

Un électron surfeur

Tristan Meunier (tristan.meunier@grenoble.cnrs.fr), **Sylvain Hermelin**, **Laurent Saminadayar** et **Christopher Bäuerle**

Institut Néel, CNRS et Université Joseph Fourier, 25 rue des Martyrs, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9

L'établissement des courants et des tensions aux bornes des circuits électroniques classiques utilisés dans notre quotidien est le résultat du déplacement d'un grand nombre d'électrons.

Lorsqu'on descend à l'échelle de l'électron unique, l'électron est gouverné par les lois de la mécanique quantique, et le contrôle de sa dynamique peut en faire un élément de base pour une électronique du futur : l'électronique quantique. On pourra alors imaginer utiliser les spécificités de la mécanique quantique pour manipuler de l'information plus efficacement.

Nous avons réalisé une opération clé de toute électronique quantique utilisant comme vecteur élémentaire de l'information un électron unique : le déplacement contrôlé de celui-ci dans un semi-conducteur à l'aide d'ondes acoustiques.

Un électron dans un métal ou dans un semi-conducteur est soumis à l'environnement de la structure cristalline du solide et de ses défauts inhérents. Ainsi, son déplacement est loin d'être un long fleuve tranquille : même dans les structures les plus propres, il subira des collisions qui l'amèneront à s'écarter de la ligne droite attendue menant d'un point à un autre d'un circuit électronique. Il pourra même à certaines occasions rebrousser chemin. Une fois lancé, l'électron n'aura qu'une faible probabilité d'atteindre sa destination finale. Pourtant les circuits fonctionnent et accompagnent notre quotidien, malgré le caractère incontrôlé du déplacement électronique. L'électronique classique est basée sur un effet de moyenne statistique qui permet de coder l'information sur des quantités physiques macroscopiques, telles que les courants ou les tensions, définies à partir du déplacement d'un grand nombre d'électrons. Pour l'électronique quantique, ce tour de passe-passe n'est plus possible : l'information est stockée dans les degrés de liberté d'un électron unique, et il devient alors crucial d'optimiser et de contrôler son déplacement.

Les nœuds d'un circuit électronique à base d'électrons uniques sont ce qu'on appelle des boîtes quantiques. Ces dernières servent à piéger un électron isolé et à manipuler ses propriétés quantiques. La boîte quantique est alors l'équivalent du transistor des circuits électroniques classiques (voir encadré 1). Dans ce contexte, l'interconnexion entre les nœuds du circuit se fait par l'échange d'électrons individuels. Il faut alors non seulement être capable de contrôler le déplacement d'un électron, mais aussi de le faire de manière très efficace et rapide.

De plus, pour éviter de perdre l'information portée par l'électron, il est nécessaire de le déplacer isolé des autres électrons de la structure. En conséquence, il deviendrait possible de contrôler de manière cohérente un grand nombre d'électrons en interaction, ce qui représenterait un pas important vers

la réalisation de circuits quantiques complexes utiles dans un ordinateur quantique à base d'électrons uniques.

Jusqu'à présent, il n'était possible de transférer un électron unique qu'entre deux pièges juxtaposés : il est alors déplacé sur quelques dizaines de nanomètres. Pour le déplacer sur des distances micrométriques, une possibilité évidente serait de le transférer de proche en proche à travers une série de boîtes quantiques. Cependant, cette stratégie a plusieurs inconvénients : le nombre de grilles à contrôler augmente linéairement avec la distance, et la vitesse est limitée par le couplage tunnel entre boîtes quantiques.

Grâce à une technique originale, nous avons pu nous affranchir de ces limitations, en créant directement des boîtes quantiques en mouvement dans lesquelles l'électron sera piégé. Il est ainsi déplacé à travers l'échantillon, et l'information stockée dans ses degrés de liberté tels que la charge ou le *spin* est protégée et peut être en principe transférée sur de longues distances.

