* et *bottom* avec un coefficient de convection de h_{conv} = 10 W/m^2.°C. L'effet du TEG dans le profil thermique du circuit peut être modélisé en considérant un coefficient de convection plus important h_{conv} au niveau de la zone du patch, ce qui va induire une réduction du maximum de température. En première approximation, ce coefficient de convection équivalent peut être associé au dissipateur. En considérant par exemple un h_{conv} équivalent sur le patch métallique de 120 W/m^2.°C, la température sur le patch sera réduit de 75 °C à 52 °C, ainsi, plus de puissance pourrait être injectée dans le circuit sans risque de destruction (i.e., l'APHC augmente).

Le TEG utilisé pour cette étude est le TGP-651 de Micropelt, qui présente une surface de 15 mm × 10 mm. Le patch métallique a donc la même surface et non plus grande pour ne pas réduire la température et donc la puissance récupérée. Le TEG présente un coefficient Seebeck de 60 mV/°C, une résistance thermique de 28 °C/W et un poids de 2.2 g.

Différents scenarios ont été analysés en mesure pour lesquels un dissipateur a été utilisé sur le TEG et une fréquence de travail qui varie. La puissance du signal a été fixée à 2 W. L'état stationnaire est atteint au bout de 3 à 5 minutes (en fonction du dissipateur utilisé). Le TEG a été adapté électriquement avec une résistance de 180 Ω. Un multimètre numérique a été connecté à cette résistance pour contrôler la puissance obtenue. Le circuit a été suspendu à 5 cm au dessus de la table de mesure pour correspondre au mieux à une condition de convection naturelle comme en simulation (Fig. 8).

Le tableau 1 résume les résultats de mesure. Comme attendu, la puissance récupérée augmente quand la résistance thermique du dissipateur diminue. Le maximum de puissance récupérée est obtenu pour le cas d'un signal d'entrée à 3.48 GHz et pour le plus grand dissipateur disponible. Dans ce cas, une puissance de 245 µW a été récupérée. Il est important de noter que cette puissance alimente continument la charge, ce qui est une caractéristique très intéressante. Ainsi, si la charge est remplacée par un système de gestion d'énergie adéquat, cela peut alimenter des sous-systèmes tels que des capteurs ou autres sous-systèmes hyperfréquences qui consomment de la puissance pendant seulement quelques fractions de temps.

Le TEG a été caractérisé de manière isolée à l'aide d'un plateau chauffant. La figure 9 montre les résultats

obtenus pour les différents scénarios. Comme attendu, la puissance fournie à la charge suit une loi quadratique en fonction de la température. Par comparaison des niveaux de puissance issus de la figure 9 avec ceux du tableau 1, la température sur le patch peut être extraite pour chaque cas. Le tableau 2 décrits les valeurs ainsi obtenues.

Potentiellement, avec le circuit proposé, une puissance d'environ 1.8 mW pourrait être fournie à la charge de 180 Ω pour un signal d'entrée correspondant à une température de 100°C sur le patch. Pour un *hconv* équivalent de 120°C à 3.56 GHz, cela correspondrait à une puissance d'entrée de 5.1 W.

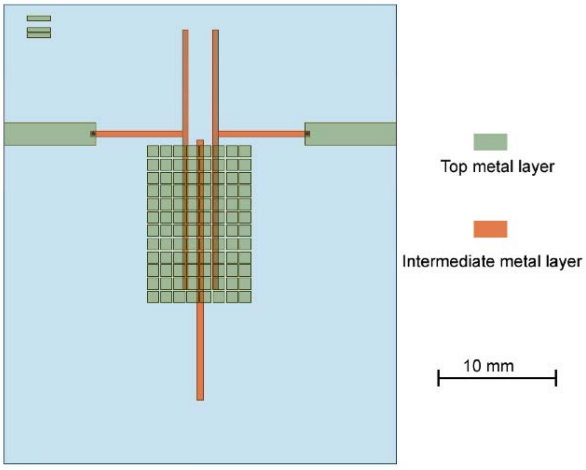

Figure 3. Dessin du démonstrateur.

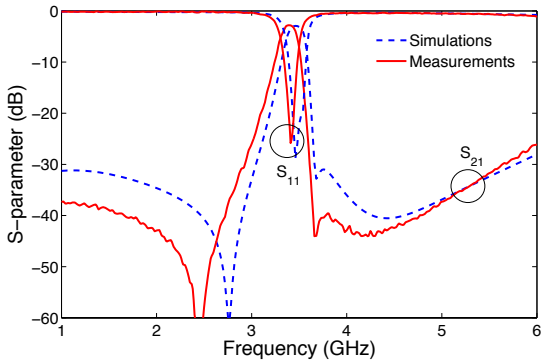

Figure 4. Réponse simulée et mesurée du filtre implémenté.

