



HAL
open science

Sonde haute fréquence avec couplage réduit pour la mesure on-wafer

Tarek Bouzar, Jean Daniel Arnould, Thomas Zimmer, Sebastien Fregonese

► To cite this version:

Tarek Bouzar, Jean Daniel Arnould, Thomas Zimmer, Sebastien Fregonese. Sonde haute fréquence avec couplage réduit pour la mesure on-wafer. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins, France. hal-04697436

HAL Id: hal-04697436

<https://hal.science/hal-04697436v1>

Submitted on 13 Sep 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Sonde haute fréquence avec couplage réduit pour la mesure on-wafer

Tarek Bouzar^{1,2}, Jean Daniel Arnould², Thomas Zimmer¹, Sébastien Frégonesse¹

¹ Université de Bordeaux, CNRS, Laboratoire IMS – UMR 5218, 33400 Talence, France

² Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, TIMA, 38000 Grenoble, France
Tarek.bouzar@u-bordeaux.fr

Résumé – Ce papier présente une nouvelle sonde pour les mesures sur plaques jusqu'à 110 GHz. La sonde est composée d'une membrane Silicium sur laquelle une ligne micro-ruban avec diélectrique en benzo-cyclobutène transporte le signal du connecteur vers les pointes GSG. Cette nouvelle architecture de sonde permet de diminuer le couplage électromagnétique entre la sonde et le substrat ainsi que la diaphonie entre les deux sondes. La sonde BCB MLIN est comparée à une sonde commerciale très utilisées. Une première comparaison, montre que les performances en termes de transmission et réflexion de la sonde isolée sont du même ordre de grandeur. En revanche, la diaphonie est réduite de plus de 15 dB à partir de 50 GHz. Le second test donne l'avantage à la sonde MLIN-BCB notamment lors de mesure de la figure de mérite f_{max} d'un transistor haute fréquence.

1. Introduction

Si des progrès significatifs ont été réalisés dans la technologie des semi-conducteurs et la fabrication de circuits intégrés (CI), l'infrastructure de mesure RF sur plaque pour caractériser ces CI reste largement sous-développée. En effet, les sondes commerciales induisent un couplage élevé avec leur environnement, notamment entre sondes et entre la sonde et le substrat.

Une sonde commerciale repose généralement sur un assemblage manuel de plusieurs composants. En outre cet assemblage entraîne une grande imperfection d'un produit à un autre et limite également les possibilités de réduction de la géométrie de la sonde, qui est nécessaire pour améliorer les performances de mesure en réduisant les couplages. En effet ces sondes ne sont pas suffisamment réduites si on les compare au dispositif de test qui sont de plus en plus petit. La Figure 1 montre la comparaison et l'écart entre la taille d'une sonde commerciale avec un transistor CMOS 65nm STM.

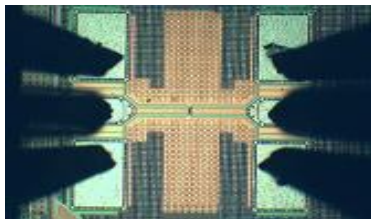


Figure 1. Un transistor CMOS 65nm STM et la sonde Infinity

Par exemple, lors de la mesure d'une structure de type pad-open, les auteurs de [1] ont observés un coefficient de

réflexion non conforme avec ce qui était attendu en simulation électromagnétique et ayant même tendance à dépasser 0 dB (voir figure 2). Un autre exemple très marquant est la difficulté à mesurer la fréquence maximale d'oscillation d'un transistor. Dans [2] la mesure de f_{max} d'un HBT a été réalisée dans deux laboratoires différents, donnant des résultats similaires en dessous de 40 GHz, mais montrant une grande déviation au-dessus. Cela est dû au fait que plus les transistors montent en fréquence, plus les parasites non-corrigés par la calibration est lié aux couplages des sondes prennent de l'importance par rapport au dispositif intrinsèque que l'on recherche à mesurer. Nous avons observé que ce problème de couplage devient encore plus pénalisant lors de la mesure de transistors à effet de champ (FET) dans la technologie FDSOI de 28 nm, en particulier pour les géométries les plus petites.

