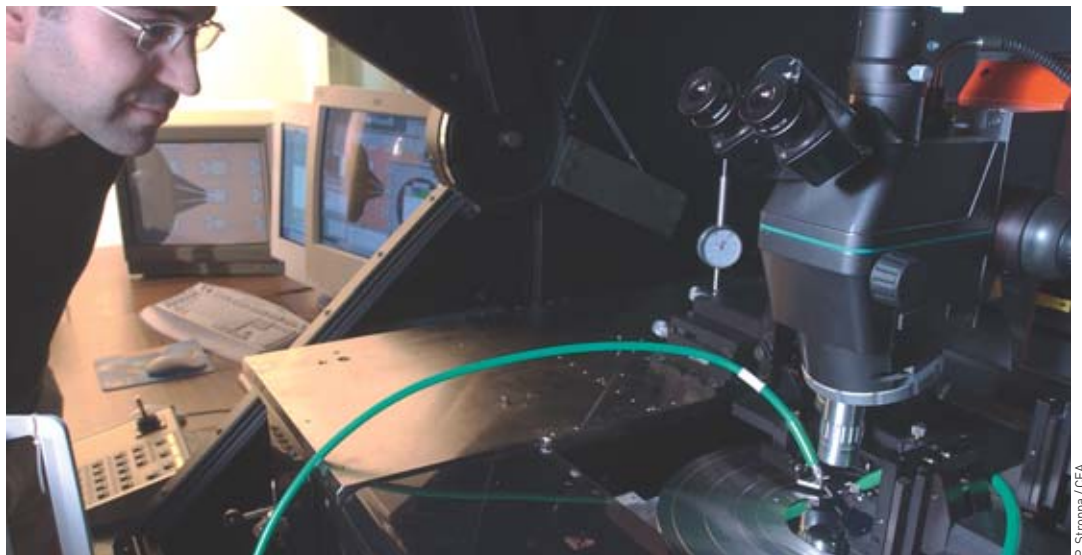


Des matériaux intégrés pour de nouvelles fonctions radiofréquence sur le silicium

Avec la technologie du silicium, l'intégration de nouveaux matériaux magnétiques et diélectriques pour la radiofréquence (RF) a ouvert de multiples perspectives applicatives : miniaturisation des émetteurs/récepteurs, versatilité des systèmes de communication, réseaux de capteurs auto-adaptatifs, qui répondent à des enjeux sociétaux dans le domaine médical, l'automobile, la domotique... **Le défi technologique à relever est à la mesure des retombées scientifiques et industrielles.**

Salle de mesures radiofréquence du Leti pour connaître la réponse, en fréquence, de certains composants. Les mesures se font sous pointes (c'est-à-dire directement sur le wafer) et peuvent aller jusqu'à 65 GHz.



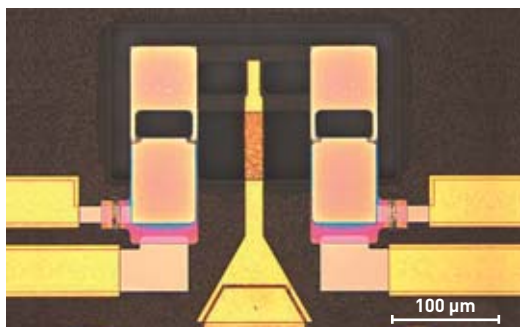
P. Stroppa / CEA

Issus des techniques de fabrication de la **micro-électronique**, les microsystèmes s'adjugent désormais une part croissante dans les systèmes électroniques. Il s'agit de ce que l'on appelle aujourd'hui l'approche *More than Moore*, extension de la célèbre loi de Moore des matériaux **semi-conducteurs**. Cela s'explique par une meilleure compatibilité des matériaux, notamment en matière de contamination des semi-conducteurs. D'où l'idée d'intégrer toujours plus de nouveaux matériaux pour accéder à des fonctions inédites. Dans la palette des opportunités offertes, le Laboratoire des composants radiofréquence (LCRF), entité du Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information (Leti), s'investit, depuis une quinzaine d'années déjà, dans l'intégration de matériaux **magnétiques** et **diélectriques**.