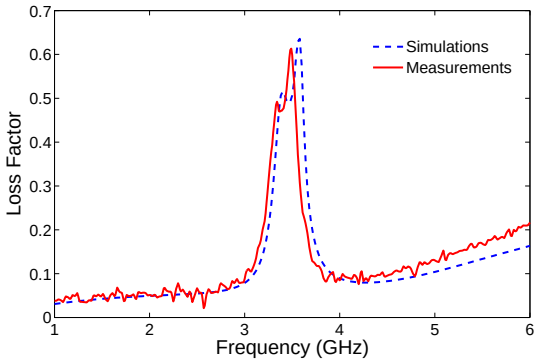

Figure 5. Réponse simulée et mesurée du facteur de perte du filtre implémenté.

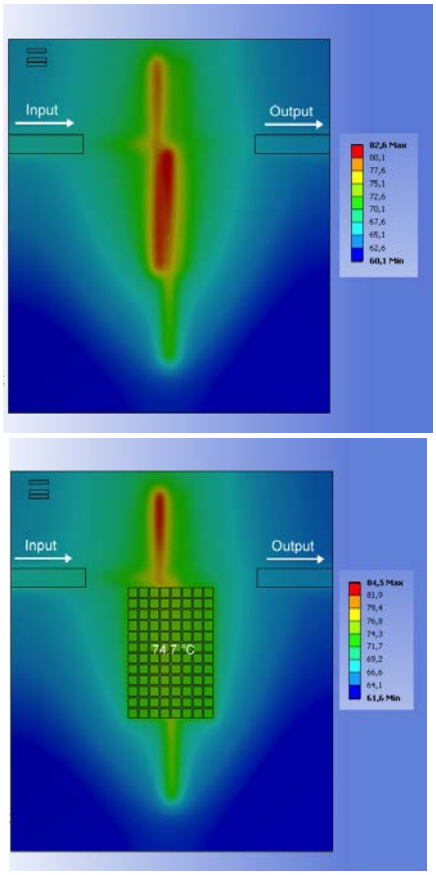

Figure 6. Profils thermiques sans (haut) et avec patch métallique (bas).

	Puissance récupérée (µW)	
	3.4 GHz	3.48 GHz
Pas de dissipateur	17	19
Dissip. ABL BGA-STD-010	75	117
Dissip. ABL BGA-STD-050	150	245

Tableau 1. Résumé des mesures. Les mesures ont été réalisées pour différentes T_{amb} (20-25 °C). Les valeurs moyennes sont présentées. Les mesures diffèrent de moins de 10% pour les différentes T_{amb}.

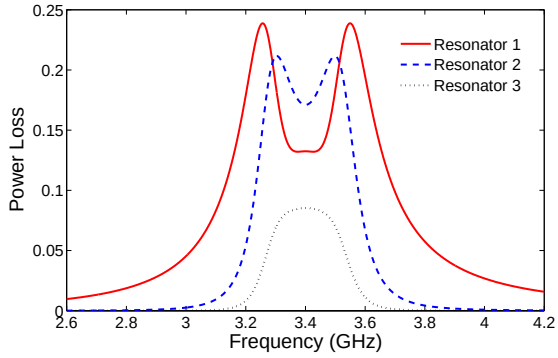

Figure 7. Puissance perdue par watt dans chaque résonateur. Simulation circuit idéale pour un filtre de Chebyshev d'ordre 3 avec 0.1 dB d'ondulation et un facteur de qualité de résonateur de Qu=100.

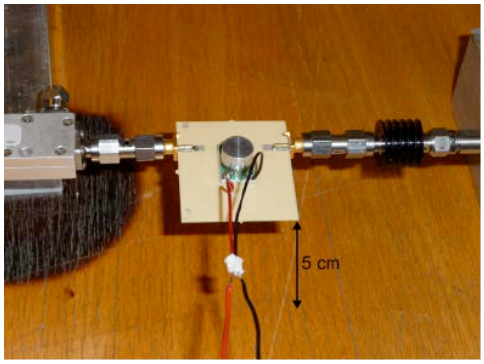

Figure 8. Circuit fabriqué avec intégration du TEG et sans dissipateur thermique.

