



HAL
open science

RECHERCHES RÉCENTES SUR LES TRANSDUCTEURS ÉLECTROSTATIQUES

J. Lewiner

► **To cite this version:**

J. Lewiner. RECHERCHES RÉCENTES SUR LES TRANSDUCTEURS ÉLECTROSTATIQUES. Journal de Physique Colloques, 1972, 33 (C6), pp.C6-10-C6-14. 10.1051/jphyscol:1972603 . jpa-00215121

HAL Id: jpa-00215121

<https://hal.science/jpa-00215121v1>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

RECHERCHES RÉCENTES SUR LES TRANSDUCTEURS ÉLECTROSTATIQUES

J. LEWINER

Laboratoire d'Electricité Générale, Ecole Supérieure de Physique et de Chimie,
75005 Paris, France

Résumé. — Les transducteurs électrostatiques sont susceptibles soit de transformer de l'énergie électromagnétique en énergie de vibration (émission), soit d'opérer la transformation inverse (réception). Ils furent utilisés dans les toutes premières expériences de mise en évidence de propagation d'ondes ultrasonores. Abandonnés peu après au profit des transducteurs piézoélectriques ou ferroélectriques, ils traversèrent une longue période d'obscurité. C'est dans le domaine des basses fréquences qu'ils réapparurent tout d'abord avec les microphones et haut-parleurs électrostatiques.

Les transducteurs électrostatiques suscitent actuellement un regain d'intérêt. Ils offrent en effet, une large bande passante qui pour certaines applications peut compenser leur faible rendement. Ils peuvent fonctionner suivant trois modes :

- le mode « normal » dans lequel le champ de polarisation est obtenu par application d'une tension externe
- le mode « électret » dans lequel le même champ est créé par les charges d'un électret situé dans le transducteur ;
- le mode « superposition » qui utilise simultanément les deux effets précédents.

Abstract. — Electrostatic transducers can transform electromagnetic energy into mechanical energy (emission) or mechanical energy into electromagnetic energy (reception). They were used in the very first experiments in the field of ultrasonics, but were quickly replaced by piezoelectric or ferroelectric transducers. After many years of darkness they reappeared first with the development of electrostatic microphones and loudspeakers.

Lots of efforts are now being devoted to these transducers. They have a very broad bandwidth which can for some applications compensate their small power of emission. They can be used either in :

- the « normal » mode in which the bias field is produced by an externally applied voltage ;
- the « electret » mode in which the same field is created by the charges of an electret located in the transducer ;
- the « superposition » mode in which both effects are combined.

1. Introduction. — Les transducteurs de type électrostatiques connurent leur heure de gloire aux tous débuts des ultrasons. C'est en effet le faisceau ultrasonore émis dans de l'eau par un condensateur au mica (condensateur chantant) qui provoqua la déviation du pendule utilisé par Langevin lors de la première mise en évidence de propagation ultrasonore. Peu après le pendule était remplacé par un récepteur à condensateur et hétérodyne. Une année plus tard (en 1917) le condensateur était à son tour abandonné comme récepteur au profit d'une lame de quartz piézoélectrique. La même année, le condensateur chantant utilisé pour l'émission était également remplacé par une lame de quartz piézoélectrique. Commence alors une longue période d'oubli au cours de laquelle divers types de transducteurs sont développés, tous plus puissants ou plus sensibles que les transducteurs électrostatiques. C'est avec l'apparition des diélectriques minces de haute rigidité, utilisés dans l'industrie des condensateurs, que les transducteurs électrostatiques redevinrent d'actualité. Leur

large bande passante peut en effet, dans certaines applications, compenser la faible puissance qu'ils émettent.

2. Principe de fonctionnement d'un transducteur électrostatique. — Considérons un condensateur tel que celui représenté sur la figure 1, constitué de

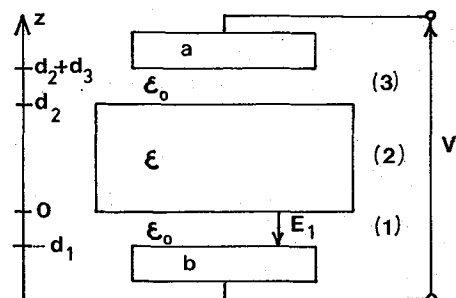


FIG. 1. — Le condensateur. Les électrodes a et b sont séparées du diélectrique central de permittivité ϵ et épaisseur d_2 par des couches d'air d'épaisseur d_1 et d_3 .