Aujourd'hui, les **couches minces** magnétiques, héritières des têtes d'enregistrement magnétique et de lecture des disques durs, entrent dans la composition d'une multitude de technologies utilisant des applications hyperfréquence – par exemple, les oscillateurs à

électronique de **spin**⁽¹⁾, les inductances planaires pour la téléphonie mobile ou les systèmes de marquage antivol. Un tel succès tient à ce que l'ingénierie des couches minces magnétiques permet, désormais, d'adapter leurs propriétés aux applications visées, grâce à la mise au point de nouveaux matériaux homogènes ou hétérogènes dont la structure est parfaitement maîtrisée à l'échelle de quelques **nanomètres** seulement. Aujourd'hui, le Leti et l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac) se situent au meilleur niveau de l'état de l'art mondial grâce à une forte pluridisciplinarité balayant tout le spectre allant de la physique fondamentale à l'application technologique et à l'instrumentation hyperfréquence. Parvenus à ce stade, les chercheurs en magnétisme doivent néanmoins relever un nouveau défi : réaliser des dispositifs dotés de fréquences de fonctionnement élevées et/ou « agiles

(1) *Stockage de l'information : les acquis et les promesses du nanomagnétisme et de la spintronique*, Diény Bernard et Ebels Ursula, article paru dans *CLEFS CEA*, n° 56 (pages 62 à 66), hiver 2007-2008.



Matthieu Queff/C EA

Figure 1. Actionneur piézoélectrique PZT avec ses contacts. Au milieu, on distingue la ligne radiofréquence (RF) transportant le signal. Le contact est la partie la plus haute de cette ligne. C'est cette zone qui viendra toucher un autre contact en face (non représenté) afin de fermer le circuit électrique. Deux actionneurs piézoélectriques sont situés de part et d'autre de la ligne RF. Les pistes dorées qui s'en échappent constituent les commandes permettant de les actionner.

en fréquence », comme des inductances variables, composants qui n'existent pas aujourd'hui. Y parvenir suppose de surmonter les contraintes liées aux faibles dimensions des dispositifs mais aussi de répondre aux nouvelles exigences des applications, en termes de fréquences, de facteurs de qualité et de consommation. Les couches minces diélectriques ont également beaucoup progressé. Elles s'avèrent particulièrement adaptées aux capteurs et aux actionneurs utilisant l'effet piézoélectrique (figure 1), aux capacités intégrées de forte valeur ou encore aux composants agiles pilotables en tension tels que les capacités variables : par exemple, les micro-interrupteurs permettant de passer d'un standard de communication à un autre dans un téléphone portable, les lentilles à focales variables intégrées dans les appareils photos, les capacités de détection embarquées dans les *pacemakers*...

La réalisation des couches minces diélectriques par le Leti s'appuie sur deux types de matériaux, à savoir, le nitrure d'aluminium (AlN) et les oxydes de la famille pérovskite. Pour les chercheurs, l'enjeu s'avère double. D'abord, il s'agit pour eux d'accroître la qualité intrinsèque du matériau et ainsi de parvenir à l'état de l'art – un objectif déjà atteint en ce qui concerne l'AlN et le zirconate titanate de plomb (PZT). Ensuite, ils doivent parvenir à intégrer ces couches pour en faire des dispositifs, tout en conservant la qualité du matériau. Que ce soit pour les couches magnétiques ou les couches diélectriques, les chercheurs ont compris l'impérieuse nécessité d'opérer la jonction entre différentes disciplines propres aux matériaux, aux composants et aux systèmes – un rapprochement qui passe par l'abolition des distances, voire des frontières, séparant encore les physiciens des concepteurs d'applications.

Des matériaux magnétiques à très forte perméabilité

Concernant la miniaturisation des circuits radiofréquence, l'une des contraintes fortes réside dans l'intégration des inductances, des résonateurs et des antennes : il s'agit, en effet, de composants passifs⁽²⁾ particulièrement consommateurs de surface. L'intégration de films magnétiques sur du silicium se présente, d'ores et déjà, comme une voie prometteuse

(2) Composant n'utilisant pas de transistor.