Les boîtes quantiques volantes

La génération des boîtes quantiques en mouvement nécessite de surmonter deux défis techniques cruciaux. Le premier consiste à créer un canal long de plusieurs microns entre deux boîtes quantiques « statiques » (fig. 1a). Le canal est défini à l'aide de longues grilles métalliques (fig. 1b). En polarisant négativement ces dernières, des barrières latérales électrostatiques sont dressées et le canal est « asséché » de ses électrons. L'électron transféré se propagera alors le long du canal à l'abri de l'influence de ses semblables. Néanmoins, la réalisation de ce canal ne suffit pas pour le transfert de l'électron. En effet, le chemin entre les deux boîtes est très accidenté en raison des imperfections de l'environnement solide. Une fois poussé hors de la boîte quantique « source » à l'aide des tensions appliquées

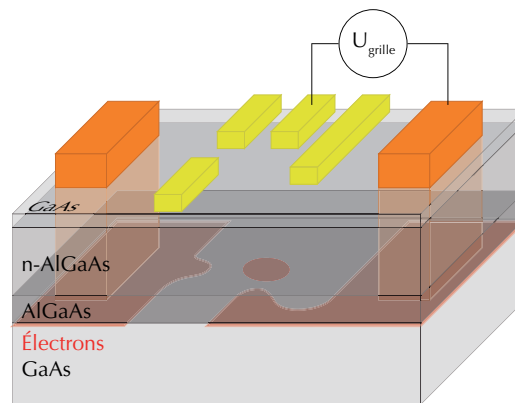


► Les boîtes quantiques latérales

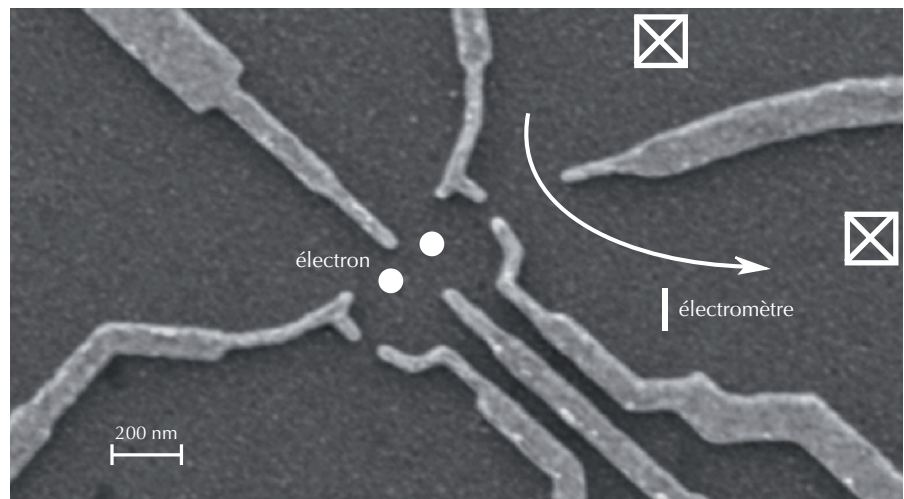
encadré 1

Le principe de fonctionnement d'une boîte quantique est basé sur des connaissances accumulées dans le domaine des transistors, l'un des constituants essentiels de l'électronique moderne. Un transistor utilise l'effet de champ, afin de contrôler précisément la conduction d'électrons entre deux électrodes en contact avec un gaz bidimensionnel d'électrons défini à l'interface entre deux semi-conducteurs (fig. E1). À l'aide d'une grille en or déposée sur la structure semi-conductrice, une barrière électrostatique peut être dressée entre les deux réservoirs et ainsi modifier la conductance du dispositif. L'idée de la boîte quantique revient à utiliser de nombreuses grilles nanométriques afin de réaliser un puits de potentiel électrostatique où un électron pourra être piégé. L'énergie caractéristique de piégeage (de l'ordre de 10 K) est très largement supérieure à la température des électrons (de l'ordre de 100 mK) et correspond à des tailles de boîtes de l'ordre de la dizaine de nanomètres ; c'est pourquoi des tailles nanométriques sont choisies pour les grilles. Ainsi, il a été démontré à la fin des années 90 qu'un électron unique pouvait être isolé des autres électrons de la structure semi-conductrice dans un piège électrostatique de manière contrôlée ; de plus, les caractéristiques du piège à électrons sont complètement ajustables en variant les tensions appliquées sur les grilles.

