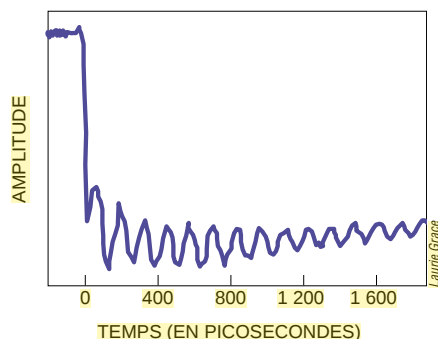


siciens utilisent généralement des transducteurs piézo-électriques, composés de cristaux, tel le quartz, dont le volume change quand on leur applique une tension électrique. L'application d'un courant électrique alternatif fait vibrer ces cristaux à la fréquence du courant. Ainsi, depuis les années 1920, les physiciens produisent des sons de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 1 000 mégahertz, pendant des durées qui peuvent être inférieures à un millionième de seconde. À l'aide de telles ondes, on teste des matériaux de quelques millimètres d'épaisseur seulement : les performances sont bien insuffisantes pour l'analyse des circuits intégrés.

Toutefois des progrès effectués par les spécialistes des lasers nous ont donné les moyens de mettre en œuvre notre idée. Les lasers se sont considérablement perfectionnés, depuis le premier, qui fut construit en 1960 par Theodore Maiman, des Laboratoires de recherche *Hughes* : ce système com-

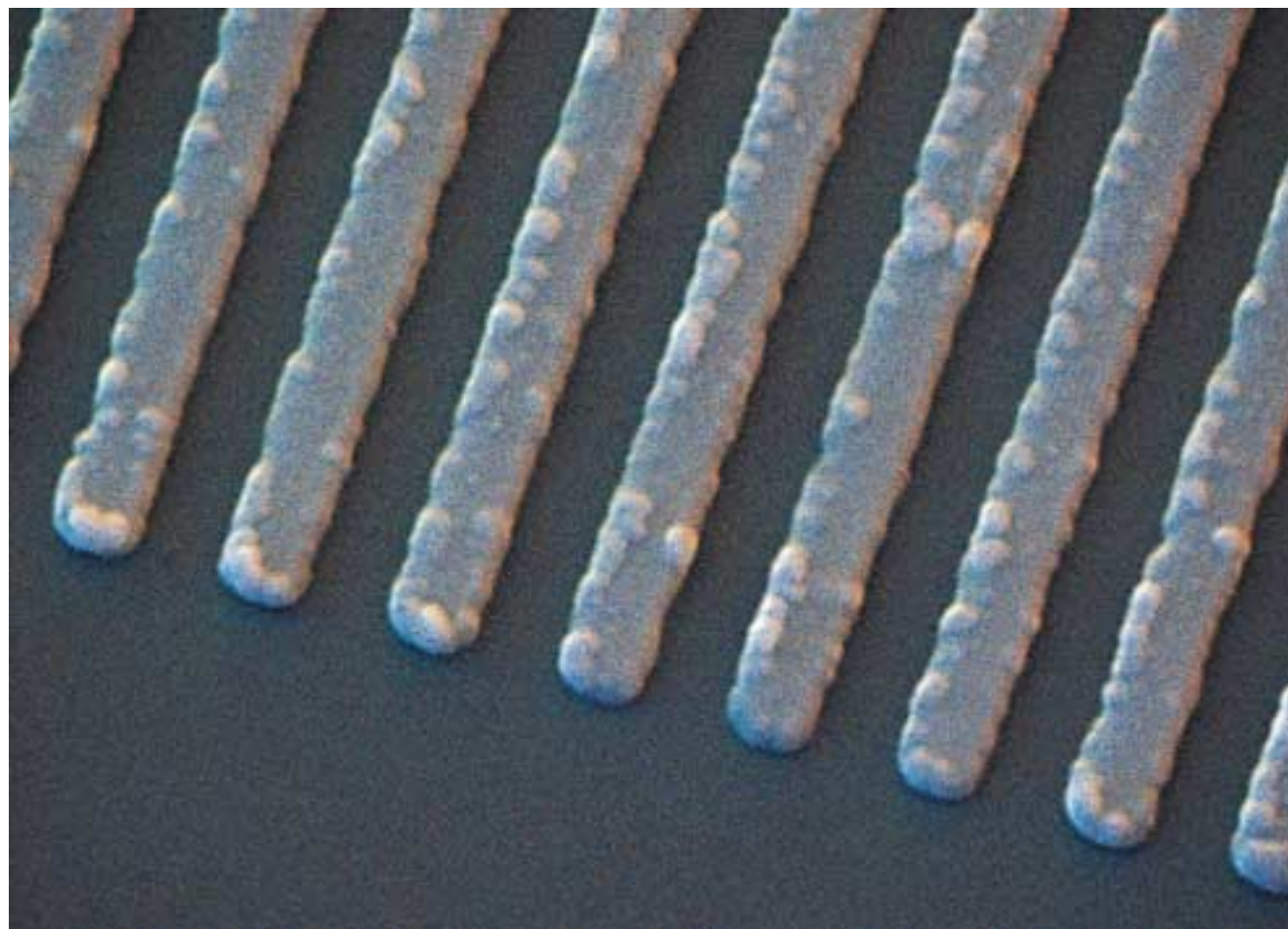
portait des flashes qui excitaient des atomes de chrome d'un cylindre de rubis ; la désexcitation de ces atomes amplifiait la lumière qui traversait le rubis. Ce laser émettait de la lumière rouge sous la forme d'impulsions qui duraient moins d'un millièm de seconde. Le laser à rubis de Maiman fut suivi de lasers à gaz, de lasers à colorants et de lasers à état solide (il existe même un laser où le matériau actif est la gélatine, mangeable après utilisation). Depuis le début des années



