

circuit. Moyennant une conception appropriée, un circuit souple de ce type produit une réponse qui dépend uniquement du nombre de points de contact et de leur emplacement. Le principe est potentiellement utile pour la mise au point de matériaux intelligents, qui répondent à des signaux tactiles de façon complexe et adaptée.

MODULATION DE LA TENSION DE SURFACE

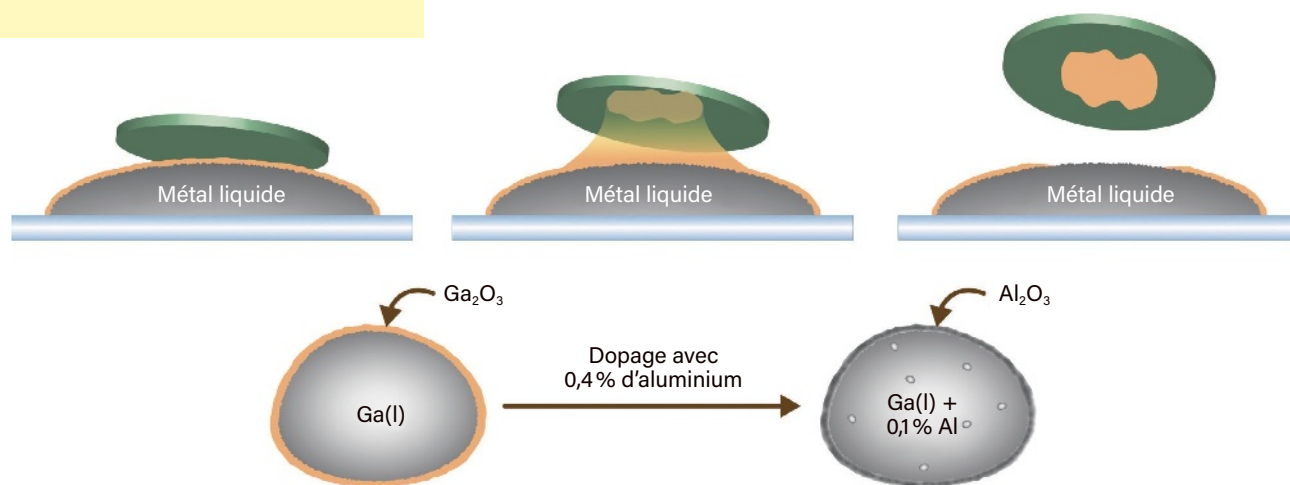
Revenons à la tension de surface exceptionnelle du gallium. Quiconque a eu la maladresse de casser un thermomètre au mercure connaît les gouttelettes sphériques de métal ainsi produites. Ces gouttelettes sont bien sphériques parce que les métaux liquides ont, en l'absence de couche oxydée, une tension de surface énorme. Et de fait, sans sa couche superficielle d'oxyde, le gallium a une tension de surface encore plus élevée que le mercure. L'oxyde peut être éliminé à l'aide d'un acide ou d'une base, mais de tels liquides sont corrosifs. En principe, on pourrait empêcher la couche d'oxyde d'apparaître en travaillant dans un environnement dépourvu d'oxygène, mais en pratique l'oxygène est difficile à éviter.

La réduction électrochimique apporte une solution simple à mettre en œuvre pour éliminer la couche d'oxyde du gallium. En appliquant au métal un potentiel réducteur modeste, de l'ordre de -1 volt, par rapport à une contre-électrode, on peut retransformer en gallium métallique les ions Ga^{3+} de la surface oxydée, grâce à l'apport d'électrons. Quand l'oxyde disparaît, le métal forme des billes (voir la figure page ci-contre, au centre). L'oxyde se reforme spontanément dès que l'on cesse d'appliquer le potentiel.

En 2014, mon équipe a découvert un phénomène inattendu qui se produit lorsqu'on applique un potentiel positif de (par exemple) $+1$ volt à une gouttelette de gallium liquide immergée dans une solution d'hydroxyde de sodium, NaOH (solution basique) : la gouttelette s'étale alors de manière fractale (voir la figure page ci-contre). Comment un liquide dont la tension de surface est dix fois supérieure à celle de l'eau, et donc qui tend fortement à minimiser sa surface, peut-il former une fractale ?

L'application d'un potentiel positif active la formation d'oxyde de surface. On pourrait s'attendre à ce que la couche d'oxyde forme une croûte à la surface du métal et entrave son écoulement. Mais nous avons constaté que, au cours de l'oxydation électrochimique, les gouttelettes se comportent comme si leur tension de surface était très faible. En fait, le NaOH dissout lentement mais continûment l'oxyde, qui se dépose à la surface de la gouttelette, de telle sorte que le métal peut continuer à s'écouler malgré la formation d'oxyde. La tension de surface étant notablement abaissée par l'oxydation électrochimique, la gravité aplatit la goutte, et les petits gradients de tension superficielle entraînent des écoulements dits « de Marangoni », qui contribuent à la formation des inhabituels motifs fractals.

Reste à comprendre la baisse de la tension de surface. Dans le phénomène d'électrocapillarité observé sur des électrodes au mercure, la charge qui s'accumule à l'interface métal-électrolyte peut abaisser la tension superficielle d'une gouttelette de métal. Cependant, pour différentes raisons, l'électrocapillarité n'explique pas à elle seule le comportement observé avec le gallium. En particulier, le changement de tension de surface, qui passe de plus de



EXFOLIER DES COUCHES MINCES

Différentes espèces d'oxydes se forment lorsqu'un métal liquide réagit avec l'air. Ces espèces peuvent être transférées à d'autres surfaces par exfoliation (en haut). Par ce procédé, il est simple de créer des couches ultraminces d'oxyde à température ambiante. En ajoutant de petites

quantités d'un dopant réactif à du gallium liquide (en bas), on peut transformer la surface d'oxyde natif (Ga_2O_3) en une espèce chimique différente. Par exemple, en ajoutant $0,4\%$ d'aluminium, on obtient une surface constituée d' Al_2O_3 .