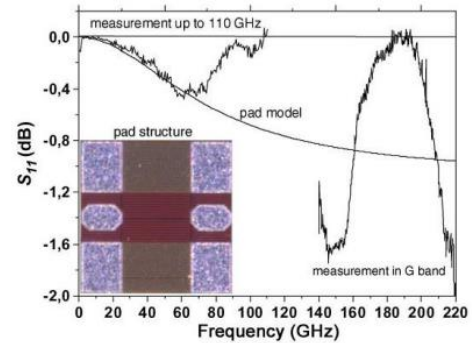


Figure 2. Paramètres mesurés et simulés de la structure d'un plot prototype après étalonnage

Pour éviter les couplages parasites mentionnés ci-dessus et améliorer la précision des mesures, les ingénieurs en caractérisation sont également contraints d'augmenter l'espace entre le port 1 et le port 2 d'une même structure de test pour éloigner les deux sondes. Pour illustrer cette remarque, la Figure 3 montre une étude du coût de 25 puces avec 48 structures de test en fonction de la distance inter-sondes. L'étude est réalisée en utilisant deux technologies avancées de STMicroelectronics, les technologies FDSOI 28 nm et BiCMOS 55 nm. Sur la même figure, nous avons indiqué la distance inter-plots choisie dans les différents kits de calibration sur tranche provenant de [3], [4], en supposant que nous avons fait un choix similaire à ces groupes pour sélectionner la distance inter-plots. Cette Figure démontre sans aucun doute l'énorme différence de coût pouvant découler de ce choix : d'une part, une structure de test très coûteuse, et d'autre part, des mesures potentiellement erronées.

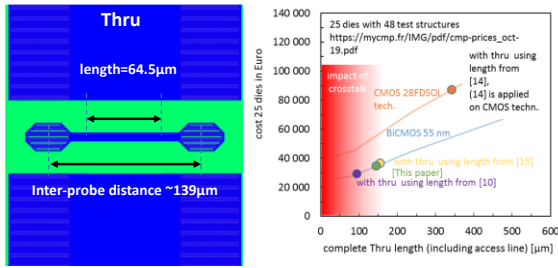


Figure 3. a) exemple de structure de test, b) scénario d'estimation des coûts en fonction de la distance inter-sondes

Dans ce contexte, le développement de nouvelles sondes à ondes millimétriques pour la caractérisation sur plaque est obligatoire afin d'améliorer la qualité des modèles de dispositifs fournis aux concepteurs de circuits. Nous proposons une nouvelle approche pour la conception de sondes fabriquée sur membrane de silicium fonctionnant du DC jusqu'à 110 GHz avec un couplage sonde-substrat fortement réduit.

2. Description de la sonde

Lors du choix d'une sonde, les trois principales caractéristiques observées sont les pertes d'insertions, l'adaptation à 50Ω et les caractéristiques de contact DC et RF (résistance, stabilité dans le temps). Cependant, il existe une caractéristique qui joue un rôle majeur lors de l'analyse du couplage sonde-substrat : il s'agit de la capacité de la sonde à focaliser le champ électromagnétique (EM) émanant vers le dispositif à mesurer tout en limitant le champ parasite.

Dans le cadre de ces travaux, nous proposons une nouvelle architecture de sonde fabriquée à partir de process MEMS silicium dont la structure est basée sur une membrane en silicium de 50 μm d'épaisseur sur laquelle est posée une ligne microstrip inversée pour guider l'onde EM. Le diélectrique de la ligne microstrip est en benzocyclobutène. Ce matériau est fréquemment utilisé dans le « back end of the line » des circuits MMIC sur substrat InP dans la gamme sub-THz et est donc adapté à cette application. La géométrie de la MLIN a été choisie pour annuler les modes supérieurs au-delà de 220 GHz. Cette architecture de sondes a été conçue et modélisée à l'aide de l'outil 3D-EM (HFSS) (voir Figure 4). Les paramètres retenus pour le (BCB) sont une permittivité de 2.6 et un tan loss de 0.007 [5]. L'épaisseur du BCB est de 20 μm, tandis que l'épaisseur d'or est de 1 μm.

