

Détection d'un spin nucléaire unique à l'aide d'un transistor de spin

Romain Vincent

Décembre 2012

Table des matières

1	Fabrication d'un transistor moléculaire	1
1.1	Lithographie optique	1
1.2	Réalisation d'une grille locale	3
1.2.1	Quelques exemples	3
1.2.2	Le choix de l'oxyde	5
1.2.3	Le dépôt par ALD	6
1.3	Réalisation d'un nanofil	8
1.4	Réalisation d'un interstice nanométrique	12
1.4.1	L'électromigration	12
1.4.2	Etat de l'art	13
1.4.3	Notre technique	14
1.5	Fabrication d'un transistor à molécule unique	15
1.5.1	Dépôt des molécules	15
1.5.2	Les trois régimes de transport	16

Chapitre 1

Fabrication d'un transistor moléculaire

1.1 Lithographie optique

La lithographie optique se déroule en deux étapes et vise à produire les éléments de grande taille tels que les plots de connexion et les lignes d'amené, ainsi que la grille. Pour ces deux premières étapes, une méthode bi-couches à base de LOR3A et de UV3 a été mise au point. Elle a l'avantage de prévenir la formation de bords lors de l'étape de lift-off (cf Fig.1.1) qui pourraient entraîner une perte de contact entre la grille et le plot correspondant lors du passage de marche.

La première étape permet d'obtenir la grille locale de notre dispositif. La méthode présentée dans le Tab.1.1 est utilisée, avec pour seule différence, l'épaisseur d'or déposée : 20 nm . Cette première étape nous permet également d'obtenir les marques d'alignement pour la fabrication des lignes d'amené. Une première série de marques (cf carré bleu de la Fig.1.2) permet d'effectuer un alignement grossier. Ce dernier est ensuite affiné à l'aide d'une seconde série de marques (cf carré vert de la Fig.1.2). Cette première étape est suivie du dépôt d'oxyde par une méthode de dépôt par couche atomique ou ALD (Atomic Layer Déposition) que nous détaillerons plus loin.

La seconde étape de lithographie vise à fabriquer les plots d'or nécessaires à la micro-soudure de notre échantillon, ainsi que les lignes d'amené de

2 CHAPITRE 1. FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOLÉCULAIRE

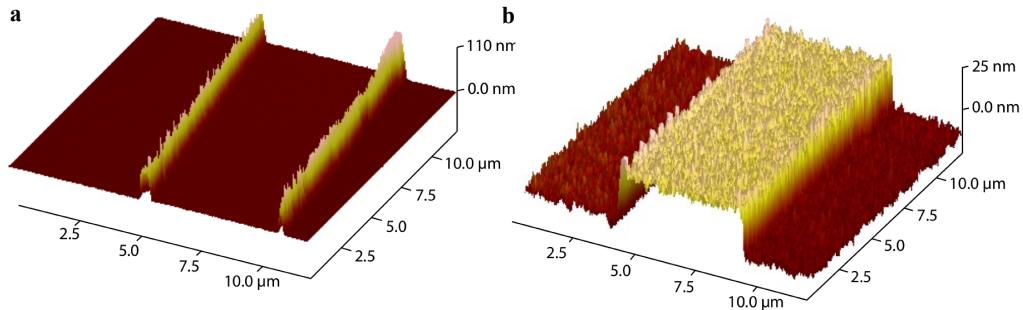


FIGURE 1.1 – **a** : image AFM présentant des bords trop relevé dû à un problème de lift-off. **b** : image AFM montrant une grille n'ayant pas eu de problème de lift-off (extrait de la thèse de Nico).