O. Redon/CEA

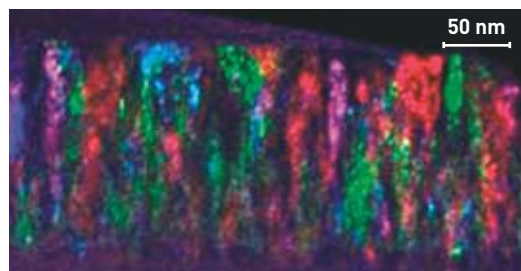
Dépôt de couches minces magnétiques et diélectriques à l'intérieur d'une chambre ultravide. Cet élément sert à transférer les substrats vers les chambres de dépôt, puis à ressortir le produit fini avec sa couche mince. Ceci permet de contrôler l'épaisseur de la couche à l'atome près.

mais avec une condition à la clé : pouvoir accéder à un niveau de perméabilité élevé tout en ayant des pertes faibles.

Les films nanocristallins à base de fer ou d'un alliage de fer et de cobalt

Un tel niveau de perméabilité, associé à des pertes faibles, suppose l'élaboration de nouveaux matériaux magnétiques, dotés d'une microstructure appropriée capable de garantir une utilisation à très haute fréquence. Les films ferromagnétiques nanostructurés (la taille des grains est seulement de quelques nanomètres), à base de fer ou d'alliage fer/cobalt, figurent en tête des candidats. En effet, leur perméabilité hyperfréquence s'avère proportionnelle à leur aimantation à saturation, celle-ci étant la plus élevée connue.

Dès l'année 2006, le LCRF a démontré que les films nanostructurés de type FeX(N,O), où « X » est soit du tantale soit de l'hafnium, présentent des propriétés dynamiques remarquables (jusqu'à plus de 2 gigahertz), avec des constantes d'amortissement particulièrement faibles (figure 2). Ce résultat tient à une microstructure cristalline, très particulière, composée de grains de moins de 5 nanomètres, très finement dispersés dans une matrice amorphe fortement résistive. Ces matériaux nanostructurés allient des résistivités élevées (de 100 à 1000 µΩ/cm) avec des aimantations à saturation fortes, de l'ordre d'un tesla. Cette combinaison remarquable permet une intégration technologique du matériau magnétique au plus près de l'élément inductif, en minimisant le risque de capacités parasites nuisibles au fonctionnement à haute fréquence des inductances planaires.



B. Viale/CEA

Figure 2. Image au microscope électronique à transmission d'une coupe transverse d'un film nanostructuré de FeHf(N, O). Les grains ferromagnétiques sont de très faibles dimensions (5 à 10 nm), ce qui donne une grande perméabilité, et finement dispersés dans une matrice amorphe, ce qui confère au film une grande résistivité.

Les multicouches à couplage d'échange antiferromagnétique/ferromagnétique

Le couplage d'échange interfacial d'un matériau ferromagnétique avec un autre, antiferromagnétique celui-là, se traduit par le décalage du cycle d'hystérésis du matériau ferromagnétique vers une valeur de champ potentiellement très élevée (figure 3). Cette propriété fut à l'origine de tous les dispositifs magnétorésistifs modernes. En 2007, le LCRF a démontré que de tels matériaux, notamment ceux constitués d'une succession de films à base de manganèse/nickel ou manganèse (NiMn), manganèse/iridium et de fer/cobalt (FeCo), présentaient aussi un comportement dynamique inégalé. Celui-ci peut atteindre des fréquences d'une dizaine de gigahertz, autrement dit une gamme spectrale jusqu'alors inaccessible aux matériaux ferromagnétiques.

L'intégration de ces matériaux a permis la réalisation d'inductances exploitables à 5 GHz, avec des topologies beaucoup plus compactes que celles des inductances planaires habituelles. Des filtres extrêmement simples ont également été réalisés. Ils utilisent le pouvoir absorbant du matériau à sa résonance, ce qui permet de dissiper plus de 99 % du signal transmis. Ce type de filtres peut être utilisé jusqu'à plus de 10 GHz.