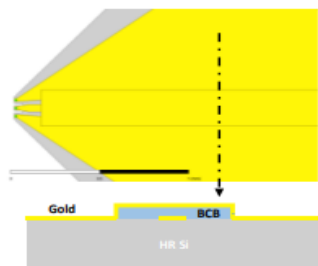


Figure 4. Coupe transversale et vue de dessous de la sonde MLIN BCB

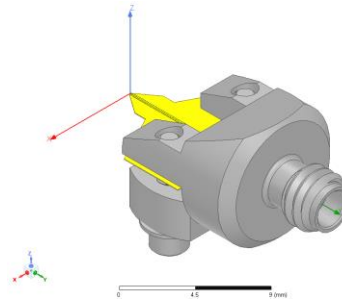


Figure 5. Vue de la sonde avec son connecteur 1 mm

Les résultats présentés en Figure 6 montrent les pertes d'insertions et d'adaptation. Ces résultats englobent l'ensemble de la sonde (longueur de 1 cm), c'est-à-dire le connecteur (1 mm), la MLIN et les pointes qui sont en contact avec un substrat en alumine (voir Figure 5).

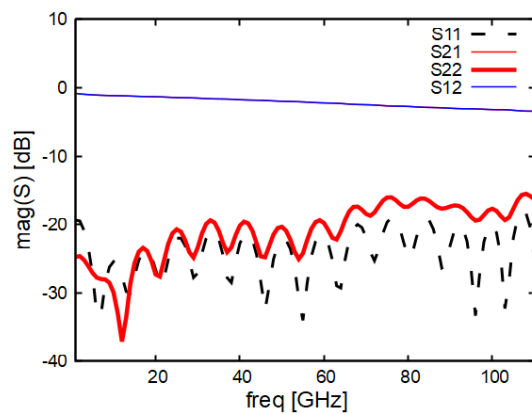


Figure 6. Résultats de la simulation de la sonde (MLIN inversé avec BCB) incluant le connecteur de 1 mm

Ces résultats peuvent être maintenant comparés avec une sonde commerciale, par exemple la sonde Infinity 110 GHz standard utilisant un micro-coaxial UT047, celle-ci étant largement utilisée dans le milieu industriel. La sonde MLIN-BCB présente des pertes d'insertion en deçà de la sonde Infinity mais une adaptation de bon niveau (voir tableau 1). Ces pertes supérieures peuvent être attribuées en grande partie à la MLIN avec 3.23 dB. En faisant l'extraction des pertes, on peut constater que la majeure partie des pertes sont des pertes en conduction avec 2.3 dB et 0.85 dB en pertes dans le diélectrique (dont 0.42 dB pour le SI HR et 0.43 dB pour le BCB). Les pertes au niveau de la transition connecteur-MLIN sont de 0.5 dB.

Probe Infinity	0-35GHz	35-80GHz	80-110GHz
Return Loss	20dB	13dB	11dB
Insertion loss	1dB	1.5dB	2dB
Probe BCB	0-35GHz	35-80GHz	80-110GHz
Return Loss	20dB	17dB	17dB
Insertion loss	1.5dB	1.7dB	3.5dB

Tableau 1. Comparatif des performances de la sonde Infinity [www.formfactor.com] et la sonde BCB

De plus, une seconde étape de comparaison comme précisé plus haut est la capacité de la sonde à focaliser le champ EM. Cette évaluation peut se faire via un modèle EM. Pour construire le modèle EM de la sonde Infinity, nous avons utilisé un équipement de tomographie à rayons X. Cet équipement peut mesurer la structure 3D avec une précision de 0,15 μm et peut ensuite être importée dans l'outil HFSS. Les couplages EM de cette sonde posée sur une charge 50 ohm sont présentés en Figure 7a. De la même manière, nous évaluons la sonde MLIN BCB en Figure 7b.