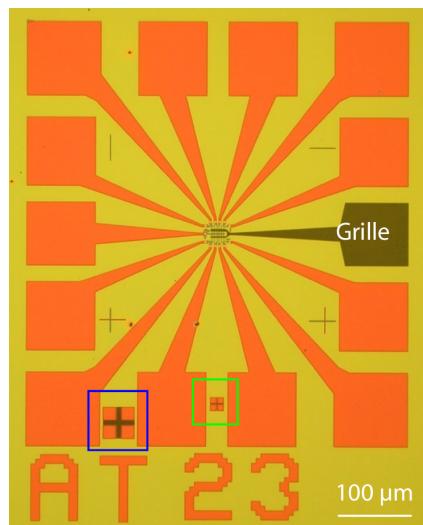


FIGURE 1.2 – Echantillon après les deux étapes de lithographie optique. Les lignes d'amené de courant sont visibles en orange et la grille locale en gris. Les deux carrés repèrent les marque d'alignement. (extrait de la thèse de Nico)

courant (cf partie orange de la Fig.1.2). La recette du Tab.1.1 est utilisée pour obtenir un dépôt de 100 nm d'or avec une couche d'accroche en titane.

Le résultat final est présenté dans la Fig.1.2 où la partie orange désigne les lignes d'amené de courant et la partie grise la grille locale. La partie centrale va venir accueillir les nanofils d'or comme nous allons le voir dans la suite.

1.2 Réalisation d'une grille locale

La grille est un élément essentiel du transistor et c'est également vrai d'un transistor moléculaire [1, 2]. Dans ce dernier cas, elle permet notamment de moduler le potentiel chimique de la molécule allant jusqu'à modifier son état de charge (cf annexe sur le transport mésoscopique). Elle permet également de contrôler la conductance du système (avec le concours de la tension source-drain), ce qui permet de choisir des points de fonctionnement adaptés. Nous détaillerons ce dernier point dans le chapitre résultat.

L'efficacité intrinsèque d'une grille peut être résumé en un critère : la charge induite. Celle-ci s'exprime simplement par $Q = CV_g^{max}$ où Q est la charge induite et C est la capacité associée à la grille, V_g^{max} étant la tension maximale applicable à la grille. La charge induite dépend essentiellement de trois paramètres physiques : le champ électrique maximum applicable, l'épaisseur et la permittivité de l'oxyde [3].

Outre ces paramètres, il existe plusieurs géométries de grille susceptibles d'avoir une influence sur l'efficacité de cette dernière.

1.2.1 Quelques exemples

On peut identifier trois géométries possibles : la grille au-dessus ou “*top-gate*”, la grille latérale et la grille arrière ou “*back-gate*”.

La “*top-gate*”

Cette configuration est celle utilisée dans l'industrie en ce qui concerne les transistors à effet de champ conventionnels. On la retrouve également dans les dispositifs expérimentaux faisant appel à des nanofils [4] ou bien encore

4 CHAPITRE 1. FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOLÉCULAIRE

	étape	procédé	paramètres
1	nettoyage du wafer	acétone, ethanol, isopropanol et plasma oxygène (RIE)	2 min
2	étalement de LOR 3A pour une épaisseur de 400 nm	tournette	$v : 2000 \text{ tr}.\text{min}^{-1}$, $a : 2000 \text{ tr}.\text{min}^{-2}$, $t : 30 \text{ s}$
3	cuisson	plaqué chauffante	1 min à 170 °C
4	étalement de UV3	tournette	$v : 4000 \text{ tr}.\text{min}^{-1}$, $a : 2000 \text{ tr}.\text{min}^{-2}$, $t : 30 \text{ s}$
5	cuisson	plaqué chauffante	1 min à 130 °C
6	insolation	aligneur d'UV MJB3	5.5 s à 0.3 mW.cm ⁻²
7	recuisson	plaqué chauffante	1 min à 130 °C
8	développement	MF-CD-26	30 – 40 s
9	neutralisation du développeur	eau DI	1 min
10	dépôt de la couche d'accroche métallique	évaporateur à canon à électron PLASSYS	5 nm de Ti à 0.1 nm.s ⁻¹
11	dépôt de la couche métallique principale	évaporateur à canon à électron PLASSYS	100 nm de Au à 0.1 nm.s ⁻¹
12	<i>lift-off</i>	acétone	10 min à 1 h, on peut l'assister par ultra-son à 80% de la puissance maximum.
13	dissolution de LOR3A	PG-Remover	1 h à 80 °C
14	rinçage	acétone et isopropanol	1 min de chaque sous la pissette
15	séchage	azote sec	wafer posé sur du papier absorbant, pistolet à la verticale du wafer, ne pas toucher le wafer avec des pinces
16	nettoyage	plasma oxygène (RIE)	10 min

TABLE 1.1 – Recette du double couche LOR3A/UV3 : celle-ci permet de ne plus avoir d'effet de bord lors des lift-off.