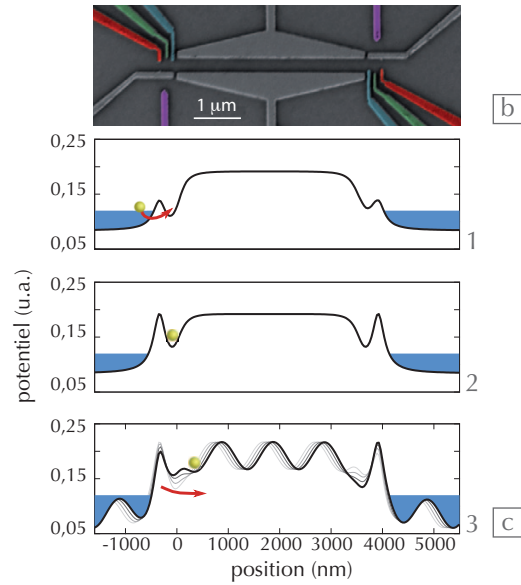
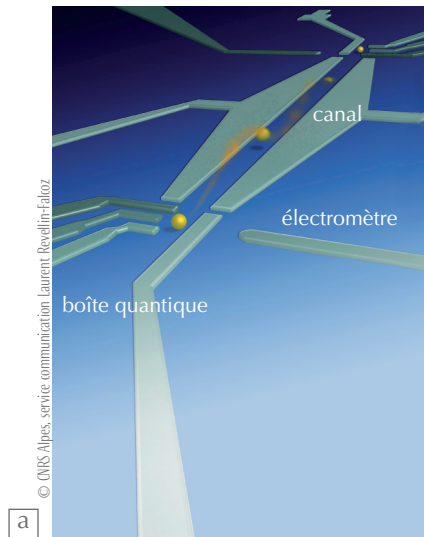
Pour mesurer la présence d'un électron dans la boîte quantique, des électromètres ultrasensibles sont fabriqués à proximité des deux boîtes quantiques à l'aide d'une grille supplémentaire (fig. E2). Les électrons de l'électromètre sont ainsi forcés à passer au plus près de la boîte quantique, ce qui implique un important couplage électrostatique entre les deux systèmes. Ce couplage sera en particulier suffisant pour observer en moins d'une centaine de nanosecondes un changement de la conductance de l'électromètre, lorsqu'un électron est présent ou non dans les boîtes quantiques.



E1. Schéma de principe d'une boîte quantique. Les électrons sont initialement confinés dans une structure semi-conductrice à multicouche à base de AlGaAs, où seule la couche n-AlGaAs est dopée. À très basse température, un gaz bidimensionnel d'électrons (représenté en rouge) est ainsi créé à l'interface AlGaAs/GaAs et son potentiel est contrôlé par l'intermédiaire de contacts (représentés en orange). En polarisant avec des tensions négatives les grilles (représentées en jaune) déposées à la surface de l'hétérostructure, on peut repousser les électrons directement en-dessous de la grille et le gaz peut être sculpté (les régions où il n'y a pas d'électrons sont représentées en gris). En associant un nombre important de grilles, une boîte quantique peut être formée où l'électron pourra être piégé (matérialisée par le petit cercle rouge isolé au milieu de la zone grise sans électron). Les caractéristiques du piège électrostatique pourront être contrôlées à l'aide des tensions appliquées aux grilles.



E2. Image de microscopie électronique à balayage d'une double boîte quantique dite latérale, définie par les tensions appliquées sur les grilles (en gris sur l'image). La position des électrons est représentée par des points blancs. L'électromètre utilisé dans l'expérience est constitué d'une grille séparant les deux contacts (représentés par des croix blanches) de l'électromètre. En appliquant un potentiel négatif sur la grille, on force le courant (représenté par une flèche blanche) à passer au plus près de la boîte quantique.



1. Déplacement contrôlé d'un électron unique.

(a) Vue d'artiste du transfert d'un électron unique.

(b) Image de microscopie électronique à balayage (MEB) de l'échantillon utilisé pour le transfert électronique. L'électron, initialement piégé dans la boîte quantique de gauche (la boîte « source »), est propulsé par une onde acoustique de surface vers la boîte quantique de droite (la boîte « détecteur ») à travers le long canal défini par les deux longues grilles métalliques centrales. Le potentiel de chaque boîte quantique est contrôlé en jouant sur les tensions appliquées sur les grilles colorées rouge, verte et bleue. La grille violette sert à la définition de l'électromètre associé à chaque boîte quantique (voir encadré 1, p. 11).

