Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 75 (1984)

Heft: 3

Artikel: Sondes à haute impédance pour les mesures dans les circuits intégrés

Autor: Ruszynak, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904355

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Sondes à haute impédance pour les mesures dans les circuits intégrés

A. Rusznyak

Des sondes à impédance d'entrée élevée ont été développées pour observer les signaux à l'intérieur des circuits intégrés. Leur capacité d'entrée est inférieure à 0,2 pF dans une gamme de fréquences de 0 à plusieurs MHz. Leurs très bonnes caractéristiques ont été obtenues avec une conception simple, en n'utilisant que des étages suiveurs.

Für Messungen im Inneren integrierter Kreise wurden Sonden mit hoher Eingangsimpedanz entwickelt. Ihre Eingangskapazität ist kleiner als 0,2 pF im Frequenzbereich von 0 bis mehrere MHz. Die sehr guten Eigenschaften konnten dank einer einfachen Konstruktion erzielt werden, die nur Source- und Emitterfolger verwendet.

High input impedance probes were developed for making measurements inside integrated circuits. Their input capacitance is less than 0.2 pF for frequencies between 0 and several MHz's. Very good caracteristics have been achieved with a simple construction using only follower stages.

Cet article est issu d'une conférence présentée aux Journées d'Electronique 1983 à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Adresse de l'auteur

A. Rusznyak, Motorola Inc. European Semiconductor Division, 1211 Genève 20.

Pendant le développement des sondes présentées, l'auteur travaillait à l'Institut Battelle, Genève, et chez Asulab SA, Neuchâtel.

1. Evaluation des circuits prototypes

L'évolution de la technique des circuits intégrés permet de réaliser des systèmes de plus en plus complexes. Ces systèmes, composés d'un nombre souvent considérable de blocs fonctionnels comme portes, bascules, amplificateurs opérationnels par exemple, doivent fonctionner d'une manière sûre. Pour s'en assurer il faut alors que ces blocs soient très fiables pris séparément.

Pendant leur développement, l'ingénieur dispose de différents moyens qui le renseignent sur le mode de fonctionnement attendu, tels que simulation à l'aide d'éléments discrets ou programmes de simulation sur ordinateur. Toutefois, ni l'un ni l'autre de ces moyens ne peut décrire d'une façon complète le circuit que l'on prépare.

Lors de l'évaluation des prototypes, on a donc grand avantage à pouvoir observer les signaux à l'intérieur des circuits intégrés et à vérifier ainsi leur fonctionnement dans les conditions nominales ou extrêmes. On peut aussi déterminer les mécanismes responsables des limites de fonctionnement ou décéler rapidement les origines d'un mauvais fonctionnement. Toutefois, il est essentiel que l'observation des signaux aux différents points d'un circuit ne modifie pas son comportement de façon significative. C'est pourquoi l'entrée d'une sonde de mesure doit présenter une impédance élevée, aussi bien pour les tensions continues que pour les signaux alternatifs de fréquence élevée.

La réalisation d'une résistance d'entrée élevée est simple, il suffit d'utiliser des transistors JFET ou MOSFET. Mais pour obtenir une capacité d'entrée faible, de quelques dixièmes de pF ou moins, il faut introduire des circuits qui réduisent la capacité d'entrée que présentent ces composants.

La réduction de la capacité d'entrée d'un amplificateur au moyen d'un circuit de compensation est une solution connue depuis longtemps [1]. Le principe utilisé consiste à appliquer par couplage capacitif sur l'entrée une tension analogue au signal d'entrée (fig. 1). La capacité qui apparaît à l'entrée peut ainsi être réduite, annulée ou même surcompensée. Dans tous les cas les exigences de stabilité posées à l'amplificateur qui crée la tension de compensation sont particulièrement sévères si la fréquence des signaux à mesurer est élevée.

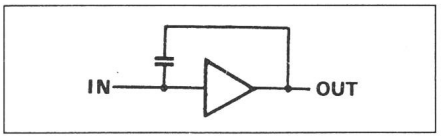

Fig. 1 Réduction de la capacité d'entrée d'un amplificateur par compensation

Une technique apparentée offrant également des solutions intéressantes consiste à utiliser un amplificateur dont l'alimentation est flottante et de superposer à celle-ci une tension analogue à la tension d'entrée [2; 3]. Pour créer cette dernière, on utilise un second amplificateur à basse impédance de sortie (fig. 2).