à des nanotubes [5]. Elle a également pu être implémentée dans le cas de nanotubes suspendus donnant des résultats plus que convaincant [6].

Cette configuration est cependant difficilement compatible avec l'électromigration. En effet, dans ce cas, le gap formant la source et le drain se fait après les étapes de lithographie, ce qui serait impossible si le fil d'or était recouvert par une grille avant électromigration.

La grille latérale

Cette configuration consiste à placer la grille latéralement vis à vis du gap obtenu par électromigration [7]. De plus, accompagné d'une "Back-Gate", elle permet d'avoir un moyen supplémentaire de faire varier le potentiel chimique de la molécule située dans la gap. Il est en revanche très difficile de contrôler précisément la position de cette grille et elle se trouve donc souvent situé à plusieurs dizaine de nanomètre du gap. De plus, le rôle de l'oxyde est dans ce cas joué par l'air qui possède une permittivité de l'ordre de l'unité. Ceci a pour conséquence de diminuer fortement le couplage de la grille.

La grille arrière

Dans cette configuration, la grille se situe sous le dispositif. C'est cette configuration qui a été choisie lors de la fabrication du premier transistor à molécule unique [8]. Elle est bien sûr compatible avec l'électromigration et c'est d'ailleurs cette configuration que nous avons également choisi d'adopter, optant pour une grille locale. La fabrication de cette dernière est grandement facilité par l'utilisation de la technique ALD que nous allons présenter dans la suite.

1.2.2 Le choix de l'oxyde

Comme nous l'avons déjà précisé en introduction, le choix de l'oxyde est très important et, en particulier, la permittivité de ce dernier doit être la plus élevée possible.

Parmi les oxydes à haute permittivité, les plus couramment utilisés sont l'alumine ($\kappa \sim 8$), l'hafnia ($\kappa \sim 17$) et l'oxyde de zirconium ($\kappa \sim 26$) [3].

6 CHAPITRE 1. FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOLÉCULAIRE

De manière générale, le premier est obtenue par dépôt d'une électrode d'aluminium, puis exposition à une atmosphère riche en oxygène ou bien par ALD. Lorsque je suis arrivé en thèse, la technique par oxydation naturelle était celle en usage. Bien que relativement facile à mettre en œuvre, il est difficile de connaître avec exactitude l'épaisseur d'oxyde. De plus, nous avons observé une grande variabilité dans la qualité des grilles obtenue par ce procédé.

Parmi les trois oxydes précédemment cité, nous avons choisi l'oxyde d'hafnium. Celui si à l'avantage d'être fortement documenté et présente des performances supérieures à l'alumine pour ce qui est de la charge induite [3]. Nous avons donc développé un nouveau procédé inspiré de [3], en utilisant une méthode de déposition par couche atomique (ALD), nous permettant d'obtenir une grille avec un hafnia de 8 nm environs.

1.2.3 Le dépôt par ALD

La technique d'ALD originellement appelée ALE (pour Atomic Layer Epitaxie) a été breveté dans les années 1970 et remise au goût du jour pour les besoins toujours plus grands de la microélectronique [9]. Elle consiste en une succession de deux réactions auto-limitantes, aboutissant à la formation d'un oxyde comme le montre la Fig.1.3.

