

L'acoustique picoseconde

HUMPHREY MARIS

À l'aide d'ultrasons de très haute fréquence, on teste les connexions des circuits intégrés.

Depuis quelques décennies, les ingénieurs apprennent à construire des objets miniatures. Les circuits intégrés, par exemple, sont fabriqués à partir de minces couches de silicium que l'on enrichit d'impuretés judicieusement placées, afin de provoquer l'effet transistor ; au-dessus du semi-conducteur ainsi dopé, une succession de couches métalliques et de couches isolantes assurent les connexions des transistors. Certaines de ces couches ont une épaisseur de seulement dix milliardièmes de mètre. La qualité et l'efficacité de ces circuits et les performances des systèmes où ces circuits sont incorporés, dépendent de l'épaisseur et de la régularité des diverses couches.

L'épaisseur des couches est généralement comprise entre cinq nanomètres (ou milliardièmes de mètre) et quelques micromètres. Pour les couches les plus minces, l'épaisseur doit être connue à moins d'un dixième de nanomètre, c'est-à-dire moins que la taille d'un atome. Les mesures d'épaisseur, excessivement difficiles, se font par des techniques qui détruisent les échantillons : on les coupe perpendiculairement à la surface des couches, et on observe par la tranche.

Pour obtenir des épaisseurs précises, la plupart des fabricants contrôlent en permanence les conditions de fabrication comme la température, l'hygrométrie et la pression, sacrifiant périodiquement des composants afin de les analyser en cours de fabrication.

En 1985, afin d'étudier le comportement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs, nous avons envoyé une brève impulsion lumineuse sur un film métallique déposé à la surface d'un échantillon ; puis, quand nous avons envoyé une seconde impulsion lumineuse, nous avons constaté que la surface réfléchissait la lumière de façon périodique, au cours du temps ; nous avons ainsi découvert que la surface vibrait et qu'elle était parcourue par des

ondes de pression de longueur d'onde égale à 50 nanomètres environ. Personne n'avait envisagé que des ondes sonores de fréquence aussi élevée et de durée aussi brève puissent être émises.

Une technique naturelle

Après cette découverte, nous avons mis au point une technique qui utilise ces émissions extraordinairement brèves pour étudier les structures microscopiques, tels les films métalliques des composants électroniques.

Notre technique reprend le principe de l'écholocation des chauve-souris. En 1912, l'ingénieur Hiram Maxim, connu pour ses avions et son invention de la mitrailleuse, proposa que les chauve-souris détectent les insectes volants à l'aide d'ondes de pression inaudibles pour l'oreille humaine ; il supposa que ces ondes étaient des ondes de basses fréquences, produites par les battements de leurs ailes. Toutefois de telles ondes, avec leur grande longueur d'onde, sont diffractées par les petits objets, et non réfléchies : la théorie de Maxim expliquait mal comment les chauve-souris captent les très faibles échos réfléchis par leurs proies.

En 1920, à l'Université de Cambridge, Hamilton Hartridge proposa alors que les ondes émises soient des ultrasons, c'est-à-dire à des ondes de pression à des fréquences supérieures à celles des sons les plus aigus perceptibles par l'oreille humaine. Puis, en 1938, à Harvard, George Pierce et Donald Griffin détectèrent ces émissions. Depuis ces études, les zoologistes ont enregistré les ondes inaudibles émises par de nombreux animaux, tels les dauphins et certains oiseaux. Même des insectes utilisent ce principe : les gerris, les tourniquets et les autres gyryns qui glissent à la surface des eaux douces utilisent la réflexion des ondes produites lors de leur déplacement sur l'eau pour localiser les objets.

Le sonar des chauve-souris est remarquablement perfectionné. Les déplacements de l'animal décalent la fréquence de l'écho reçu par rapport à celle du signal émis en raison de l'effet Doppler, le même effet qui change la hauteur du son d'une ambulance quand elle s'éloigne d'un observateur, après s'en être approché rapidement : la chauve-souris utilise ce décalage pour déterminer la direction et la vitesse de ses proies (le même effet permet aux policiers de détecter les excès de vitesse des automobilistes). En outre, à l'intérieur de chacune des séquences émises, la chauve-souris varie la fréquence du son. Cette modulation aide l'animal à analyser le signal reçu et à identifier sa proie, en déterminant sa forme, sa taille, la fréquence de battement de ses ailes.

Pour déterminer sa distance à un insecte, la chauve-souris doit achever l'émission du signal ultrasonore avant que l'écho ne revienne. Comme la vitesse du son dans l'air est égale à 330 mètres par seconde, les ultrasons ne mettent qu'un cinquantième de seconde pour atteindre un insecte situé à une distance de 3,30 mètres et revenir. Lorsqu'un insecte est ainsi détecté, la chauve-souris émet des séquences d'ultrasons de plus en plus courtes (jusque moins d'une milliseconde), afin de localiser l'insecte à mieux qu'un mètre près.

Les mesures d'épaisseur des très petites structures métalliques sont encore plus difficiles, car la vitesse du son dans l'aluminium atteint 6 000 mètres par seconde : l'aller et retour d'une onde sonore à travers une couche métallique d'un cent millionième de mètre dure seulement trois billionnièmes de seconde. Pour effectuer des mesures sonar sur de tels objets, nous avons dû trouver un moyen de créer des impulsions ultrasonores qui durent moins d'un billionième de seconde.

Pour transmettre des sons dans les liquides ou dans les solides, les phy-