deux électrodes entourant un diélectrique de permittivité $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ et d'épaisseur d_2 . Supposons qu'existent entre les électrodes et le diélectrique des couches d'air d'épaisseur d_1 et d_3 . Le champ électrique E_1 créé à l'interface diélectrique, électrode inférieure par une tension V appliquée aux bornes du condensateur est donné par :

$$LE_1 = -V \quad \text{où} \quad L = d_1 + d_2/\varepsilon_r + d_3. \quad (1)$$

Si la tension V est purement alternative, on a $V = v \sin \omega t$. Le champ électrique dans la couche (1) s'écrit alors $E_1 = e_1 \sin \omega t$ avec $e_1 = v/L$ et la pression qui s'exerce sur l'électrode est de la forme :

$$p = \frac{\varepsilon_0}{2} E_1^2 = \frac{\varepsilon_0 e^2}{4} (1 - \cos 2\omega t). \quad (2)$$

Cette électrode est donc soumise à une pression périodique de fréquence double de la fréquence excitatrice.

Supposons maintenant que la tension appliquée aux bornes du condensateur soit de la forme :

$$V = V_0 + v \sin \omega t.$$

En posant $E_0 = V_0/L$, la pression exercée sur l'électrode inférieure devient :

$$p = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(E_0^2 + \frac{e^2}{2} \right) + \varepsilon_0 E_0 e \sin \omega t - \frac{\varepsilon_0 e^2}{4} \cos 2\omega t. \quad (3)$$

Le premier terme produit une déformation statique et nous n'en tiendrons pas compte, le second terme une déformation périodique de fréquence ω et le troisième terme une déformation de fréquence double. Si la condition $e \ll E_0$ est remplie, le second terme est dominant.

Les relations (2) et (3) justifient donc le caractère « chantant » d'un condensateur excité par une tension alternative.

Considérons à présent, le condensateur de la figure 1 polarisé par une tension continue V_0 et tel que l'électrode inférieure soit animée d'un mouvement alternatif de vibration. Nous supposons pour simplifier les expressions que cette vibration ne se transmet pas aux autres couches du condensateur à cause, par exemple, d'une mauvaise adaptation des impédances acoustiques. On a donc :

$$d_1 = d_{10} + \Delta d \sin \omega t$$

d'où

$$E_1 = E_{10} - \Delta E \sin \omega t$$

avec

$$E_{10} = \frac{V_0}{d_{10} + d_2/\varepsilon_r + d_3}$$

et

$$\Delta E = \frac{\Delta d}{d_{10} + d_2/\varepsilon_r + d_3} E_{10}.$$

Le courant de déplacement j qui traverse le système s'écrit :

$$j = -\omega \varepsilon_0 \Delta E \cos \omega t. \quad (4)$$

Un condensateur polarisé peut donc être utilisé soit pour effectuer la transformation d'énergie électromagnétique en énergie de vibration, soit pour effectuer la transformation inverse.

Nous désignerons par mode « normal » le mode de fonctionnement d'un transducteur électrostatique opérant avec une tension de polarisation appliquée à ses bornes.

Il faut remarquer que le fonctionnement du transducteur décrit respectivement à l'émission et la réception d'ondes ultrasonores par les relations (3) et (4) dépend directement du champ électrique statique qui règne à l'interface diélectrique électrode. Afin d'obtenir un rendement élevé, il est clair que ce champ doit être aussi élevé que possible. Pour cela le diélectrique central doit être mince (typiquement une dizaine de microns) et de haute rigidité (de nombreux films polymères minces ont de telles propriétés, par exemple, le mylar, le polypropylène, etc...). La tension limite applicable dans ces conditions au condensateur dépend principalement des couches de gaz qui entourent le diélectrique. Ces couches sont en effet susceptibles de s'ioniser si la valeur du champ électrique qui y règne dépasse la valeur définie par la loi de Paschen. Les charges alors créées tendent à diminuer la valeur du champ électrique dans les couches de gaz. Des charges de même polarité que celle des électrodes adjacentes sont alors projetées sur le film diélectrique central (homocharges). Afin de limiter cet effet visiblement nuisible lorsque le transducteur opère en mode « normal », il est possible soit de supprimer le gaz en faisant opérer le transducteur sous vide, soit de le remplacer par un milieu plus difficilement ionisable. Ainsi de tels transducteurs opèrent actuellement [1] jusqu'à des fréquences de l'ordre de 200 MHz, sous des champs électriques statiques de l'ordre de quelques millions de volts par centimètre.