Le premier avantage de la technique est sa facilité de mise en œuvre. Le contrôle du procédé, couche par couche, permet de choisir l'épaisseur d'oxyde déposé avec une grande précision. De plus, la nature de l'oxyde est seulement déterminée par les précurseurs utilisés, ce qui donne un large choix de matériaux. Afin d'obtenir un oxyde de qualité pour les applications électroniques, celui-ci doit remplir deux critères : il doit contenir peu d'impuretés et être de préférence amorphe.

Pour remplir le premier critère, l'idéal est de chauffer de façon suffisante le substrat afin de désorber efficacement les déchets produits lors de la fixation du précurseur (cf Fig.1.3). Afin d'obtenir une structure amorphe, il est, au contraire, préférable d'effectuer le dépôt à basse température, ce qui a également l'avantage de rendre le procédé compatible avec une étape de lithographie [3] (évitant à la résine de brûler). Il faut donc arriver à trouver un compromis entre ces deux conditions contradictoires.

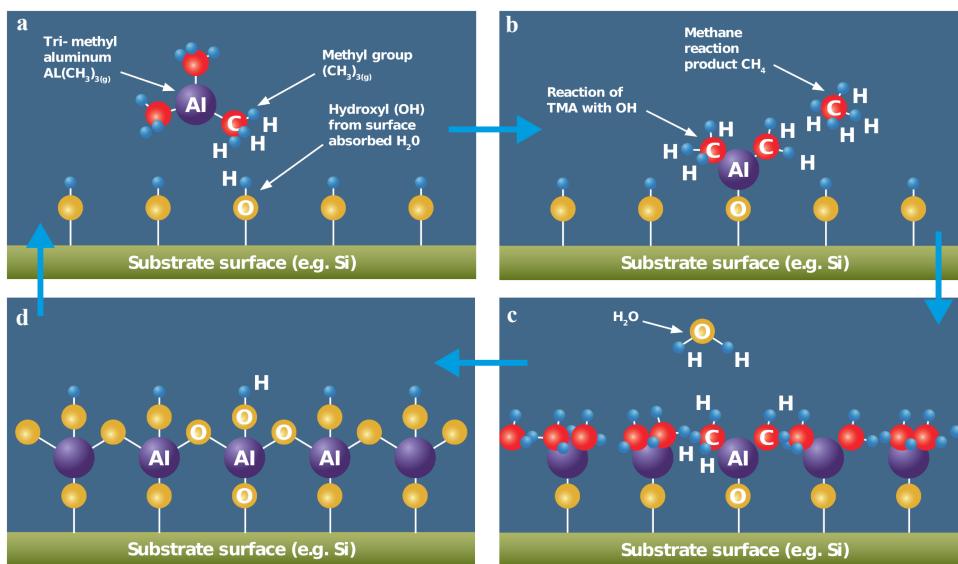


FIGURE 1.3 – Première étape du cycle ALD : le premier précurseur, ici du $\text{Al}(\text{CH}_3)_{3(g)}$, se fixe à la surface (a) et le produit issue la réaction de fixation sont évacués par un flux de gaz inerte (b). Dans un deuxième temps, de l'eau est injecté et réagi avec la première couche de précurseur (c) pour former une couche atomique d'oxyde (d). Le cycle se répète ensuite à raison d'une couche atomique par cycle. (extrait du site CambrigeNanoTech)

Réglages	
élément	paramètres
température du précurseur	90 °C
température du Tee	150 °C
température de la chambre (<i>inner</i> et <i>outer</i>)	100 °C
température du <i>Bellow</i>	150 °C
flux d'azote	20 sccm (pression d'environ 0.5 Torr)

Procédé	
étape	paramètres
1 pluse de TDMAH	0.015 s
2 temps d'attente	120 s
3 pulse d'eau	0.015 s
4 temps d'attente	120 s

TABLE 1.2 – Paramètres et réglages du procédé ALD.