(c) Potentiel électrostatique ressenti par l'électron : (1) dans la position d'initialisation ; (2) dans la position de transfert ; et (3) avec le potentiel induit par les ondes acoustiques de surface générées par un transducteur placé 2 mm à gauche de la nanostructure (voir encadré 2).



à ses grilles, l'électron restera inévitablement piégé dans le canal par le potentiel créé par les défauts de la structure. Pour qu'il puisse se propager librement et atteindre la boîte « détecteur », un deuxième défi consiste à propulser l'électron sur une onde de potentiel électrique (fig. 1c). De cette manière, l'électron « surfera » au-dessus du potentiel accidenté du canal et pourra atteindre sa destination finale.

La création de l'onde de potentiel électrique repose sur les propriétés piézoélectriques de GaAs (voir encadré 2). En excitant des ondes acoustiques à la surface de l'échantillon, un train de puits de potentiel électrique sera produit dans le canal. Sa vitesse, égale à celle de la propagation du son dans GaAs, est élevée : de l'ordre de 3 μm par nanoseconde. Des boîtes quantiques en mouvement sont ainsi créées, dans lesquelles l'électron pourra être piégé et déplacé rapidement d'un point à un autre d'un circuit électronique, tout en restant isolé.

Pour exciter les ondes acoustiques de surface, un signal électrique radiofréquence est appliqué sur un transducteur situé à 2 mm de la nanostructure (voir encadré 2). À chaque période d'excitation électrique, une onde de surface est créée. Une interférence constructive ne sera possible que pour les ondes dont la longueur d'onde correspond

à la distance entre chaque doigt du transducteur (fig. E3), 1 μm dans notre expérience ($v_{\text{son}} \approx 3000$ m/s, fréquence d'excitation 2,6 GHz). Cette sélectivité en fréquence peut aussi s'expliquer par le fait que la distribution spatiale de potentiel électrique mime alors celle des ondes de surface. Au cours des 70 premières périodes d'excitation (environ 20 ns), l'amplitude de l'onde sonore envoyée à travers l'échantillon croîtra d'abord linéairement avant de saturer vers une valeur stationnaire correspondant, par effet piézoélectrique, à un potentiel électrique de quelques dizaines de millivolts pour l'électron. Ce potentiel est en fait comparable à celui ressenti par l'électron dans les boîtes quantiques électrostatiques. Toutes ces caractéristiques nous assurent un potentiel de piégeage de l'électron suffisant aux températures auxquelles nous travaillons : l'expérience se déroule à 20 mK dans un cryostat à dilution.

« Voir » un électron se déplacer

Pour déplacer de manière contrôlée l'électron, il est nécessaire de l'injecter proprement dans une boîte quantique en mouvement. Dans notre expérience (fig. 1), l'électron, initialement piégé dans la boîte quantique « source », est transféré dans une

des boîtes quantiques en mouvement créées dans le canal ; il est ensuite arrêté dans la boîte « détecteur », distante de 3 μm de la première. Pour cela, nous tirons profit de la versatilité et du contrôle unique offerts par les boîtes quantiques latérales pour réaliser une source et un détecteur à électrons uniques.

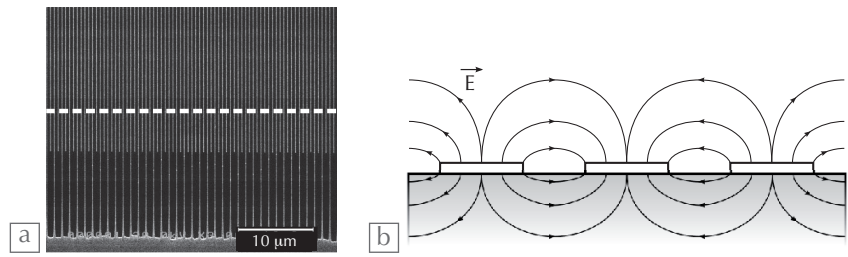
En effet, nous pouvons nous assurer d'avoir au début de la séquence un seul électron dans la source et aucun dans le détecteur. Ceci est réalisé en contrôlant précisément le couplage des boîtes quantiques avec leurs réservoirs électroniques, grâce aux potentiels électriques appliqués sur chaque grille des boîtes quantiques (grilles colorées sur la figure 1b). L'armement de la source et du détecteur consistera à les amener dans une position où l'électron est très bien isolé des réservoirs adjacents et son couplage au canal est optimal. Le passage de l'onde acoustique entrainera alors l'électron hors de la boîte « source » dans une des boîtes quantiques en mouvement, et il finira son chemin dans la boîte quantique statique « détecteur ». La signature expérimentale du transfert de l'électron entre les deux boîtes quantiques sera la coïncidence entre les événements « départ de la boîte quantique « source » » et « arrivée dans la boîte « détecteur » », obtenue à partir de la réponse