Les matériaux diélectriques et piézoélectriques

L'intégration d'un nouveau matériau dans une technologie complexe requiert une étude à part entière – rares étant ceux capables de franchir toutes les étapes menant à l'industrialisation.

Les capacités intégrées de forte valeur

Dans le cadre d'une collaboration avec ST Microelectronics, le Leti vient de réaliser une première : synthétiser un matériau à base d'un alliage de titanate de strontium (SrTiO_3) déposé au-dessus d'un circuit d'amplification CMOS (pour Complementary Metal Oxide Semi-conductor) afin d'obtenir des capacités à très forte permittivité connectées au circuit CMOS. Il s'agit d'une véritable prouesse technique. En effet, une contrainte très dure pour réaliser de nouvelles fonctions au-dessus des circuits CMOS (approche dite

Above IC) consiste à respecter une température de procédé inférieure à 450 °C. Or, les matériaux de la famille du SrTiO_3 (dit pérovskite, du nom de la structure cristalline) nécessitent habituellement des températures de synthèse autour de 700 °C. Grâce à l'utilisation d'une méthode de dépôt particulière, mise au point par le LCRF et le Laboratoire des technologies de surface (LTS/Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), les chercheurs sont parvenus à synthétiser le SrTiO_3 , à 400 °C, sur un circuit CMOS. Le circuit fonctionnel a permis de valider l'approche dite *Above IC* consistant à réaliser une fonction complète sur une seule puce, et non pas seulement un composant.

Les capacités variables pour l'adaptation d'impédance

Un autre matériau, de structure pérovskite, est à l'étude. Il s'agit du titanate de strontium baryum (Ba,SrTiO_3 ou BST). Son intérêt résulte des propriétés de variabilité de sa constante diélectrique en fonction de la tension continue. Cette propriété ouvre la voie vers la réalisation de composants d'impédance variable pilotables par une tension externe. Elle permet de multiplier par quatre le ratio d'impédance tout en limitant les pertes diélectriques à moins de 1 % pour quelques GHz. La fonction recherchée est ici l'adaptation d'impédance en temps réel. Celle-ci permettra aux amplificateurs de puissance des systèmes de télécommunications nomades de fonctionner toujours avec un maximum d'efficacité et donc de diminuer leur consommation. La durée de la batterie sera alors multipliée par deux.

Les actionneurs électromécaniques

Parmi les matériaux diélectriques, certains possèdent des propriétés piézoélectriques. Ceux qui possèdent les plus forts coefficients piézoélectriques en couches minces appartiennent à la famille des pérovskites. Il s'agit du PZT et du PMN-PT⁽³⁾. Le Leti s'investit fortement sur l'intégration du PZT. En raison de la très forte demande des industriels du secteur des télécommunications, l'un des objectifs concerne la réalisation d'actionneurs piézoélectriques sur une plateforme technologique utilisant des tranches de silicium de 200 mm. Le grand diamètre de ces tranches permet de multiplier le nombre de composants réalisés sur la même plaquette et ainsi, de diminuer le coût du composant unitaire. Une collaboration a été engagée avec Freescale en ce sens. Elle a déjà permis d'obtenir des tranches comportant des micro-interrupteurs à radiofréquence fonctionnels dont la tension d'actionnement ne dépasse pas 5 V, limite fondamentale pour fonctionner dans un téléphone portable. La figure 1 montre une de ces structures unitaires, avant l'assemblage final, avec la protection supérieure appelée capot.