1980, certains lasers émettent des impulsions lumineuses qui durent moins d'un cent millionième de millionième de seconde (10^{-14}) : le train d'ondes lumineuses ne comprend que cinq longueurs d'onde et s'étend sur trois micromètres.

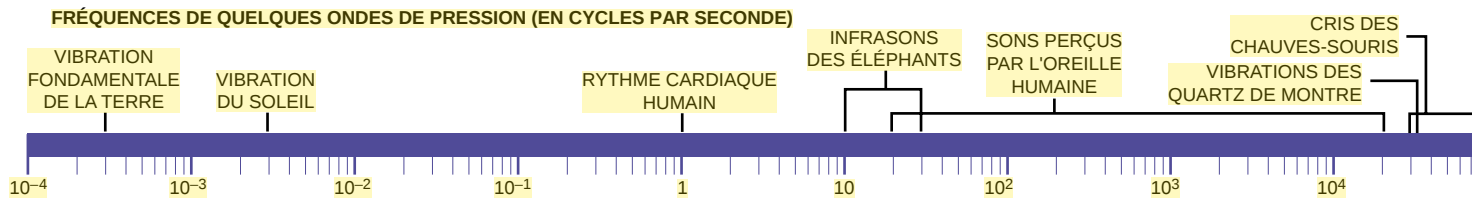
Dans notre laboratoire, nous utilisons la lumière d'un laser à impulsions pour former des ondes de pression : nous focalisons le faisceau du laser sur une couche très mince, à la surface d'un matériau qui absorbe les photons (ou «grains de lumière»). L'énergie des photons est transmise aux électrons, qui se déplacent sur de courtes distances dans le matériau en dissipant de l'énergie. La température de la surface du matériau augmente alors brusquement de quelques degrés, provoquant une dilatation : une onde de compression, parfois une seule compression, se propage alors dans le matériau.