► La piézoélectricité et les ondes acoustiques de surface

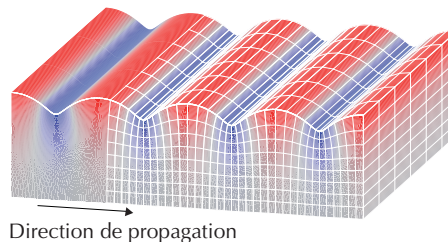
encadré 2

Le mot « piézoélectricité » se rapporte aux corps qui, lorsqu'ils sont contraints mécaniquement, donnent naissance à une polarisation électrique. Réciproquement, plonger un matériau piézoélectrique dans un champ électrique induit une déformation mécanique. C'est l'effet piézoélectrique inverse.

Pour générer des ondes acoustiques, on utilise des peignes interdigités d'électrodes métalliques d'or (IDTs pour *Interdigitated transducers*) déposées à la surface d'un matériau piézoélectrique (fig. E3). Le peigne, lorsqu'il est polarisé par une tension électrique, induit une contrainte mécanique dans le matériau. Lorsque la tension est oscillante, cette contrainte mécanique devient une onde sonore et se propage. Le dessin des IDTs permet d'exciter préférentiellement le mode d'ondes de Rayleigh, lequel est localisé à la surface du matériau, d'où le nom d'ondes de surface (ou SAWs pour *Surface Acoustic Waves*). On peut voir les déformations de la matière induites par cette onde sur l'illustration E4.



E3. Transducteur interdigité (IDT). (a) Image MEB d'un IDT (détail). Il est constitué de deux peignes de 70 doigts métalliques qui s'interpénètrent. Les doigts sont séparés d'un micron et ont une largeur de 200 nm (fines lignes claires verticales sur la figure). Chaque peigne est connecté à une électrode (longue bande claire horizontale au bas de la figure). (b) Vue en coupe, suivant les pointillés blancs horizontaux de la figure de gauche, du champ électrique généré par les électrodes lorsqu'elles sont polarisées.



E4. Déformation du matériau due à l'onde de surface. La couleur code la déformation selon la verticale.

en temps réel des deux électromètres placés à proximité de la source et du détecteur à électrons uniques.

Tout au long de la procédure, l'état de charge de chaque boîte quantique est mesuré en temps réel. Il présente un saut lorsque l'électron sort ou entre dans une boîte (fig. 2). Les séquences où la boîte source change d'état de charge voient aussi la boîte de réception en faire de même. En variant la probabilité d'injection de l'électron dans la boîte de départ, on peut complètement caractériser le processus de transfert. Ce dernier se révèle très efficace (de l'ordre de 90%) et donc intéressant pour transférer de l'information quantique.

Néanmoins, pour l'utiliser dans des protocoles quantiques plus avancés, l'efficacité du processus de transfert d'un électron ne suffit pas. Il est aussi important de pouvoir contrôler précisément l'instant du transfert. En effet, au minimum une série de 200 boîtes quantiques est générée à chaque excitation des ondes acoustiques. En raison du caractère stochastique de transfert, il est difficile de dire dans quelle boîte quantique volante l'électron a été transféré, et cette incertitude temporelle induit une perte de cohérence du système. L'astuce pour contrôler l'instant de l'envoi de l'électron, avec une précision de l'ordre de la nanoseconde, consiste à

modifier le potentiel chimique de la boîte « source » sur des temps caractéristiques comparables. Nous gardons la plupart du temps l'électron dans une configuration où il ne peut s'échapper de la boîte, même sous l'effet des ondes acoustiques de surface. Nous polarisons alors la boîte d'envoi dans une configuration favorable au transfert pendant seulement 1 ns. Le résultat, présenté en figure 3, montre que pour une plage temporelle correspondant à l'établissement de l'amplitude de piégeage des boîtes quantiques en mouvement, le transfert est de nouveau presque parfait. Hors de cette région, le transfert est rendu très inefficace comme on le souhaitait.