Les filtres acoustiques dédiés aux radiofréquences

Dans la palette des matériaux piézoélectriques, le CEA a également choisi de travailler sur le nitrure d'aluminium (AlN) dont les propriétés acoustiques sont exceptionnelles. Il s'agit du constituant de la couche

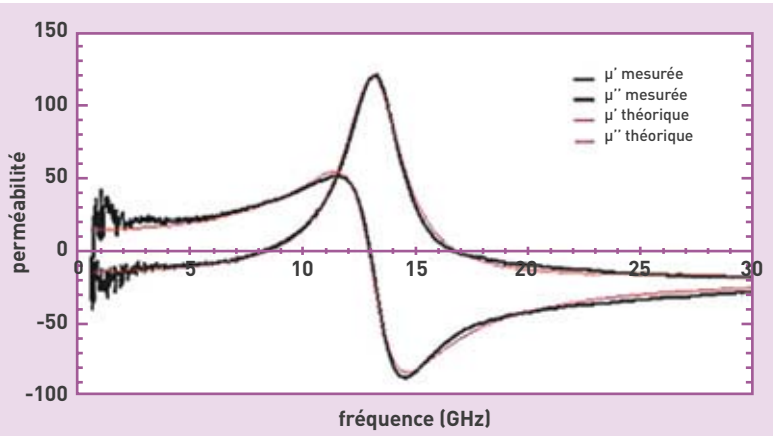


Figure 3.

La spectrométrie magnétique permet de mesurer la perméabilité complexe d'un matériau en fonction de la fréquence. La partie réelle μ' exprime la capacité du matériau à répondre à un champ magnétique extérieur et la partie imaginaire μ'' représente les pertes dissipées dans le matériau. L'exemple correspond aux réponses expérimentales (en noir) et théoriques (en rouge) d'une couche ferromagnétique de FeCo, couplée avec une couche antiferromagnétique de NiMn (on parle de couche polarisante).

⁽³⁾ $\text{Pb}(\text{Mg,Nb})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$.

active des résonateurs acoustiques à radiofréquence présentant des pertes extrêmement faibles (moins de 0,1 %). Réalisés à base d'AlN, les filtres de fréquence entrent dans la plupart des systèmes de communication sans fil. Parmi ses récents développements, le Leti vient de mettre au point un filtre obtenu par la superposition de deux résonateurs couplés l'un sur l'autre et offrant donc une compacité maximale (figure 4). Outre le CEA, peu d'organismes au monde peuvent se prévaloir d'un savoir-faire capable de telles performances.

Une piste ambitieuse pour les diélectriques : les monocristaux intégrés

Aujourd'hui, les chercheurs veulent aller encore plus loin dans le développement des couches diélectriques. Le Leti vise l'intégration de monocristaux piézoélectriques à partir de deux approches : l'épitaxie sur silicium et le report de couches – les matériaux étudiés étant les pérovskites, les ilménites⁽⁴⁾ et l'AlN.

- L'épitaxie consiste à réaliser des couches monocristallines, autrement dit des couches sans défauts cristallins, obtenues par évaporation par jet moléculaire (EJM). Très prometteurs, les premiers résultats démontrent l'amélioration considérable de la qualité structurale du matériau réalisé. Ces avancées résultent de diverses collaborations menées par le Leti avec le [Centre de recherche sur l'hétéro-épitaxie et ses applications \(CRHEA/CNRS\)](#), l'[Institut des nanotechnologies de Lyon \(INL\)](#) et [IBM Zurich](#).

- Le report de couches consiste à coller une couche piézoélectrique d'épaisseur submicronique, sur une tranche d'accueil en silicium, à partir d'une tranche monocristalline de ce même matériau piézoélectrique. Ce procédé unique, développé par le Leti et [Soitec](#), a fait la preuve que le [couplage électromécanique](#) de couches de LiNbO_3 (niobate de lithium), de structure ilménite, peut égaler la valeur du matériau massif (soit environ 45 %). Il est important de remarquer que ce résultat, obtenu sur des couches submicroniques, surpasse tous ceux publiés sur les couches minces polycristallines, quel que soit le matériau piézoélectrique considéré. Il s'agit d'un résultat très encourageant développé en collaboration avec le [Laboratoire Femto ST](#) de Besançon.

Un renouveau de la magnétoélectricité : les multicouches multiferroïques

Au premier rang des avantages collatéraux découlant de la R & D sur les matériaux multicouches, figure le découplage entre plusieurs disciplines scientifiques.