Dans la solution décrite ci-après, on asservit directement le potentiel sur les électrodes de l'élément d'entrée afin de réduire la capacité d'entrée, et tous les amplificateurs utilisés sont des étages suiveurs: source-suiveur à l'entrée suivi d'une combinaison d'émetteur-suiveurs. Grâce à la propriété des suiveurs d'amplifier leur tension d'entrée avec un gain proche de l'unité, on peut

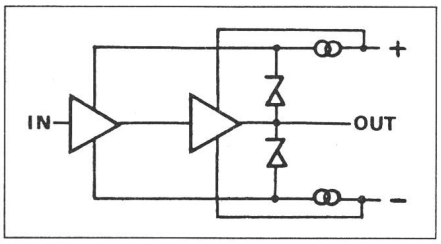

Fig. 2 Compensation de la capacité d'entrée d'un circuit à l'aide d'alimentations flottantes

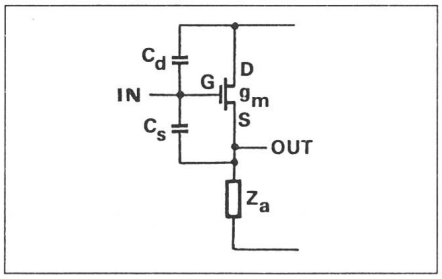

Fig. 3 Eléments d'un source-suiveur

compenser les capacités sans courir le risque d'une surcompensation. Comme le déphasage introduit ne peut atteindre que 90° par étage, le danger d'oscillation reste évitable même en cascadant plusieurs étages. Ainsi le bon comportement en phase de l'amplificateur ne doit pas être sacrifié aux exigences de la stabilité, et la compensation de la capacité d'entrée est efficace jusqu'à des fréquences élevées.

2. La capacité d'entrée d'un étage suiveur

La capacité d'entrée d'un suiveur dans lequel l'élément actif est un transistor à effet de champ peut être décomposée essentiellement en deux parties: celle provenant de la capacité entrée-source C_s et celle située entre la commande et le drain C_d (fig. 3). Un suiveur compense par son mode de travail la première de ces capacités, mais cette compensation n'est efficace que si la valeur de l'impédance qui se trouve en série avec l'élément actif est élevée. On la réalise avantageusement sous forme d'une source de courant. L'emploi de celle-ci permet aussi de réduire la tension d'alimentation de l'ensemble. Dans le cas d'une source de courant performante, c'est sa composante capacitive (C_a) qui détermine en premier lieu les performances du suiveur. En tenant compte de la capacité C_s, l'admittance d'entrée du suiveur s'exprime par

$$Y_0 = -\frac{\omega^2 C_s C_a}{g_m + j\omega(C_s + C_a)}$$

Cette admittance présente une composante réelle négative. Par ce fait, ce circuit peut former un oscillateur s'il se trouve connecté en parallèle avec une impédance ayant une composante inductive. En effet, le schéma équivalent montre qu'un suiveur avec ses capacités C_s et C_a qui constituent un diviseur de tension capacitif et un quartz en parallèle avec l'entrée forment un oscillateur de type *Pierce* (fig. 4).

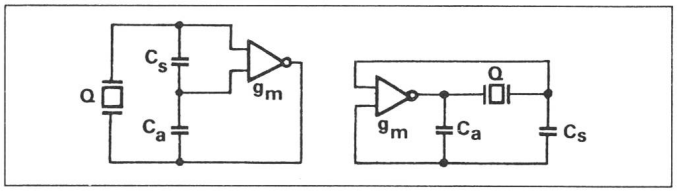

Fig. 4 Schéma équivalent d'un suiveur avec quartz à l'entrée et celui d'un oscillateur de type Pierce