La sonde Infinity montre un couplage distribué au niveau des pointes et aussi sous la sonde à une distance de 0,5 mm au niveau du point de soudure avec le câble micro-coaxial. Par conséquent, la qualité des mesures est considérablement altérée lors de la mesure de composants sur des technologies très intégrées. La Figure 7b met en évidence une nette amélioration du confinement EM pour la sonde MLIN BCB, ainsi réduisant la diaphonie et le couplage sonde-substrat. Pour des raisons de temps de calcul, seule l'extrémité de la sonde, sur laquelle les couplages EM sont dominants, est simulée.

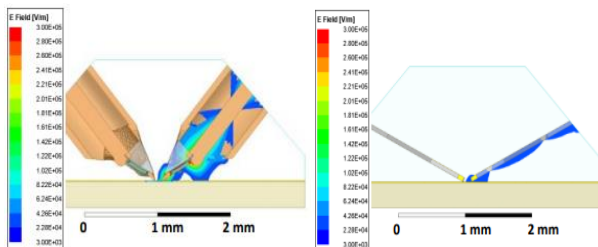


Figure 7. : Distribution du champ EM à 60 GHz
(a) Sonde Infinity et (b) Sonde MLIN_BCB

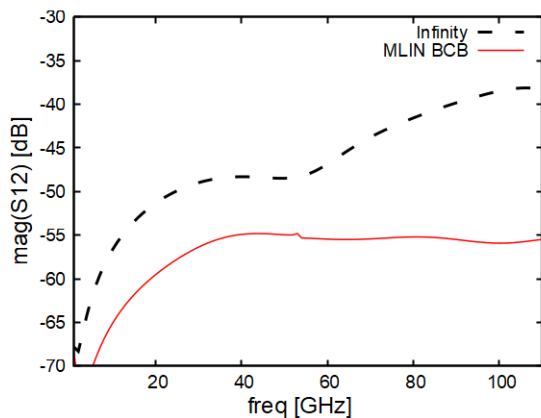


Figure 8. : Résultats de la simulation des deux sondes Infinity et MLIN BCB sur un Load

Ces résultats démontrent non seulement que la diaphonie existe et peut atteindre jusqu'à 15 dB de différences pour deux Sondes différentes, mais aussi que la diaphonie dépend à la fois de la fréquence et des dispositifs testés (DUTs).

3. Application à la mesure d'un transistor HBT SiGe d'une technologie BiCMOS

Pour évaluer les performances de notre sonde, il est particulièrement intéressant d'évaluer ses performances lors de la mesure d'un transistor miniaturisé et haute fréquence. Les structures de tests utilisées sont celle d'une

technologie BiCMOS 55 nm dont la mesure du transistor est très sensible aux effets de couplage de sonde. Nous utiliserons un calibrage TRL sur plaque. En l'absence de réalisation de notre sonde, cette comparaison sera faite par des moyens de simulation électromagnétique. Dans le cas de la sonde commerciale, les résultats de simulations EM sont confrontés à la mesure.

3.a. Description de l'environnement de test

Les structures d'essai fabriquées sont dédiées à l'étalonnage TRL sur wafer. Une description détaillée peut être trouvée dans [6], [7]. Notamment, un plan de masse continu a été utilisé entre les structures et sur l'arrière du plot (voir Figure 9). Ceci réduit la pénétration de l'onde électromagnétique dans le substrat mais a l'inconvénient d'augmenter le couplage sonde-substrat. En outre, la géométrie de plot a été optimisée pour être compatible avec un pas de 100 et 50 μm pour les mesures en ondes millimétriques et submillimétriques.

