CORRELATEUR A MEMOIRE A ONDES DE SURFACE.

C. Maerfeld, Hélène Gautier

► To cite this version:

C. Maerfeld, Hélène Gautier. CORRELATEUR A MEMOIRE A ONDES DE SURFACE.. Journal de Physique Colloques, 1979, 40 (C8), pp.C8-243-C8-248. 10.1051/jphyscol:1979842 . jpa-00219547

HAL Id: jpa-00219547

<https://hal.science/jpa-00219547>

Submitted on 1 Jan 1979

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.

CORRELATEUR A MEMOIRE A ONDES DE SURFACE.

C. Maerfeld et H. Gautier.

THOMSON-CSF, Division Activités sous-marines, Chemin des Travaux, 06802 Cagnes-sur-mer.

Résumé.- Les interactions acoustiques non-linéaires en ondes de surface ont été mises à profit pour réaliser des convoluteurs et des corrélateurs à mémoire. Le but de ce papier est de faire un bref survol des principes de fonctionnement et des performances de ces dispositifs, ainsi que de l'état d'avancement des recherches en cours.

Summary.- The acoustical non linear surface wave interactions are used to provide memory convolutors and correlators. The purpose of this paper is to give a brief sketch of the basic principles of working, the accuracy of these devices and the state of the works in progress.

1. Corrélateur à mémoire à ondes de surface.-

En 1969, L.O. Svaasand /1/ et C.F. Quate, R.B. Thomson /2/ ont montré comment on pouvait mettre à profit les non-linéarités intrinsèques des matériaux pour effectuer le produit de convolution de deux signaux $F(t) \cos \omega_1 t$ et $G(t) \cos \omega_2 t$. Le schéma de principe apparaît sur la Figure 1. Les deux signaux sont appliqués à deux transducteurs en forme de peignes interdigités gravés sur un substrat piézoélectrique (Quartz ou Niobate de Lithium). Ils sont alors transformés en deux ondes contradictives $F(t - \frac{z}{v}) \cos(\omega_1 t - k_1 z)$ et $G(t + \frac{z}{v}) \cos(\omega_2 t + k_2 z)$.

FIGURE 1 : Schéma de principe des convoluteurs.

L'interaction non-linéaire fait apparaître des termes produits de fréquences temporelles $\omega_1 \pm \omega_2$ et de nombres d'ondes $k_1 \mp k_2$. Pour recueillir le signal résultant, un peigne de longueur L est gravé dans la zone d'interaction. Sa période p est telle que $\frac{2\pi}{p} = k_1 \mp k_2$. Alors la sortie est de la forme :

$$S(t) = \exp[j(\omega_1 \pm \omega_2)t] \int_L F(t - \frac{z}{v}) G(t + \frac{z}{v}) dz$$

On reconnaît le produit de convolution des 2 signaux F et G mais comprimé dans le temps d'un facteur 2.

Les convoluteurs les plus généralement utilisés sont du type "dégénérés", c'est-à-dire tels que $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Alors, le transducteur de réception est une simple plaque métallique uniforme (Fig. 1b) qui recueille un signal à la fréquence 2ω .

De nombreuses équipes se sont alors intéressées à ce type de dispositif. On a tout d'abord cherché à rendre les effets non-linéaires plus importants par exemple en utilisant l'interaction de l'onde acoustique avec un semiconducteur d'après l'idée originale de W.C. Wang /3/.

Plusieurs dispositifs ont été envisagés comme on peut le voir sur la Fig. 2 : le semiconducteur est placé à proximité du substrat piézoélectrique (Fig. 2a). Le substrat est à la fois semiconducteur et piézoélectrique (exemple CdS ou AsGa) (Fig. 2b). Le Silicium est recouvert d'une couche piézoélectrique permettant la génération des ondes de surface et le couplage avec le semiconducteur (Fig. 2c) /4/. Enfin, on peut utiliser le couplage

avec des éléments discrets d'un circuit extérieur /5/ (Fig. 2d).

FIGURE 2 : Différents types de convoluteurs à ondes de surface et semiconducteur
 2a) Couplage avec espace d'air
 2b) Couplage dans un semiconducteur piézoélectrique
 2c) A couche piézoélectrique déposée
 2d) A prise et diodes extérieures.