L'admittance Y_0 peut également être exprimée à l'aide du facteur d'amplification A du suiveur où A (complexe) représente le rapport entre la tension à la source et celle à l'entrée:

$$Y_0 = Y_s(1 - A)$$

avec

$$A = \frac{g_m + j\omega C_s}{g_m + g_a + j\omega(C_s + C_a)}$$

Lors de l'évaluation de l'admittance d'entrée, il faut encore tenir compte de la composante résultant de la capacité entrée–drain. Sa contribution peut être réduite en imposant au drain une tension analogue à la tension d'entrée. La tension imposée sera fournie par un émetteur-suiveur commandé par la tension de sortie du source-suiveur (fig. 5) [4]. En supposant que le facteur d'amplification de tension de l'émetteur-suiveur soit B, l'admittance d'entrée Y devient

$$Y = Y_s(1 - A) + Y_d(1 - AB) + Y_g$$

où $Y_g = j\omega C_g$; C_g représente la capacité entre l'entrée et les points à potentiels fixes.

Pour l'analyse, une première simplification peut être faite en supposant $B = 1$. Elle est justifiée si le suiveur est réalisé avec un transistor haute fréquence et si la résistance qui constitue sa charge est de valeur élevée. Ces deux conditions peuvent être remplies par un choix approprié des composants. L'admittance d'entrée s'exprime alors par:

$$Y \approx (C_s + C_d)\frac{g_m + j\omega C_a}{g_m + g_a + j\omega(C_a + C_s)} + j\omega C_g$$

Aux fréquences basses la capacité d'entrée C prend la valeur

$$C \approx (C_s + C_d)\frac{g_a}{g_m + g_a} + C_g$$

Pour des fréquences élevées on obtient

$$C \approx (C_s + C_d)\frac{C_a}{C_s + C_a} + C_g$$

Ces deux valeurs sont valables essentiellement jusqu'à la fréquence déterminée par le pôle g_a/C_a de la fonction $Y = Y(\omega)$ et à partir de la fréquence définie par son zéro $(g_m + g_a)/(C_s + C_a)$.

L'analyse d'un suiveur simple devient plus complexe, si l'on tient compte de la résistance interne de la source de tension sur laquelle le potentiel doit être observé. Dans ce cas, cette résistance interne et la capacité C_g forment, avec le suiveur, un système de deuxième ordre. L'amplification en fonction de la fréquence présente une valeur plus élevée que l'unité à une fréquence caractéristique, et la réponse impulsionnelle contient une oscillation amortie qui se superpose au saut d'unité [5].

Les expressions qui décrivent la réponse en fréquence d'un suiveur isolé sont déjà complexes, elle le deviennent encore plus si l'on inclut dans l'analyse d'autres paramètres tels que l'impédance que présente l'entrée du transistor bipolaire ou la charge complexe de l'émetteur-suiveur. Pour analyser les différents circuits composés de suiveurs, on a alors intérêt à utiliser des programmes sur ordinateur tels que Spice. Lorsqu'on applique un tel programme, la simulation d'une tension imposée à l'entrée permet de calculer l'amplification et le déphasage en fonction de la fréquence. En imposant

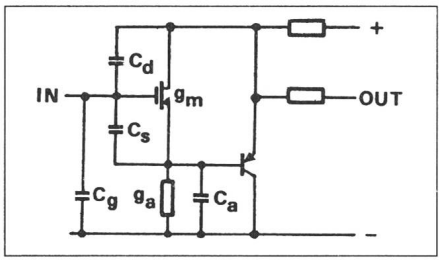

Fig. 5 Source-suiveur et émetteur-suiveur cascadés

un courant à l'entrée, on peut calculer l'mpédance d'entrée.

3. La mesure de la capacité d'entrée

Avant de présenter les sondes réalisées, il convient de décrire des méthodes de mesure de leur capacité d'entrée.

Une valeur approximative est obtenue si l'on observe l'augmentation du temps de montée de la tension sur la capacité *C* d'un circuit *RC* alimenté par une tension de forme carrée, augmentation due à l'introduction de la sonde en parallèle avec la capacité *C* (fig. 6a). Une autre méthode simple consiste à mesurer la consommation qu'occasionne la charge périodique de la capacité à déterminer à une tension connue (fig. 6b). Pour effectuer une telle mesure on peut utiliser un inverseur CMOS qu'on charge avec la capacité à mesurer. Toutefois, il faut limiter la vitesse de charge et de décharge si l'on veut éviter de mesurer dans un domaine de fréquence où la résistance négative que présente l'entrée devient importante. Une troisième méthode consiste à introduire une résistance de valeur élevée dont on connaît la capacité parallèle en série avec l'entrée de l'amplificateur à évaluer. En mesurant le gain et le déphasage à la sortie avec et sans cette résistance, l'impédance d'entrée peut être déterminée (fig. 6c).