Ainsi, depuis 2008, le LCRF contribue au renouveau de la magnétoélectricité, à l'échelle mondiale, en ouvrant une nouvelle voie pour les matériaux multiferroïques qui vise à favoriser leur intégration. L'objectif consiste à combiner artificiellement des propriétés de natures différentes, notamment pour reproduire l'effet piezomagnétique. De multiples applications sont déjà envisagées (antennes et filtres accordables, commutateurs, mémoires...) avec, pour dénominateur commun, une consommation considérablement réduite grâce à une commande de l'aimantation par le champ électrique et non plus par le champ magnétique, gros consommateur de courant. Le principe inverse (générer de la

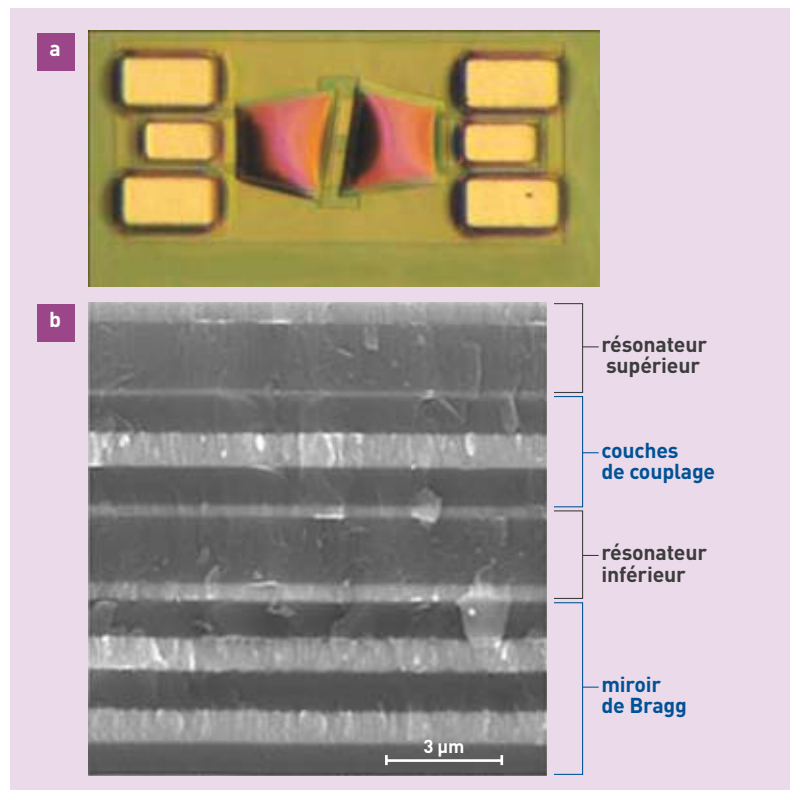


Figure 4. Filtres radiofréquence, à couplage acoustique, réalisés à partir de résonateurs piézoélectriques à base de nitrure d'aluminium (AlN). La figure « a » est une vue de dessus d'un filtre à couplage acoustique à deux sections (quatre résonateurs en tout). Les six rectangles latéraux sont les contacts électriques alors que les deux formes dites « apodisées », que l'on devine bombées, sont des résonateurs recouverts d'une couche de protection développée au Leti. La figure « b » est une vue, en coupe, du filtre (hors protection). On notera le nombre de couches très important nécessaire à la réalisation du composant (quatorze couches). Le miroir de Bragg empêche la perte d'énergie dans le substrat de silicium sous-jacent. Les résonateurs du bas et du haut sont constitués par une couche piézoélectrique (AlN) et par deux électrodes (molybdène). Entre ces deux résonateurs sont disposées des couches, dites de couplage, qui permettent de gérer l'échange d'énergie acoustique entre les résonateurs. C'est la combinaison de ces quatre éléments qui permet de réaliser la fonction de filtrage.

tension à partir d'une source de champ magnétique) est également à l'étude car elle présente un grand intérêt pour la récupération d'énergie.