Les convoluteurs sont caractérisés par leur facteur de mérite $F_m = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_F P_G}$ où P_{out} est la puissance recueillie en sortie FG pour des puissances électriques P_F et P_G à l'entrée. Toutes ces puissances sont exprimées en mW, F_m est en dBm. Il y a également lieu de considérer le nombre de points des signaux que l'on peut traiter, c'est-à-dire le produit de la bande passante B par leur longueur T . Des facteurs de mérite importants ne sont en général pas compatibles avec des BT élevés, car alors des phénomènes de saturation apparaissent, des distorsions de phase limitent la bande passante, des transferts d'énergie sur des modes d'ordre élevé augmentent l'atténuation et limitent la durée T . Pour des $B.T \geq 500$, F_m est de l'ordre de - 60 dBm

comme le montre le Tableau 1. Dans ces conditions, le couplage avec le semiconducteur n'apparaît pas comme absolument nécessaire : un convoluteur basé sur les effets non-linéaires intrinsèques, mais comportant un compresseur de faisceau qui concentre l'énergie incidente sur une voie étroite de manière à augmenter la densité d'énergie et donc le rendement, donne des performances semblables en F_m , mais présente une uniformité d'interaction presque parfaite (Fig. 3 et tableau I). En outre, aucune saturation de la bilinéarité n'a pu y être observée jusqu'à des puissances d'entrée de l'ordre du W.

Le tableau I montre d'ailleurs les performances comparées des meilleurs convoluteurs connus. La puissance de sortie maximale détermine la dynamique de sortie ; en effet la puissance minimale est limitée par le bruit du préamplificateur de sortie, doit $Fk \gg B$, F facteur de bruit, K constante de Boltzman, θ température absolue.

2. Corrélateur à mémoire. - Les effets non-linéaires acoustiques ont également été utilisés pour réaliser une mise en mémoire d'information. Les premières expériences à ce sujet ont été baptisées "échos de phonons" /6, 7, 8, 9/. Les mêmes mécanismes que précédemment agissant sur des ondes de volume engendrent dans un piézoélectrique semiconducteur une modulation spatiale du taux de remplissage des pièges à électrons responsable d'un effet de mémoire. Mais c'est vraiment en 1974 que l'idée d'utiliser un réseau de diodes est apparue /10/, et qu'il a été montré que cette fonction mémoire ajoutée à un convoluteur, permet d'obtenir un corrélateur fonctionnant en mode asynchrone, les diodes étant de type Schottky ou pn /11, 12/. C'est le corrélateur à mémoire dont nous allons décrire le fonctionnement et les performances.

Le schéma est celui de la Fig. 4. Un réseau de diodes, dont le pas $p = 12,5 \mu$ est notablement plus petit que la demi-longueur d'onde, et placé à proximité d'un substrat de Niobate de Lithium. L'espace d'air qui sépare les deux milieux, et qui est d'environ 2000 Å, est assuré à l'aide de petits plots de quelques microns de diamètre gravés sur le substrat et répartis aléatoirement sur la longueur d'interaction.

Le fonctionnement du dispositif est le suivant. Le signal $G(t) \cos \omega t$, de bande passante

FIGURE 3 : Schéma d'un convoluteur à concentrateur de faisceau.

polarise en direct et bloquant les autres alternances. Il en résulte un déplacement continu de charges qui les polarise en inverse à la valeur crête du potentiel d'excitation.

Le potentiel d'excitation a deux origines : le potentiel associé à l'onde de surface du fait de la nature piézoélectrique du substrat, que l'on écrit $G(t - \frac{z}{v}) \cos(\omega t - kz)$, et le potentiel appliqué à la plaque.

Dans le cas de l'écriture flash et si le temps de charge des diodes est suffisamment rapide, les

TYPE DE CONVOLUTEUR	LiNbO3 (+Compresseurs)	Si/Alr/LiNbO3	ZnO/SiO2/Si	
FREQUENCE CENTRALE MHz	160	300	125	225
BANDE PASSANTE MHz	40	100	22	30
DUREE TRAITEMENT μs	12	20	3	2.3
PRODUIT BT	480	2000	66	69
UNIFORMITE dB	± 3	± 1	± 5	-
FACTEUR MERITE dBm	-70	-65	-70	-57
PUISS. MAX. ENTREE dBm	>30	30	28	24
SORTIE dBm	>-10	-5	-25	-10
REFERENCES	GAUTIER-MAERFELD	REIBLE et al	KINO et al	ELIOTT et al

TABLEAU I : Performances des convoluteurs.

B de durée T, est appliqué au transducteur A. Quand l'onde qui en résulte $G(t-z/v) \cos(\omega t - kz)$ est dans la zone d'interaction, on applique sur la plaque P :

- Soit une impulsion de Dirac $w(t)$ dont l'amplitude atteint 100 V et dont la durée τ est inférieure à la demi-période porteuse soit $\tau < \pi/\omega$: c'est l'écriture "flash".
- Soit une impulsion avec porteuse $w(t) \cos \omega t$, de même fréquence que le signal à inscrire et dont la durée τ est inférieure à $1/B$, c'est l'écriture paramétrique.