Pour déterminer la capacité d'entrée des sondes développées, une méthode différente a été utilisée. Un diviseur de tension capacitif et un transistor MOS dont l'entrée est reliée à ce diviseur ont été intégrés (fig. 6d). Les caractéristiques du transistor et la valeur de l'une des capacités du diviseur peuvent être mesurées directement. Le taux de division change si l'entrée de l'amplificateur à évaluer est reliée au point commun des éléments intégrés. La variation du rapport de capacités change le courant dans le transistor qui fournit ainsi une indication précise de la capacité introduite.

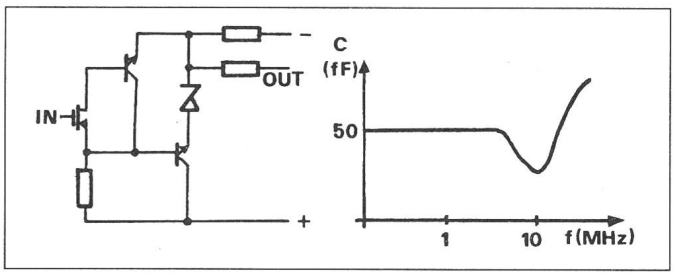

Fig. 7
Schéma d'un amplificateur pour sondes et représentation de l'allure de sa capacité d'entrée en fonction de la fréquence

4. Sondes réalisées

De très bonnes performances peuvent être obtenues avec un source-suiveur simple dont la capacité commande-drain est compensée à l'aide d'un émetteur-suiveur. La figure 7 montre le schéma de l'exécution dans laquelle le transistor d'entrée est combiné avec un transistor bipolaire qui amplifie son courant de drain.

La capacité d'entrée d'une sonde équipée d'un tel circuit est environ 50 fF pour les fréquences allant jusqu'à 4 MHz. La capacité *C* qu'on obtient en divisant par la fréquence l'admittance d'entrée déterminée par la mesure montre l'allure attendue: à des fréquences élevées on observe une diminution de la capacité, cette diminution est due à la composante réelle devenant négative.

Bien que cette sonde remplisse les exigences posées au départ, elle a l'inconvénient d'une dissipation de 4 W qui empêche sa réalisation sous forme compacte.

Dans une deuxième exécution, le suiveur d'entrée comporte une source de courant. La capacité base-collecteur du premier suiveur bipolaire est compensée par un suiveur complémentaire, et la sortie est découplée par un étage suiveur supplémentaire (fig. 8). La capacité d'entrée de cette exécution atteind environ 30 fF entre 0 et 5 MHz.

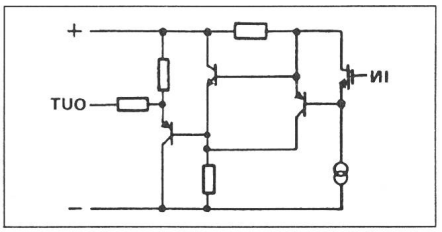

Fig. 8 Amplificateur pour sondes, variante

Ces deux variantes de sondes ont été développées à l'Institut Battelle, Genève, dans le cadre des travaux sous mandat pour l'industrie horologère. Elles permettent d'exécuter les mesures souhaitées dans les circuits intégrés. Toutefois, elles ont encore l'inconvénient que leur entrée doit être protégée au repos par un court-circuit, afin d'éliminer le risque que l'élément d'entrée MOS soit endommagé par des charges statiques. En outre, elles ont un offset dépendant de la tension de seuil du transistor d'entrée.