Perspectives : une électronique quantique à base d'électrons uniques

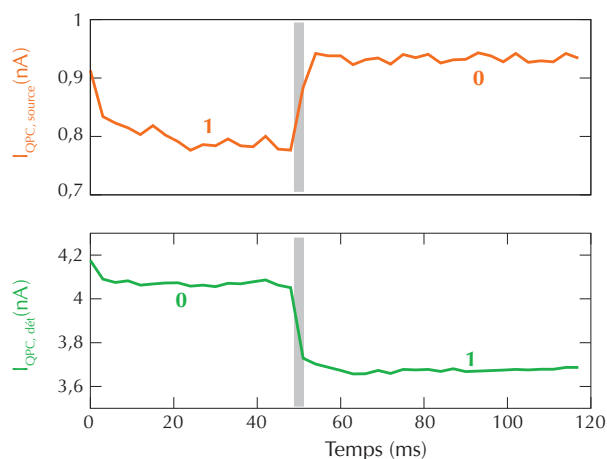
L'efficacité et la rapidité du transfert d'un électron unique ouvrent de nombreuses perspectives quant à la réalisation d'opérations plus complexes d'électronique quantique utilisant la charge ou le *spin* de l'électron comme vecteur de l'information.

La première perspective est l'utilisation du transfert électronique dans des protocoles d'information quantique utilisant le degré de liberté de *spin* de l'électron. En effet,

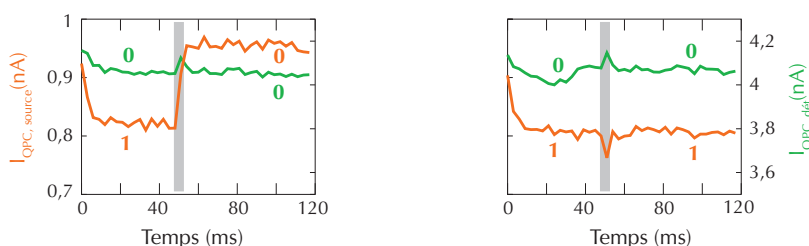
un effort expérimental important a été entrepris récemment pour déterminer quantitativement à quel point le *spin* d'un électron unique est protégé de l'environnement et peut être utilisé pour stocker et manipuler de l'information quantique. Il a été observé que l'électron, une fois piégé dans une boîte quantique, peut préserver sa cohérence de *spin* sur des temps approchant la milliseconde, alors que la manipulation quantique de son *spin* ne prend que quelques nanosecondes. Ces différents résultats qualifient le *spin* de l'électron comme un candidat sérieux pour les processeurs quantiques du futur. Dans ce cadre, le transfert d'électrons « volants » uniques ouvre la voie vers l'interaction de bits quantiques (qubits) de *spin* distants. Néanmoins, il est nécessaire pour cela que la cohérence du *spin* électronique soit préservée au cours du transfert. Des résultats récents montrent sur des ensembles de *spins* électroniques piégés dans des boîtes quantiques en mouvement induits par une onde acoustique, que la cohérence peut être préservée au-delà de la centaine de micromètres. Cette propriété reste cependant à démontrer pour des *spins* électroniques uniques.