Concernant la radiofréquence, l'avènement de la [radio-opportuniste](#) va opérer un tournant historique. Il s'agit d'un domaine où les difficultés de miniaturisation et de multifonctionnalité des blocs d'émission (réception et traitement du signal) obligent à une véritable rupture culturelle. Les départements système du Leti⁽⁵⁾ figurent parmi les acteurs majeurs de cette initiative dans la communauté mondiale des télécommunications. Mais les verrous technologiques s'avèrent tels, qu'une partie de l'enjeu repose aussi sur les physiciens dont on attend de nouveaux matériaux. Le LCRF étudie actuellement des couches minces magnétodiélectriques capables de combiner une forte perméabilité (μ) et une forte permittivité (ϵ) (figure 5). En électromagnétisme, la manipulation de ces deux grandeurs fondamentales conduit à une miniaturisation extrême des structures résonantes et/ou rayonnantes en hyperfréquences (figure 6). En effet, leur taille représente une fraction de la longueur

(4) LiNbO_3 .

(5) Le Département architecture conception et logiciel embarqué (Dacle) et le Département systèmes et intégration des systèmes (Dsis).

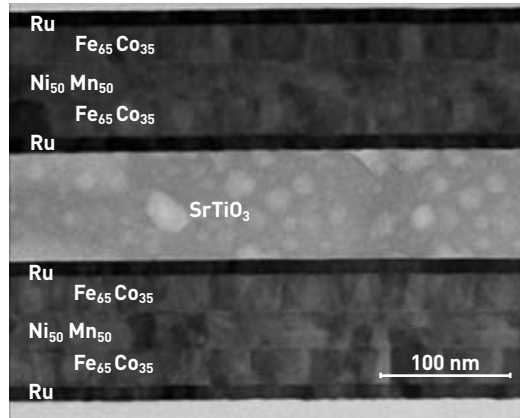


Figure 5. Image au microscope électronique à transmission d'une coupe transverse d'un matériau multiferroïque composite en couches minces possédant une forte perméabilité et une forte permittivité. Le matériau est constitué d'alternance d'électrodes magnétiques principalement formées de FeCo pour une grande perméabilité, et de couches diélectriques de pérovskites SrTiO₃ pour une grande permittivité. À noter qu'une couche de matériau antiferromagnétique (ici NiMn) est utilisée au sein de l'électrode magnétique pour polariser cette dernière pour un usage à très haute fréquence.

d'onde (λ) du signal qui les éclaire. Or, λ est inversement proportionnel à la racine carrée du produit ($\mu \times \epsilon$) du milieu traversé. De plus, si le rapport (μ/ϵ) reste proche de l'unité, l'onde se propage dans le matériau sans désadaptation par rapport à une propagation dans l'air, ce qui évite toute perte d'efficacité. Aujourd'hui, les progrès réalisés en matière de couches minces permettent d'envisager une telle manipulation. Ainsi, pour la toute première fois, le LCRF et le LTS sont parvenus à synthétiser ce matériau avec une alternance

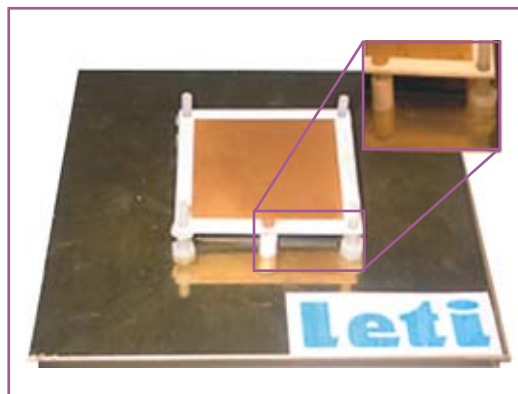


Figure 6. Exemple d'un prototype d'antenne patch à 2 GHz utilisant le matériau multiferroïque de la figure 5. L'antenne est constituée d'un plan de masse (surface inférieure) et d'un toit métallisé (surface supérieure). Le matériau multiferroïque, placé dans la cavité de l'antenne (entre le plan de masse et le toit - voir zoom en haut à droite), permet un fonctionnement de l'antenne à plus basse fréquence sans en augmenter les dimensions, ainsi qu'un élargissement de la bande passante [plage de fréquences où l'antenne rayonne efficacement autour de sa fréquence centrale].