Le mécanisme d'écriture se comprend aisément si l'on remarque que les diodes agissent en détecteur crête : elles sont passantes pour les alternances pour lesquelles le potentiel appliqué les

charges accumulées par les diodes engendrent donc une polarisation inverse de la forme :

$$V(x) = W + G(-z/v) \cos kz$$

Dans le cas de l'écriture paramétrique, la polarisation finale des diodes est de la forme :

$$V(x) = \max(|W \cos(\omega t) + G \cos(\omega t - kz)|)$$

$$= W^2 + G^2 + 2GW \cos kt$$

qui se réduit à, si $W \gg G$:

$$V(x) = W + G(-z/v) \cos kz$$

Fig. 4.a

Fig. 4.b

FIGURE 4 : Schéma de corrélateur à mémoire

- 4a) Schéma
4b) Principe

On obtient donc le même réseau de charges stockées dans les deux cas. Ce réseau disparaît lentement par suite du courant inverse (faible) des diodes. C'est ainsi que des durées de mémorisation de plusieurs secondes ont pu être observées avec des pn /12/.

Pendant la durée de mémorisation, le potentiel existant à l'interface semiconducteur-piézo-électrique est identique et opposé à celui de l'onde incidente : l'onde est comme " figée ".

Le même mécanisme que celui du convoluteur peut alors être mis à profit : on fait un batttement non-linéaire entre l'onde figée et une autre onde dite de lecture $F(t) \cos \omega t$ de même fréquence ω et appliquée au même peigne. Le signal de sortie recueilli sur la plaque à la même fréquence ω est :

$$S(t) = \cos \omega t \int_L F(t-z/v) G(-z/v) dz$$

C'est la corrélation entre F et G , sans compression de temps. La figure 5 donne un exemple de démonstration : le signal stocké est un code de Barker de 13 bits à 120 MHz de fréquence centrale. Le même signal est appliqué 10 ms plus tard et l'on obtient en sortie l'autocorrélation du code de Barker qui est représentée sur la Fig. 5.

Un tel dispositif ainsi décrit représente un filtre entièrement programmable dont il suffit d'inscrire la réponse impulsionnelle. Ce dispositif est particulièrement adapté au traitement des signaux radars dans la mesure où la durée T des signaux stockés est limitée à une dizaine de microsecondes et où par contre, la bande passante B pourrait atteindre 100 MHz. C'est pourquoi il est étudié par de nombreuses équipes qui cherchent à augmenter T , B et l'efficacité de l'interaction. Les études ont pour l'instant surtout porté sur la nature et la géométrie des diodes. On peut mesurer les résultats de la façon suivante.

FIGURE 5 : Maquette de corrélateur à diode Schottky
Autocorrélation de signaux de $3,5 \mu s$
exécutée 1ms après l'écriture
a) Signaux CW
b) Code de Braker à 13 bits.

a) Schottky ou pn ?

Les diodes Schottky ont des durées de commutation de l'ordre de la nanoseconde. Il est donc possible avec de telles diodes d'inscrire des signaux de très grande bande passante ($>100\text{MHz}$). Par contre, les courants inverses qui sont d'origine thermo-ionique sont relativement élevés : les durées de mémorisation sont limitées à environ 100 ms sur substrat de Silicium /13, 14/.

Les diodes pn ont des durées d'écriture de plusieurs dizaines de nanosecondes. Seule l'écriture de type paramétrique est utilisable, la bande passante maximale stockable étant limitée par ce fait à environ 20 ou 30 MHz. Par contre, le faible courant inverse autorise des durées de mémorisation dépassant la seconde /14/.

b) Résistivité du substrat semiconducteur.

Ce rendement non-linéaire est d'autant plus

élevé que la résistivité du substrat est plus élevée. Cependant, pour des résistivités supérieures à $100 \Omega\text{-cm}$, les zones de déplétion de chacune des diodes risquent de se boucher rendant impossible le stockage d'un réseau : pratiquement, la résistivité optimale se situe aux alentours de $10 \Omega\text{-cm}$.

c) Géométrie des diodes.