La dernière version d'amplificateurs pour sondes, développée plus récemment à Asulab, ne présente plus ces inconvénients (fig. 9) [6]. Dans cette exécution, l'élément d'entrée est un transistor JFET. Le source-suiveur d'entrée commande l'émetteur-suiveur qui compense la capacité commande-drain de l'élément d'entrée. Cet émet-

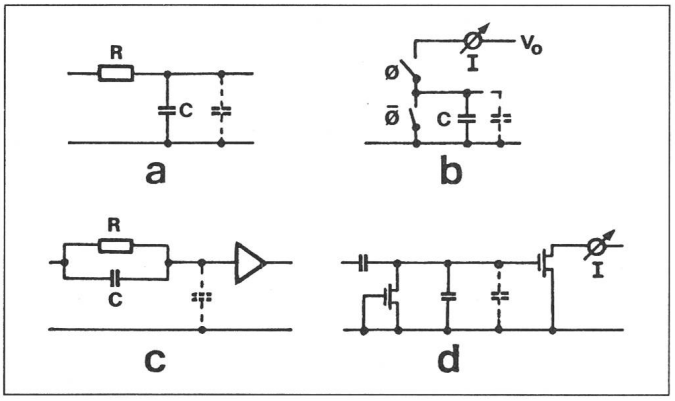

Fig. 6
Méthodes de mesure de la capacité d'entrée

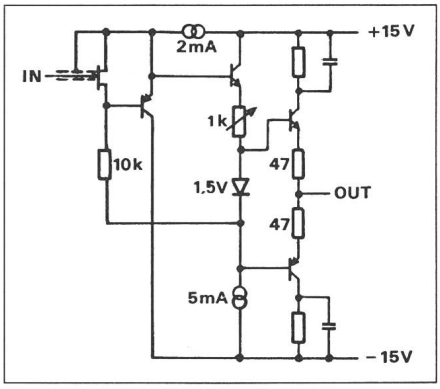

Fig. 9 Amplificateur pour sondes, version avec JFET à l'entrée

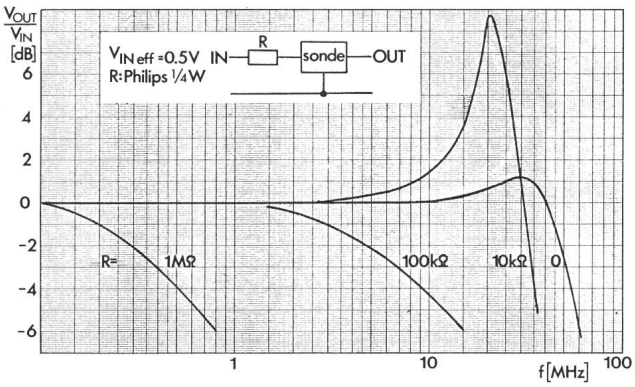

Fig. 10
Gain en fonction de la fréquence

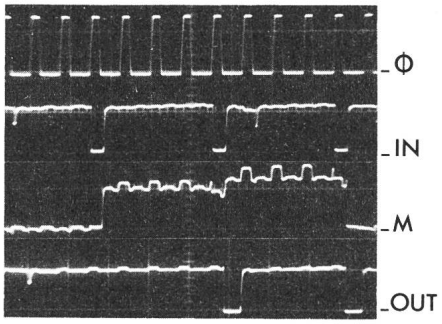

Fig. 13 Oscillogrammes relevés à l'aide d'une sonde
(Echelle 2 V resp. 50 µs par carré)

teur-suiveur commande en plus un suiveur complémentaire parcouru par un courant constant. Ce courant passe à travers une résistance variable et une diode Zener. La chute de tension sur ces deux composants et la résistance en série avec l'élément d'entrée déterminent le courant dans ce dernier. L'offset de la tension de sortie peut être réglé dans une large mesure par l'ajustage de la résistance variable. La tension sur la diode Zener (1,5 V) commande les transistors de sortie formant une paire de suiveurs complémentaires.

Cet amplificateur est donc construit uniquement d'étages suiveurs: source-suiveur à l'entrée, émetteur-suiveur pour asservir le potentiel du drain, suiveur de découplage et suiveurs complémentaires à la sortie.

La capacité d'entrée de ce circuit est environ 0,2 pF, valeur en général suffisamment petite pour effectuer la plupart des mesures à l'intérieur des circuits intégrés. Son courant d'entrée est de l'ordre de 0,1 pA à température ambiante. Le gain est compris entre 0,99 et 1 pour des charges plus élevées que 10 kOhm. La figure 10 montre son allure en fonction de la fréquence. Dans cette figure, R représente la résistance interne de la source de tension qui, comme décrit, est à l'origine, avec la capacité C_g, d'un accroissement de l'amplification.