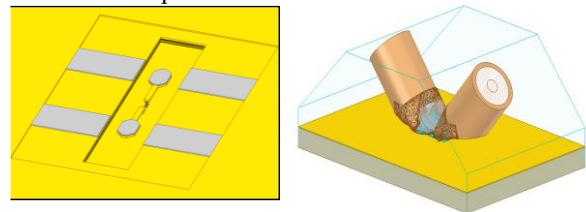


Figure 9. Configuration de la simulation EM avec les sondes Infinity et structure 3D de la charge

La figure 9 montre la conception du plot : le cuivre en jaune et l'aluminium en gris, le diélectrique est supprimé pour la clarté de la figure

3.b. Méthodologie de Simulation EM

Une méthodologie de co-simulation EM-SPICE a été proposée dans [6]. Cette méthodologie permet de simuler une mesure avec sondes sur plaque tout en prenant en compte la géométrie des structures de test, l'environnement électromagnétique, la méthode de calibrage et de de-embedding. Comme décrit dans [7], [8], [9] et afin de reproduire l'environnement de mesure, les sondes sont simulées avec les plots, les lignes d'accès et les structures intrinsèques (voir Figure 9). Deux ports internes sont utilisés dans le cas du transistor pour connecter le modèle SPICE. Ce modèle SPICE représente le transistor intrinsèque. De plus, la simulation est effectuée pour un THRU (95 μm y compris les lignes d'accès), un reflect, une ligne (625 μm), une charge 50 Ω , un transistor-open et un transistor-short. L'ensemble des lignes permet un étalonnage TRL précis de 20 GHz à 110 GHz. L'ensemble des données de simulation est traité en utilisant exactement la même procédure que celle utilisée pour les mesures et en appliquant un étalonnage TRL avec correction d'impédance en utilisant la charge. Une étape de-embedding est ensuite réalisée afin de remonter au transistor intrinsèque.

3.c. Analyse des résultats

Trois jeux de données sont calibrés, épluchés et analysés : i) les mesures réalisées avec la sonde Infinity 110 GHz sur le wafer BiCMOS 55 nm ; ii) Les

simulations EM-SPICE utilisant le modèle de sonde Infinity 110 GHz ; iii) Les simulations EM-SPICE utilisant le modèle de sonde MLIN-BCB proposé dans cet article. Ces trois jeux de données, après calibration et épiluchages permettent de remonter au transistor intrinsèque et doivent être comparés à la simulation SPICE-HICUM du transistor. En effet, la précision de la méthode de calibration-épluchage peut être évaluée par sa correspondance au modèle intrinsèque initial.

Premièrement, nous nous intéressons particulièrement à S_{12} (voir Figure 10) car il est fortement influencé par la diaphonie. Nous retrouvons sur la figure 11, les trois jeux de données décrit ci-dessus ainsi que la simulation SPICE du transistor servant de référence. Premièrement, la comparaison entre mesure et simulation des données utilisant la sonde Infinity valide la méthodologie de simulation [8]. L'ensemble des données sont similaires jusqu'à 40 GHz démontrant la validité de l'ensemble sonde, calibration, épiluchage. Au-delà de 40 GHz, les mesures ainsi que les données de simulation de la sonde Infinity présente un comportement inattendu en déviant fortement de notre référence contrairement aux données obtenues avec la sonde MLIN BCB.

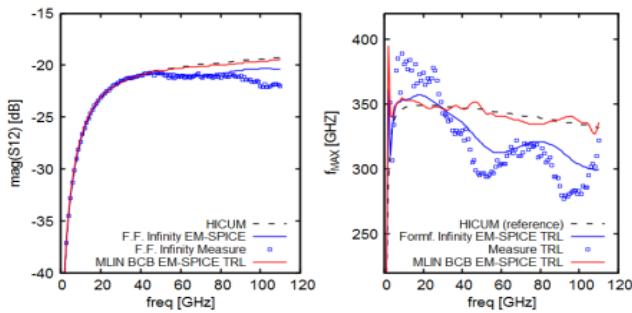


Figure 10 : Emulation de la mesure d'un transistor B55 en utilisant la sonde Infinity et notre sonde (MLIN sur BCB)

Comme expliqué précédemment, la mesure des figures de mérite (FOMs)[3] des transistors avancés et miniaturisés devient un défi dès lors que sa fréquence maximale (f_{MAX}) dépasse plusieurs centaines de gigahertz. Ainsi, la figure 10 reprend les trois jeux de données, cette fois ci exploités pour extraire la f_{MAX} . Concernant, les sondes Infinity, nous pouvons constater un comportement inattendu et s'éloignant du comportement du transistor intrinsèque. En effet, la mesure ainsi que la simulation s'écartent progressivement de notre référence lorsque la fréquence dépasse 40 GHz. Un comportement chahuté est aussi bien observé en mesure qu'en simulation. Dans le cas de la sonde MLIN-BCB, le comportement est plus régulier et l'étape du calibration, épiluchage permet de retrouver la performance intrinsèque du composant.