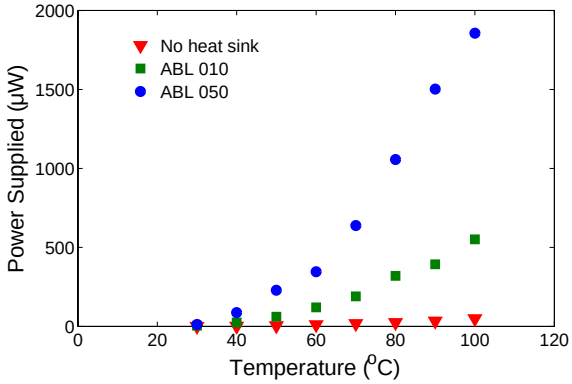

Figure 9. Puissance fournie à une charge de 180 Ohms pour le TEG utilisé (TGP-651) en fonction de la température de base et pour différents dissipateurs. Les mesures ont été réalisées avec une température ambiante de 22°C.

4. Discussion

Les résultats obtenus montrent un niveau de puissance récupéré comparable à des systèmes de récupération de type RF. L'efficacité du circuit proposé peut être défini par

$$\eta = \frac{P_{DC,load}}{P_{loss}} \quad (3.$$

où $P_{DC,load}$ est la puissance fournie à la charge et P_{loss} est la puissance perdue en chaleur par le circuit. P_{loss} peut être écrit comme

$$Ploss = LF.P_{in} - P_{rad} \quad (4.$$

Où P_{rad} est la puissance perdue par rayonnement par le circuit microruban et ne produisant aucune chaleur sur le circuit. Pour le circuit fabriqué, et en considérant la définition (3), η est d'environ $2.2 \cdot 10^{-4}$ (pour le cas où 245 µW est récupéré). Cette faible valeur n'est pas surprenante du fait que l'efficacité des TEG commerciaux définie par

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{DC,load}}{q} \quad (5.$$

est habituellement inférieure à 1%. Dans l'équation (5) q est le flux de chaleur à travers le TEG. Une autre définition de l'efficacité pourrait être utilisée, celle de Carnot, qui définit le maximum d'efficacité pour un système chauffant par

$$\eta_c = \frac{\Delta T_{TEG}}{T_{hot}} \quad (6.$$

Cependant, cela n'apporte pas d'information sur la puissance convertie.

La puissance récupérée pourrait être ainsi augmentée par l'amélioration de l'efficacité des TEGs ou bien-sûr en augmentant le flux de chaleur à travers le TEG. Celui pourrait être réalisé en combinant différents matériaux, avec des propriétés thermiques différentes pour le circuit multi-couches.

	Température à la base du TEG (°C)	
	3.4 GHz	3.48 GHz
Pas de dissipateur	68	72
Dissip.ABL BGA-STD-010	53	59
Dissip. ABL BGA-STD-050	45	52

Tableau 2. Résumé des mesures.

5. Conclusion

Ce papier démontre une potentialité de récupération d'énergie pour des dispositifs planaires hyperfréquences et pour des puissances de signaux modérées. Une TEG est intégré au circuit pour convertir cette énergie en puissance électrique DC. Des règles de dessin sont proposées pour isoler le TEG du signal RF. Un filtre passe-bande a été réalisé dans la bande WiMax et, pour un signal de 2 W à 3,48 GHz, 245 µW ont pu être récupérés. Cette puissance pourrait être utilisée pour alimenter un sous-système. Un travail futur doit être réalisé pour optimiser le transfert chaleur à travers le TEG de manière à augmenter la puissance récupérée.

6. Bibliographie

[1] K. C. Gupta, R. Garg, I. J. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip lines and slotlines.* Artech house Boston, 2 ed., 1996.

[2] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filter for RF/Microwave Applications.* New York: John Wiley and Sons, inc., 2001.

[3] M. Sanchez-Soriano, M. Edwards, Y. Quere, D. Andersson, S. Cadiou, and C. Quendo, "Mutiphysics study of rf/microwave planar devices: Effect of the input signal power," *EuroSime 2014*.

[4] M. Sanchez-Soriano, Y. Quere, V. Le Saux, C. Quendo, and S. Cadiou, "Average power handling capability of microstrip passive circuits considering metal housing and environment conditions," *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manuf. Technology*, vol. 4, pp. 1624–1633, Oct 2014.