Les impulsions ultrasonores ainsi produites durent parfois une picoseconde seulement (10^{-12} seconde) et



1. CE NANOXYLOPHONE produit des sons à des fréquences de 8 gigahertz, soit 24 octaves au-dessus du *do* central du piano. Il est composé de petites lamelles d'or de moins de 150 atomes d'épaisseur. La courbe supérieure montre la variation de l'amplitude du son

émis. Les ingénieurs de l'industrie micro-électronique utilisent des ondes de fréquences encore supérieures, durant quelques picosecondes (ou millionièmes de millionième de seconde), pour tester la qualité des circuits intégrés.



s'étendent sur quelques nanomètres. Leur amplitude, c'est-à-dire la distance sur laquelle elles déplacent les atomes, est à peine dix fois le diamètre d'un noyau d'atome.

Comment détecter les échos de ces minuscules impulsions, après leur propagation dans les échantillons ? La découverte de la réflexion périodique des surfaces a répondu à cette question :

quand l'écho revient à la surface du matériau, il la déforme de manière périodique, provoquant des changements de ses propriétés optiques. Nous détectons ces variations à l'aide d'une seconde impulsion lumineuse dirigée vers la surface.

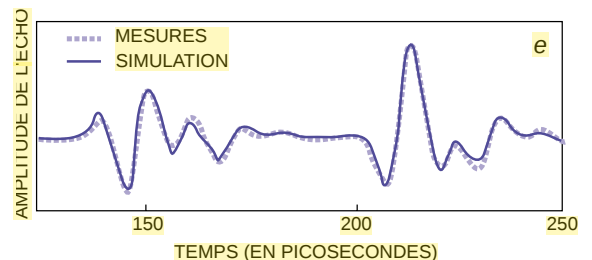
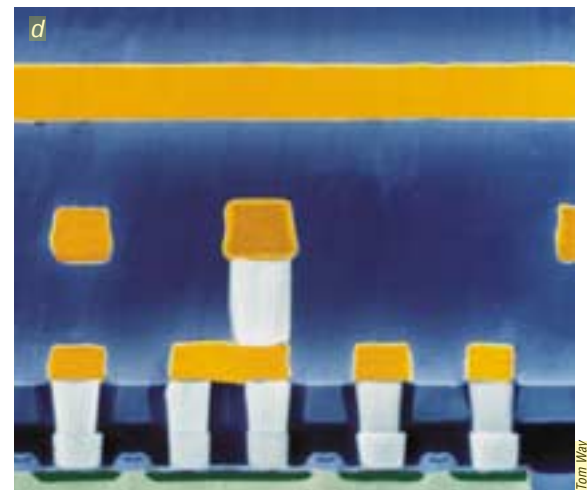
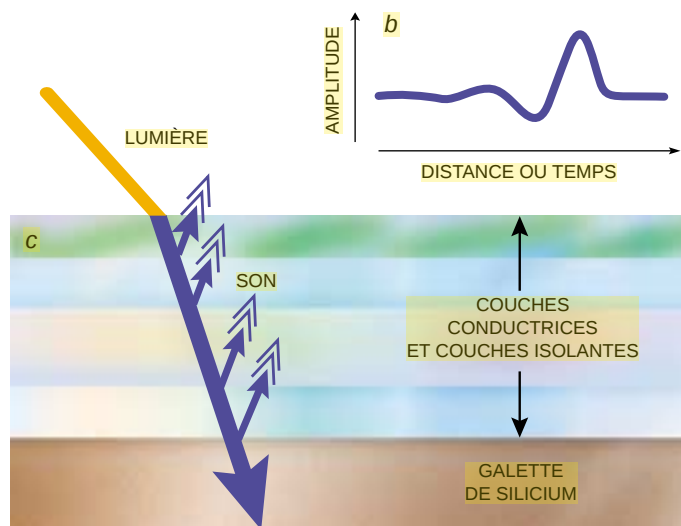
Les impulsions ultrasonores déterminent l'épaisseur d'une couche avec une précision meilleure que le dixième de nanomètre, qui est bien inférieure