Si le calibration TRL permet de corriger le couplage sonde substrat grâce à ses 8 termes d'erreurs, il se révèle insuffisant en présence de diaphonie. En effet, au moins deux termes d'erreurs supplémentaires seraient nécessaires pour prendre en compte ce couplage sonde-sonde. De plus l'extraction des 8 termes d'erreur peut s'avérer erroné car la diaphonie sera différente sur le thru et sur la ligne.

4. Conclusion

Les résultats obtenus avec les pointes MLIN BCB de mesure RF pourraient permettre des avancées significatives en comparaison des sondes commerciales lors de la mesure de composant très haute fréquence et miniaturisé. L'architecture de type MLIN-BCB inversée démontre une réduction significative des couplages sonde-sonde et sonde-substrat, éliminant ainsi les limitations observées chez la sonde Infinity, notamment au-delà de 50 GHz. La géométrie de la membrane Si devra être optimisée pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la sonde et permettre une force de contact suffisante et une résistance de contact minimale. Ces avancées ouvrent la voie à des mesures plus précises et fiables dans des plages de fréquences plus élevées, soulignant l'importance des choix d'architecture dans le développement de pointes de mesure RF performantes.

Références

- [1] N. Waldhoff, C. Andrei, D. Gloria, S. Lepilliet, F. Danneville and G. Dambrine, "Improved Characterization Methodology for MOSFETs up to 220 GHz," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 5, pp. 1237-1243, May 2009, doi: 10.1109/TMTT.2009.2017359.
- [2] B. Ardouin *et al.*, "Compact Model Validation Strategies Based on Dedicated and Benchmark Circuit Blocks for the mm-Wave Frequency Range," *2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, New Orleans, LA, USA, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSICS.2015.7314492.
- [3] D. F. Williams *et al.*, « Calibration-Kit Design for Millimeter-Wave Silicon Integrated Circuits », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, n° 7, p. 2685-2694, juill. 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2265685.
- [4] L. Galatro et M. Spirito, « Millimeter-Wave On-Wafer TRL Calibration Employing 3-D EM Simulation-Based Characteristic Impedance Extraction », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, n° 4, p. 1315-1323, avr. 2017, doi: 10.1109/TMTT.2016.2609413
- [5] N. Zerounian, W. Aouïmeur, A.-S. Grimault-Jacquïn, G. Ducournau, C. Gaquière & F. Aniel (2021) *Coplanar waveguides on BCB measured up to 760 GHz*, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35:15, 20512061, DOI: [10.1080/09205071.2021.1930588](https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1930588)
- [6] S. Fregonese *et al.*, « Analysis of High-Frequency Measurement of Transistors Along With Electromagnetic and SPICE Cosimulation », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, n° 11, p. 4770-4776, nov. 2020, doi: 10.1109/TED.2020.3022603.
- [7] S. Fregonese *et al.*, « On-Wafer Characterization of Silicon Transistors Up To 500 GHz and Analysis of Measurement Discontinuities Between the Frequency Bands », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, p. 1-10, 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2832067.
- [8] S. Fregonese *et al.*, « Comparison of On-Wafer TRL Calibration to ISS SOLT Calibration With Open-Short De-Embedding up to 500 GHz », *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 9, n° 1, p. 89-97, janv. 2019, doi: 10.1109/TTHZ.2018.2884612.
- [9] S. Fregonese, M. De Matos, M. Deng, D. Céli, N. Derrier and T. Zimmer, "Importance of Probe Choice for Extracting Figures of Merit of Advanced mmW Transistors," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, no. 12, pp. 6007-6014, Dec. 2021, doi: 10.1109/TED.2021.3118671.