Nous avons vu que le paramètre caractérisant le fonctionnement du transducteur est le champ électrique régnant aux interfaces diélectrique électrode et non la tension de polarisation. Cette remarque permet d'envisager immédiatement une méthode de polarisation d'un transducteur électrostatique ne nécessitant pas l'application de tension continue extérieure. Il suffit en effet, que le diélectrique central soit électriquement chargé (électret). Le champ électrique de polarisation est alors produit par le diélectrique lui-même. Nous dirons alors que le transducteur opère selon le mode « électret ».

3. Fonctionnement d'un transducteur selon le mode électret. — Considérons un transducteur électrostatique tel que celui représenté sur la figure 2. Le film diélectrique central contient à la fois des charges de volume de densité $\rho(z)$ (que nous supposons seule-

ment dépendantes de z) et des charges de surface de densité σ_1 et σ_3 . Le champ électrique E_1 produit par ces charges est donné par :

$$LE_1 = \frac{-\sigma_1 d_2}{\varepsilon} - \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{\varepsilon_0} d_3 - \int_0^{d_2} \left[\frac{d_3}{\varepsilon_0} + \frac{d_2 - z}{\varepsilon} \right] \rho(z) dz. \quad (5)$$

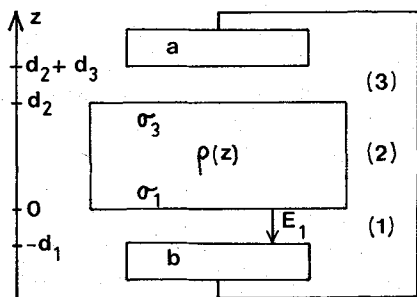


FIG. 2. — Le film diélectrique central contient des charges de volume de densité $\rho(z)$ et des charges de surface de densités σ_1 et σ_3 .

Cette expression peut être écrite de façon générale [2] en posant :

$$\begin{aligned} \hat{\sigma} &= \int_0^{d_2} \rho(z) dz \\ \hat{\sigma}_1 &= \frac{1}{d_2} \int_0^{d_2} (d_2 - z) \rho(z) dz \\ \hat{\sigma}_3 &= \frac{1}{d_2} \int_0^{d_2} z \rho(z) dz. \end{aligned}$$

On obtient :

$$LE_1 = -(\sigma_1 + \hat{\sigma}_1) \frac{d_2}{\varepsilon} - (\sigma_1 + \hat{\sigma}_1 + \sigma_3 + \hat{\sigma}_3) \frac{d_3}{\varepsilon_0}.$$

On pose :

$$V_0 = -(\sigma_1 + \hat{\sigma}_1) \frac{d_2}{\varepsilon} - (\sigma_1 + \sigma_3 + \hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_3) \frac{d_3}{\varepsilon_0}.$$

La relation (5) peut alors s'écrire :

$$LE_1 = V_0. \quad (6)$$

En combinant cette relation avec la relation (1), on constate que V_0 est la tension qu'il faudrait appliquer aux bornes du condensateur pour annuler le champ E_1 créé par l'électret. Nous désignerons cette quantité « tension équivalente de l'électret ».

Un transducteur électrostatique peut donc fonctionner en utilisant uniquement le champ électrique produit par les charges emmagasinées dans le diélectrique. Cette possibilité dépend directement des propriétés de l'électret. Il est en effet clair que le rendement et la qualité du transducteur seront d'autant meilleurs que la tension équivalente de l'électret sera

élevée et que sa durée de vie sera grande. Ceci nous conduit donc à décrire brièvement les processus de charge et de décharge des électrets.

4. Les processus de charge et de décharge des électrets. — Les électrets sont des diélectriques dans lesquels existe une polarisation permanente (ou semi-permanente). Cette polarisation peut être due, soit à l'arrangement des molécules dans le matériau, soit à la présence dans celui-ci de charges électriques injectées. Deux méthodes sont couramment utilisées pour injecter des charges dans un diélectrique. Dans la première méthode [3, 4, 5], le film diélectrique, situé dans une enceinte à vide, est soumis au bombardement de particules chargées. Les densités de charges obtenues atteignent quelque 10^{-7} cb/cm². Dans la seconde méthode, le film diélectrique à charger est situé entre deux électrodes, tel que représente sur la figure 1. La tension appliquée est telle que le champ électrique régnant dans les couches de gaz entourant la membrane, soit supérieure au seuil défini par la loi de Paschen appliquée à ces couches. Des charges sont injectées dans le diélectrique où elles s'y trouvent piégées. Des améliorations diverses ont été apportées à ces techniques [6, 7, 8] et les densités de charge obtenues dépassent 10^{-6} cb/cm², produisant sur un film d'une dizaine de microns d'épaisseur une tension équivalente de quelque 10^3 volts. Les champs produits par ces charges sont donc de l'ordre de quelques millions de volts par centimètre.