Le retard nominal du signal de sortie est de 2 ns. Une charge capacitive à la sortie l'augmente de 0,01 ns/pF (fig. 11).

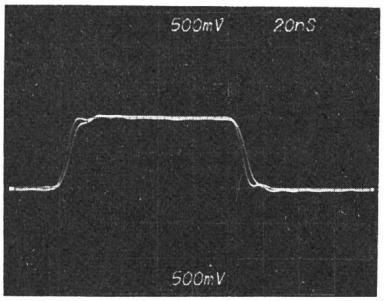

Fig. 11 Réponse impulsionnelle de la sonde

L'alimentation de la sonde peut varier entre ± 12 V et ± 20 V. A ± 15 V, des signaux d'entrée d'amplitude jusqu'à 10 V peuvent être mesurés. Etant donné que les points de travail des éléments sont définis par des sources de courant, l'influence de la variation de la tension d'alimentation sur les caractéristiques est négligeable. La consommation est de 7,5 mA. La sortie est protégée contre le court-circuit.

Fig. 12 Construction de la sonde

Les composants sont montés sur un circuit imprimé logé dans une tube de diamètre 14 mm et de longueur environ 65 mm (fig. 12). L'entrée est blindée; ce blindage est relié au drain de l'élément d'entrée. On peut aussi le relier à un blindage supplémentaire en tourant la pointe qu'on pose dans le circuit à évaluer.

Des oscillogrammes relevés à l'aide d'une sonde selon la deuxième exécution montre l'utilité de pouvoir observer les signaux à l'intérieur d'un circuit (fig. 13).

Sur ces oscillogrammes on voit les signaux aux différents points d'un diviseur de fréquence dynamique NMOS à deux phases [7]. Dans ce circuit, c'est le signal d'entrée IN qui initie la charge d'un point de mémoire M. S'il est appliqué quand la mémoire est en état chargé, un signal de sortie OUT est créé qui initie la décharge de la mémoire – à condition que la tension sur ce point de mémoire ait une valeur suffisamment élevée. Ici les conditions de mesure sont choisies de sorte que le circuit soit à la limite de fonctionnement correcte. La tension au point de mémoire atteint un niveau suffisament élevé seulement après chaque deuxième signal d'entrée, pour que sa décharge par un prochain signal de sortie soit effectuée. Le taux de division est donc 1:1,5 au lieu de 1:2. Il faut noter que la capacité du circuit aux points où étaient relevés ces oscillogrammes n'est que d'environ 0,4 pF. Malgré cette petite valeur les signaux ont pu être observés.

Ces sondes sont donc des outils précieux pour les ingénieurs chargés du développement des circuits. Elles rendent possible l'observation des signaux dans les circuits intégrés, mais elles peuvent aussi être utilisées dans d'autres applications comme par exemple pour les mesures dans les systèmes à capacités commutées où des pertes occasionnées par une sonde à entrée ohmique perturberaient le fonctionnement.

Bibliographie

[1] *E. Amatniek:* Measurement of bioelectric potentials with microelectrodes and neutralized input capacity amplifiers. IRE Trans. Medical Electronics 10(1958)1, p. 3...14.

[2] *M. Villoz:* Sondes haute impédance. Rapport LEG 79.05. Laboratoire de l'Electronique Générale, EPFL Lausanne, 1979.

[3] *H. J. De Man, R. A. Vanparys* and *R. Cuppens:* A low input capacitance voltage follower in a compatible silicon-gate MOS-bipolar technology. IEEE Journal of Solid-State Circuits 12(1977)3, p. 217...224.

[4] *D. P. Stokesberry:* A large signal IGFET DC source follower. Proc. IEEE 54(1966)1, p. 66.

[5] *K. Heilig:* Einfluss der Signalquellenimpedanz auf die Sprungantwort des Sourcefolgers. Nachrichtentechnik/Elektronik 30(1980)4, S. 166...168.

[6] *A. Rusznyak:* Circuit amplificateur. Demande de brevet européen N° 0 069 072 (5.1.1983).

[7] *J. Lüscher:* and *A. Rusznyak:* Frequency divider. US-Patent N° 3.983.411 (1976).