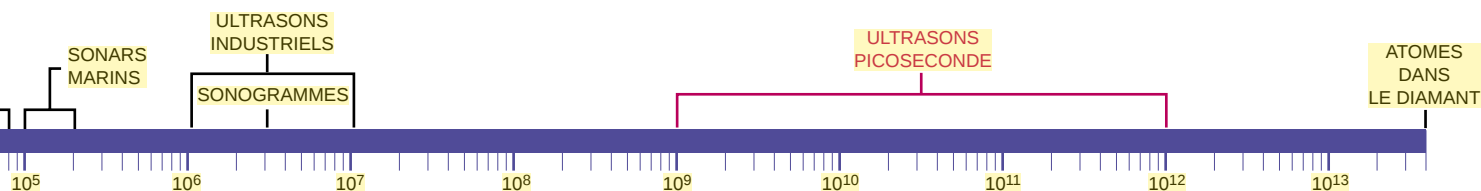
à la longueur d'onde des ultrasons (comprise entre 5 et 50 nanomètres) : il y a là de quoi heurter l'intuition des physiciens, qui savent que les méthodes optiques ont une résolution limitée par la longueur d'onde des rayonnements utilisés. Toutefois nous évitons cette limitation en comparant le profil de l'onde ultrasonore émise et le profil de l'onde réfléchie. Alors

L'échographie picoseconde



L'industrie micro-électronique utilise les ultrasons pour étudier les propriétés des couches métalliques à l'intérieur des composants électroniques : un rayon laser (a) qui éclaire la surface d'une puce chauffe le matériau et engendre un train d'onde ultrasonore (b) de longueur égale à dix nanomètres environ (ce qui correspond à une durée d'une picoseconde, ou un millionième de millionième de seconde). Les ultrasons sont réfléchis par les diverses structures dont l'empilement compose les circuits (c et d). Lorsque les échos reviennent à la surface, ils en modifient les propriétés optiques, que l'on mesure à l'aide d'un second laser. Par ordinateur, on compare la forme de l'écho à un modèle (e) afin de déterminer la position exacte, l'épaisseur et la qualité des interfaces des couches internes.





que le début et la fin d'un train d'onde sont difficiles à déterminer, on localise facilement le maximum à moins d'une fraction de picoseconde, de sorte que l'on mesure la longueur de propagation de l'onde à moins d'un dixième de nanomètre près. La méthode de comparaison des profils est analogue à l'interférométrie.

Ayant mis au point ce procédé, certains physiciens de notre équipe se demandèrent si, avec notre système, nous pourrions faire de la musique : ne savions-nous pas déjà faire des sons ? En collaboration avec des ingénieurs du Centre de recherche IBM de Yorktown Heights, nous avons alors réalisé un «nanoxylophone», dont chaque élément vibrant est une lamelle d'or de moins de 40 nanomètres d'épaisseur et de 200 nanomètres de large. Lorsque nous envoyons une impulsion lumineuse sur une de ces lamelles, nous obtenons un son à une fréquence de huit gigahertz, environ 24 octaves au-dessus du *do* central du piano.

Nous avons également trouvé d'autres structures qui vibrent lorsqu'elles sont excitées par une impulsion lumineuse. Le ton le plus élevé que nous ayons atteint a une fréquence égale à 700 gigahertz, sept octaves au-dessus de la précédente. Toutefois notre nanoxylophone est un médiocre instrument de musique, car toutes ses lamelles produisent à peu près la même note.

À côté de ces explorations acoustiques, certains d'entre nous se préoccupaient de la mise au point de tests non destructifs des circuits intégrés. La fabrication de tels circuits nécessite plusieurs centaines d'étapes et des semaines de travail. Après la découpe d'un barreau de silicium très pur en galettes de 20 centimètres de diamètre et d'une fraction de millimètre d'épaisseur, on effectue un polissage, puis on injecte des impuretés sélectionnées, qui modifient la conduction électrique locale. Le semi-conducteur est alors recouvert de diverses couches minces, métalliques ou isolantes.