Il est évident qu'obtenir un électret est une opération importante. Celle-ci n'a de sens toutefois que si la durée de vie de l'électret est suffisante. De nombreux mécanismes contribuent en effet à faire décroître la charge emmagasinée, par exemple la recombinaison en volume [9].

Deux mécanismes toutefois sont dominants. Le premier est semblable en nature à celui qui permet de fabriquer les électrets par décharge disruptive. Dans certaines conditions, le champ électrique créé par l'électret peut en effet être supérieur au champ disruptif des couches de gaz environnant le diélectrique. Des décharges ionisantes se produisent alors qui tendent à diminuer la charge globale de l'électret. Ce mécanisme peut être fortement diminué [10], soit par arrangement mécanique convenable du dispositif soit en substituant au gaz ayant servi à créer l'électret un milieu de haute rigidité diélectrique. Le deuxième mécanisme est lié à la profondeur et à la durée de vie des pièges dans lesquels sont emmagasinées les charges injectées. Il est donc utile de sélectionner un matériau possédant des pièges profonds de grande durée de vie. Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées permettant de déterminer ces paramètres. Une méthode très puissante est basée sur la mesure des courants thermiquement stimulés [11].

Actuellement les électrets faiblement chargés (ten-

sion équivalente de quelques dizaines de volts) ont des durées de vie de plusieurs décades. La durée de vie des électrets fortement chargés (quelques milliers de volts de tension équivalente) est encore très courte, sauf pour des applications à basse température où les divers processus de décharge sont fortement ralentis. En particulier la substitution du gaz ayant servi à créer par ionisation l'électret par un milieu bon diélectrique comme l'azote liquide permet d'accroître considérablement la durée de vie des électrets et la conservation des charges emmagasinées. A tel point que dans ces conditions un troisième mode de fonctionnement des transducteurs électrostatiques (le mode « superposition ») peut être défini. Le champ électrique E_1 , responsable du fonctionnement du transducteur est alors produit à la fois par les charges emmagasinées dans l'électret et par une tension appliquée. Sa valeur s'obtient en combinant les relations (1) et (6) : $LE_1 = V_0 - V$. La figure 3 montre la dépendance en tension appliquée de E_1 . Dans le cas présenté sur cette figure on constate que pour une tension inverse appliquée de 3 000 V, le champ E_1 est quatre fois supérieur à celui obtenu en mode électret pur et deux fois supérieur à celui obtenu avec une tension directe de 3 000 V. De plus il faut remarquer que le danger de décharge disruptive dans le film diélectrique lui-même est réduit car les champs électriques produits par les

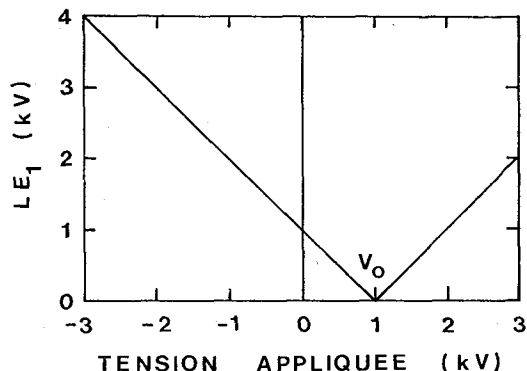


FIG. 3. — Dépendance en tension appliquée de LE_1 dans le cas d'un transducteur équipé d'un électret de tension équivalente V_0 .

charges et par la tension inverse tendent à se compenser et non à s'ajouter dans le diélectrique.

5. **Conclusion.** — Après cette revue des possibilités d'utilisation des transducteurs électrostatiques, on peut essayer d'extrapoler les directions dans lesquelles vont s'orienter les recherches et les applications.

De façon générale, l'examen des ordres de grandeur des paramètres tels que la bande passante ou le rendement de conversion énergétique donne *a priori* les limitations de tels transducteurs. En effet, à des fréquences de l'ordre de quelques dizaines de MHz, la conversion est typiquement de 20 à 30 dB inférieure à celle des transducteurs de type piézo ou ferro-électriques. Toutefois la large bande passante de ces transducteurs, qui fonctionnent en vibrations forcées, permet un traitement du signal beaucoup plus élaboré que celui possible avec des transducteurs de type résonnant. Ceci conduit à penser que c'est dans le domaine de l'imagerie acoustique et de l'holographie que ces transducteurs devraient connaître un grand développement. Déjà plusieurs types de rétines de visualisation acoustique ont été construites, fonctionnant en mode « normal » ou en mode « électret » [12, 13, 14].