(6) Le pôle d'innovation en micro et nanotechnologies Minatec a été initié par le groupe Grenoble INP qui rassemble des écoles d'ingénieurs réputées, proches du monde industriel et ouvertes à l'international et le CEA Grenoble. Il est soutenu par l'État et l'ensemble des collectivités territoriales. Inauguré le 2 juin 2006, Minatec rassemble les grands acteurs du bassin grenoblois qui influent sur l'évolution des micro et nanotechnologies.

d'électrodes magnétiques utilisant des films faits d'alliage de fer/cobalt (FeCo) ou de nickel/manganèse (NiMn) et des couches diélectriques utilisant du titane de strontium (SrTiO₃) dont la température de cristallisation a pu être encore abaissée (ici à 260 °C) pour une parfaite compatibilité avec les électrodes magnétiques. Le LCRF s'est également engagé sur le développement d'une inductance variable pour la radiofréquence, composant tout à fait nouveau, sur la base de procédés alternatifs au piézomagnétisme précédemment présenté. Très attendu par les concepteurs de circuits de télécommunication, il s'agit d'un composant qui devrait offrir un potentiel d'accordabilité en fréquence jamais atteint pour un composant passif intégré (supérieur à 100 %). Ce type de composant permettra notamment de réaliser des filtres accordables sur des plages de fréquence très grandes, ce qui évitera de recourir à plusieurs technologies de filtres par sous-bande très coûteuses. Une autre application excitante concerne une antenne qui s'auto-adapterait au signal reçu grâce à ce composant commandable. Parvenir à ce résultat suppose d'utiliser la magnétostriction, c'est-à-dire la sensibilité des propriétés magnétiques d'un matériau à la déformation. Or, cette propriété reste très peu exploitée aujourd'hui en dehors de quelques applications d'interrupteur magnétique. Le LCRF étudie des alliages de FeCoB (fer, cobalt, bore) qui présentent le meilleur compromis en termes de performances hyperfréquence et des niveaux de magnétostriction suffisamment élevés (de 20 à 60 10⁻⁶). Pour pouvoir commander ce matériau, il faut également disposer d'un moteur de contrainte adapté et idéalement intégré. Le LCRF travaille actuellement sur une solution tout à fait originale de réalisation de membranes piézoélectriques de PZT dont la déformation est ajustable à partir d'une simple tension électrique et sur laquelle est directement déposé le matériau magnétostrictif.

Ainsi, l'intégration de nouveaux matériaux magnétiques, diélectriques et multiferroïques dans les micro-systèmes, offre de nouvelles fonctionnalités radiofréquence aux dispositifs existants – notamment l'agilité en fréquences pour les systèmes de communication. Cette approche, qui a toujours été suivie par le LCRF, s'inscrit, bien sûr, dans l'environnement historique du Leti lié au silicium. Elle tire la tendance *More than Moore* mais irradie fortement aussi vers la communauté académique. L'Institut Carnot/Leti a ainsi soutenu un certain nombre de collaborations sur ce thème avec le CEA (Inac) et Spintec à Grenoble, le CNRS/XLIM à Limoges, l'Institut d'électronique et de télécommunications de Rennes (IETR) et le CNRS/Laboratoire en sciences et technologies de l'information, de la communication et de la connaissance (LabSTIC) de Brest.

Un tel succès tient à une volonté : placer la recherche avancée sur les matériaux aux propriétés ultimes au cœur d'une infrastructure de niveau mondial (Minatec⁽⁶⁾), dédiée au transfert de haute technologie. Il tient aussi à la confiance partagée par le monde académique et les industriels.

➤ **Bernard Vialat et Emmanuel Defaj**
Institut Leti (Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information)
CEA Centre de Grenoble