L'onde stockée est en fait échantillonnée. Le nombre d'échantillons par longueur d'onde doit être supérieur à 2 si on ne veut pas apercevoir l'effet de cet échantillonnage. Ceci exige des pas de 4μ pour stocker des signaux de 300 MHz de fréquence centrale. De tels pas, compte tenu du fait que les bandes relatives maximales réalisables efficacement en onde de surface ne dépassent pas 30%, autorisent des stockages de signaux de 100 MHz de bande (en diode Schottky). Dans le sens perpendiculaire à la propagation, le pas peut être plus grand. On utilise alors une diode de forme oblongue devant limiter les courants de fuite latéraux /13/.

d) Silicium ou AsGa. On a récemment réalisé des diodes Schottky sur AsGa (contact Platine). La hauteur de barrière V_{bi} du contact Platine-AsGa étant de 0,95 V, on doit logiquement s'attendre à un courant inverse plus faible que sur substrat Silicium ($V_{bi} = 0,55 \text{ V}$ pour Mo/Silicium). Effectivement, des durées de stockage de 400 ms ont été observées /15/. Ces diodes ont des vitesses d'écriture comparables aux diodes Schottky sur Silicium, et sont donc particulièrement intéressantes.

Le tableau II résume les performances ainsi obtenues. Les pertes du filtre en corrélation sont définies comme le rapport de la puissance du signal de sortie à la puissance du signal de lecture pour une puissance de signal à inscrire de 1 W. On note que des signaux dont le BT dépasse la centaine ont pu être corrélés et que l'on pense obtenir des BT de 1000 dans un proche avenir. Cependant, de nombreux problèmes restent encore à résoudre : l'uniformité d'interaction est à améliorer, la dynamique est actuellement trop limitée par un niveau de parasites anormalement élevé

DIODE TYPE	DEMONSTRATED				LIMITS	
	PN	SCHOTTKY SILICIUM		GaAs	SCHOTTKY	PN
DIODE PERIODICITY (μm)	12.5	12.5	3.8	12.5	3.5	
CENTRE FREQUENCY (MHz)	120	120	145	120	300	
BANDWIDTH (MHz)	20	20	30	20	100	
SIGNAL DURATION (μs)	6	6	10	5	10-20	
CORRELATION FILTER LOSS (dB)	-50	-50	-50	-70	-	
SIGNAL / SPURIOUS (dB)	25	25	30	25	40	
STORAGE TIME	1-10 S	80 mS	40 mS	400 mS	0.4 S	1 S
REFERENCES	1	1,2	3	4		

- [1] Gautier-Maerfeld
 [2] Ingebritsen
 [3] Ralston et al
 [4] Gautier-Maerfeld

TABLEAU II : Performances des corrélateurs à mémoire.

Bibliographie

/1/ L.O. Svaasand "Interaction between elastic surface waves in piezoelectric materials" Appl. Phys. Lett. 15, 300-302 (1969). /2/ C.F. Quate and R.B. Thomson " Convolution and correlation in real time with non linear acoustics " Appl. Phys. Lett. 16, 494-496 (1970). /3/ W.C. Wang and P. Das " Surface wave convolvers via space charge non linearity " Proc. 1972 IEEE Ultras. Symp. 316-321 (1972). /4/ B.R. Khuri-Yakub and G.S. Kino " A monolithic Zinc-Oxide on Silicon convolver " Appl. Phys. Lett. 25, 4, 188-190 (1974). /5/ T. M. Reeder, M. Gilden " Convolution and correlation by non linear interaction in a diode-coupled tapped delay line " Appl. Phys. Lett. 22, 8-10 (1973). /6/ S.N. Popov, N.N. Krainik, Sov. Phys. Solid State 12, 2440 (1971). /7/ U.Kh. Kopvillem, B.P. Smolyakov, R.Z. Sharipov, JETP Lett. 13, 398 (1971). /8/ J. Joffrin, A. Levelut, " Boson echoes. A new tool to study phonon interaction " Phys. Rev. Lett. 29, 1325 (1972). /9/ N.S. Shirev, T.G. Kazyaka, Phys. Rev. Lett. 28, 1304 (1972).	/10/ G. Kantorowicz, French patent n° 73.41234 (1973). /11/ K.A. Ingebritsen, R.A. Cohen, R.W. Mountain, Appl. Phys. Lett. 26, 596 (1975). /12/ C. Maerfeld, Ph. Defranould, P. Tournois, Appl. Phys. Lett. 27, 577 (1975). /13/ R.W. Ralston, J.H. Cafarella, S.A. Reible, E. Stern, Proceedings of IEEE Symposium On Sonics and Ultrasonics, p. 478 (1977). /14/ H. Gautier, C. Maerfeld, P. Tournois, Proceedings of IEEE Symposium On Sonics and Ultrasonics, p. 485 (1977). /15/ H. Gautier, C. Maerfeld, P. Tournois Appl. Phys. Lett. 33, p. 517 (1978).