La configuration physique des transducteurs électrostatiques (films minces de quelques microns d'épaisseur) les rend apte à être utilisés pour sonder des surfaces qui ne sont pas planes et sur lesquelles ils peuvent s'adapter.

Enfin il serait incomplet de ne pas mentionner l'intérêt extrême que présente le fonctionnement des transducteurs électrostatiques selon le mode « électret » : aucune tension de polarisation statique n'est en effet nécessaire. Dans les dispositifs électroniques « basse tension » à semi-conducteurs, ceci permet d'éviter les éléments destinés à créer ou à apporter cette tension. Le mode électret est donc très favorable aux dispositifs miniaturisés (prothèses auditives, magnétophones portatifs, etc...) mais aussi aux installations de télécommunications. Il ne serait pas étonnant de voir, dans les quelques années qui viennent, les microphones de téléphone remplacés par des microphones à électrets.

Bibliographie

- [1] LEGROS D., LEWINER J. et BIQUARD P., *J. Acoust. Soc. Am.* **52** (1972) 196.
- [2] SESSLER G. M., *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 405.
- [3] GROSS B., *Phys. Rev.* **107** (1957) 368.
- [4] SESSLER G. M. and WEST J. F., *Polymer Letters* **7** (1969) 367.
- [5] SESSLER G. M. and WEST J. E., *Appl. Phys. Lett.* **17** (1970) 507.
- [6] TYLER R. W., WEBB J. H. and YORK W. C., *J. Appl. Phys.* **26** (1955) 61.
- [7] CRESWELL R. A. and PERLMAN M. M., *J. Appl. Phys.* **41** (1970) 2365.
- [8] SESSLER G. M. and WEST J. E., *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 922.
- [9] HUGHES R. C., *Appl. Phys. Lett.* **21** (1972) 196.
- [10] LEGROS D. and LEWINER J., *J. Acoust. Soc. Am.* (à paraître).
- [11] CRESWELL R. A., PERLMAN M. M. and KALAYAMA M. A., *Dielectric properties of polymers* (Plenum, New York), 295.
- [12] ALAIS P., *Acoustical Holography*, vol. 4 (Plenum, New York) à paraître.
- [13] NIGAM A. K. and SESSLER G. M., *Appl. Phys. Lett.* **21** (1972) 229.
- [14] NIGAM A. K., TAYLOR K. J. and SESSLER G. M., *Acoustical Holography* vol. 4 (Plenum, New York) à paraître.

DISCUSSION

H. LEVINE. — What limitation is implied by the assumption that the volume density of charge in the dielectric layer, $\rho(z)$, varies exclusively with the normal coordinate z ? Certainly, the charge distribution exhibits a non-uniform nature with respect to small displacements from the lateral boundaries of the layer.

J. LEWINER. — The symmetry of the system and the method used to charge the films do not privilege any direction. However whereas at a macroscopic scale it is reasonable to assure that the volume density of charge varies exclusively with the normal coordinate, this is certainly not true at the microscopic scale. In fact we know that the traps are not isotropically scattered at constant z , due to the cristallinity of the film itself.

J. UEBERSFELD. — Quelles sont les limitations en fréquence du dispositif ?

J. LEWINER. — La première limitation est liée au faible rendement des transducteurs électrostatiques : compte tenu de la forte atténuation des ondes ultra-

sonores de fréquences élevées, les générateurs utilisés doivent être puissants.

Un second effet pourrait limiter le domaine de fréquences utilisables : les pertes électromagnétiques dans le film diélectrique. Cet effet, est, compte tenu des épaisseurs et de la qualité des films utilisés, complètement négligeable.

Ces faibles épaisseurs entraînent également une possibilité de résonance mécanique des films. Celles-ci pourraient se produire à des fréquences de l'ordre de quelques centaines de MHz.

Enfin il faut considérer que l'approximation de mauvaise adaptation des impédances acoustiques des diverses couches du transducteur n'est jamais totalement justifiée. Ceci entraîne des résonances parasites ou utiles de l'ensemble du dispositif.

A. ZAREMBOWITCH. — Est-il possible de donner quelques exemples de polymères minces parmi les plus performants ?

J. LEWINER. — Les films minces utilisables sont typiquement ceux utilisés dans l'industrie des condensateurs : mylar, polypropylène...