Les couches métalliques qui relient électriquement les différentes parties du circuit forment un réseau sur toute

la galette de silicium, à la manière d'un réseau autoroutier, avec ses ponts et ses échangeurs. Les couches isolantes, composées de silice ou de polymères, séparent les couches de métal. En fin de fabrication, les galettes sont découpées en une centaine de circuits intégrés.

Toute perturbation du processus de fabrication peut conduire à un désastre. Notamment l'ensemble du travail doit se faire en salle blanche, car la moindre particule de poussière bloque le fonctionnement des transistors. Or tous les transistors d'un circuit doivent être synchronisés pour que le circuit complet fonctionne ; cette synchronisation dépend des temps de transfert des signaux et de la résistance électrique de la couche métallique qui sépare les transistors. Comme cette résistance est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche métallique, le contrôle des épaisseurs est fondamental.

Une puce et au-delà

L'acoustique picoseconde permet aux fabricants de mesurer l'épaisseur des couches dans les circuits intégrés. Une impulsion lumineuse, focalisée sur la partie de composant à étudier, est absorbée par la couche supérieure du circuit. L'échauffement et la dilatation qui en résultent engendrent des ondes de pression qui se propagent au travers de l'empilement. Chaque fois que l'onde de pression rencontre une interface entre deux couches, une partie du signal est réfléchi. En mesurant les temps mis par ces échos pour revenir en surface, on détermine l'épaisseur de chaque couche avec précision.

Cette méthode est analogue aux techniques sismiques que les géophysiciens utilisent pour déterminer l'épaisseur des diverses couches de la croûte terrestre, mais les couches sont si minces que les échos se rejoignent et interfèrent. Le phénomène est analogue à celui que l'on observe quand de la lumière se réfléchit sur une couche d'huile à la surface de l'eau : les interférences conduisent à des figures irisées. Dans le cas des circuits testés par acoustique picoseconde, les ondes produi-

sent des battements qu'on doit déchiffrer pour en extraire des renseignements sur la géométrie et la taille des couches.

Les échos révèlent de nombreuses autres caractéristiques des couches empilées. Lorsqu'une impulsion de pression se réfléchit sur une surface irrégulière, l'onde se disperse dans l'espace et dans le temps. L'analyse des formes d'ondes donne une idée de la rugosité de la surface. De même, l'amplitude de l'écho révèle la qualité de la jonction entre deux couches : lorsque le contact entre deux films est mauvais, par exemple en raison d'une contamination, l'onde ne franchit pas l'interface, de sorte que le signal réfléchi est anormalement intense.

Maintenant que l'acoustique picoseconde a fait ses preuves pour l'étude des circuits intégrés, nous cherchons à l'utiliser pour étudier des systèmes plus compliqués. Les médecins utilisent déjà des échographies pour surveiller le bon développement des fœtus, *in utero*. À l'aide des ultrasons picosecondes, nous espérons sonder l'intérieur d'une cellule vivante. Nous voudrions créer des images acoustiques des cellules et analyser leur fonctionnement. Notamment nous cherchons à réaliser des images fines du cytosquelette (le réseau qui soutient l'ensemble de la cellule), afin de réaliser l'équivalent des radiographies, mais à l'échelle microscopique.

Humphrey MARIS est professeur de physique à l'Université Brown.

H.-N. LIN et al., *Study of Vibrational Modes of Gold Nanostructures by Picosecond Ultrasonics*, in *Journal of Applied Physics*, vol. 73, n° 6, pp. 37-45, 1er janvier 1993.

Stephen A. CAMPBELL, *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press, 1996.

Bernard PERRIN, Bernard NONELLO, Jean-Claude JEANNET et Alain MARILLIER, *Développements récents en acoustique picoseconde*, Actes du 4e Congrès français d'acoustique, vol. 1, p. 117, 1997.

C.J. MORATH et al., *Ultrasonic Multilayer Metal Film Metrology*, in *Solid State Technology*, vol. 40, n° 6, pp. 85-92, juin 1997.