La seconde perspective intéressante tire parti de la rapidité du déplacement dans





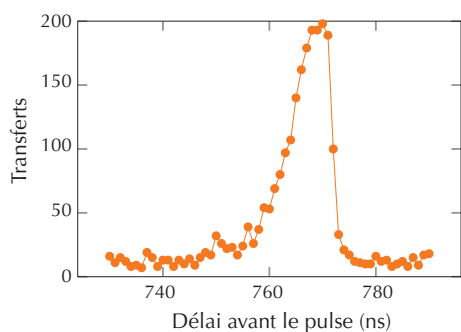
a



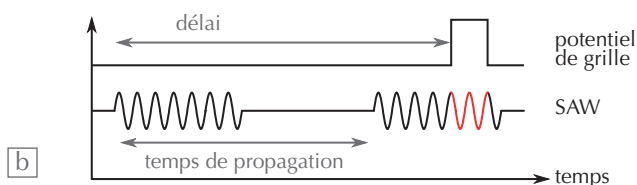
b

2. Détection de l'envoi et de la réception d'un électron unique.

(a) Réponse de chaque électromètre enregistrée en temps réel lors de la procédure de transfert. La ligne grise matérialise l'instant où l'impulsion micro-onde générant les ondes acoustiques est appliquée. Pour la boîte quantique d'envoi, le signal (orange) de conductance saute de la position à un électron à la position à zéro électron. Pour la boîte quantique de réception (signal vert), l'opposé se produit. La coïncidence répétée de ces événements démontre le transfert d'un électron. (b) Trace expérimentale où une erreur s'est produite. À gauche, l'électron n'a pas pu être détecté : il n'a pu être arrêté par la barrière de la boîte de détection. À droite, l'électron n'a pas été envoyé.



a



b

3. Contrôle de l'instant du transfert.

(a) Évolution des occurrences « électron envoyé de la boîte "source" et détecté dans la boîte de réception » sur un total de 201 réalisations expérimentales, en fonction de l'intervalle temporel entre l'impulsion d'ondes acoustiques et l'impulsion appliquée à la boîte quantique « source ». Un transfert électronique n'est observé que pour des retards voisins de 770 ns, ce qui correspond au temps de propagation de l'onde acoustique (SAW) entre le transducteur et la zone de transfert électronique. La largeur de la réponse est reliée au temps pendant lequel l'amplitude de l'onde sonore est suffisante pour assurer le transfert électronique.

(b) Description schématique de la séquence temporelle entre l'impulsion nanoseconde appliquée sur la boîte quantique d'envoi et le train de potentiel induit par l'excitation des SAW.

>>>

les boîtes quantiques en mouvement et se concentre sur les degrés de liberté de charge de l'électron. La possibilité de déplacer l'électron sur des distances micrométriques en moins d'une nanoseconde nous met sur la voie d'expériences d'optique quantique avec des particules chargées. Au contraire d'un photon, l'électron interagit fortement avec ses semblables et le contrôle de l'interaction de Coulomb ouvre des perspectives quant à la réalisation d'interactions à deux qubits volants, un protocole impossible à réaliser avec des photons. Pratiquement tous les ingrédients nécessaires à ce type d'expérience sont déjà disponibles et leur potentiel d'utilisation déjà démontré : une source à électron unique efficace (une boîte quantique), un détecteur d'électron unique efficace (une boîte quantique à nouveau), un bus quantique dans lequel l'électron pourra se propager de manière cohérente (le canal couplé à des ondes de surface). Seul un équivalent de la lame séparatrice pour les électrons reste à développer expérimentalement. Une possibilité consiste à rapprocher deux canaux de propagation séparés par une barrière tunnel. Ce dispositif sera aussi employé pour contrôler l'interaction entre deux électrons se propageant côte à côte, chacun dans un des canaux.

Conclusion

Grâce aux propriétés de piézoélectricité de GaAs, il est possible de générer des boîtes quantiques en mouvement dans lesquelles un unique électron peut être transporté sur de longues distances, isolé des autres électrons de la structure. La rapidité et l'efficacité du transfert ouvrent des perspectives quant au développement d'une électronique quantique à base d'électrons uniques. Son adaptation à d'autres matériaux prometteurs quant aux propriétés de spins (le silicium, par exemple), mais sans couplage piézoélectrique, est possible en déposant une fine couche de matériau fortement piézoélectrique sur le silicium. ■

En savoir plus

- S. Hermelin *et al.*, "Electrons surfing on a sound wave as a platform for quantum optics with flying electrons", *Nature*, **477** (2011) 435-438.
- R. P. G. McNeil *et al.*, "On-demand single-electron transfer between distant quantum dots", *Nature*, **477** (2011) 439-442.
- R. Hanson *et al.*, "Spins in few-electron quantum dots", *Rev. Mod. Phys.*, **79** (2007) 1217-1265.