Celui-ci été trouvé en laissant un temps conséquent entre les différentes étapes du dépôt, permettant aux produits de réaction de désorber [3]. Cela se traduit par un temps d'attente entre chaque étape de cycle de 2 minutes. Un dépôt de 8 nm (environ 80 cycles) d'hafnia prend donc un peu plus de cinq heures (pour les détails concernant le dépôt ALD, le lecteur peut se référer au Tab.1.2). Si ce temps peut paraître long au premier abord, il ne représente qu'un temps négligeable au regard des autres étapes et notamment, celle de lithographie électronique que nous allons aborder maintenant.

1.3 Réalisation d'un nanofil

Comme nous l'avons présenté dans l'introduction, notre méthode de fabrication repose sur la technique d'électromigration. Cette dernière, pour fonctionner correctement, à besoin d'être opérée sur des fils d'or très fins, présentant une section de quelque dizaine de nanomètre pour une épaisseur de quelque nanomètre en ce qui concerne la partie la plus fine (cf Fig.1.4).

Le nanofil va également avoir un impact sur le couplage de la molécule à la grille. Cette dépendance se fait de deux manière. Tout d'abord, la forme de pointe donné au niveau de la partie fine du nanofilm va minimiser l'écrantage une fois le gap obtenue [1]. Ensuite, en ayant une largeur faible, les films minimisent la surface en vis à vis avec la grille et donc le risque de fuit de grille à travers un défaut de l'oxyde, augmentant la tension maximale applicable.

Afin d'obtenir des fils répondant à ces critères, nous avons utilisé une méthode dite d'évaporation sous-angle. Pour cela, il faut tout d'abord déposer deux couches de résine, la partie supérieure étant constituée de PMMA et la partie inférieure de PMMA-MAA, plus sensible aux électrons. On procède ensuite à la lithographie électronique puis au développement de la résine. Du fait de la plus grande sensibilité de la partie inférieure et la présence d'électrons rétrodiffusés, on obtient une partie sur-insolé venant former un pont comme décrit sur la Fig.1.4.

On évapore ensuite une fine couche de titane (5 nm) avec un angle de 0° pour constituer une couche d'accroche. Puis on évapore, sous un angle de $\pm 30^\circ$, 10 nm d'or constituant la constrictions. Enfin, 100 nm d'or sont

	étape	procédé	paramètres
1	dépôt de résine PMMA/MMA 2 % en masse	tournette	$v : 6000 \text{ tr}.\text{min}^{-1}$, $a : 4000 \text{ tr}.\text{min}^{-2}$, $t : 30 \text{ s}$
2	recuit (softbake)	plaqué chauffante	5 minutes à 200°C
3	dépôt de résine PMMA 33% en masse	tournette	$v : 1400 \text{ tr}.\text{min}^{-1}$, $a : 2000 \text{ tr}.\text{min}^{-2}$, $t : 30 \text{ s}$
4	recuit	plaqué chauffante	5 minutes à 180°C
5	insolation	MEB	dose de $350 \mu\text{C.cm}^{-2}$
6	développement	becher MIBK/IPA (1 :3)	30 secondes
7	rinçage	bécher IPA	2 secondes
8	surdéveloppement	bécher IPA	1 minute
9	neutralisation du dévelopeur	bécher d'eau désionisée	1 minute
10	dépot de la couche d'accroche	évaporateur à canon à électron PLASSYS	3 nm de Ti à 0.05 nm.s^{-1} , angle= 0°
11	dépot de la constriction	évaporateur à canon à électron PLASSYS	10 nm de Au à 0.1 nm.s^{-1} , angle= $\pm 30^\circ$
12	dépot des nanofils	évaporateur à canon à électron PLASSYS	100 nm de Au à 0.15 nm.s^{-1} , angle= $\pm 0^\circ$
13	lift-off	bécher d'acétone	1 heure minimum
14	rinçage	acétone, éthanol et isopropanol	
15	séchage	azote sec	
16	nettoyage	plasma oxygène (RIE)	3 min

TABLE 1.3 – Recette du double couche PMMA/MAA : celle-ci permet d'obtenir des constrictions idéales pour l'électromigration.

10 CHAPITRE 1. FABRICATION D'UN TRANSISTOR MOLÉCULAIRE

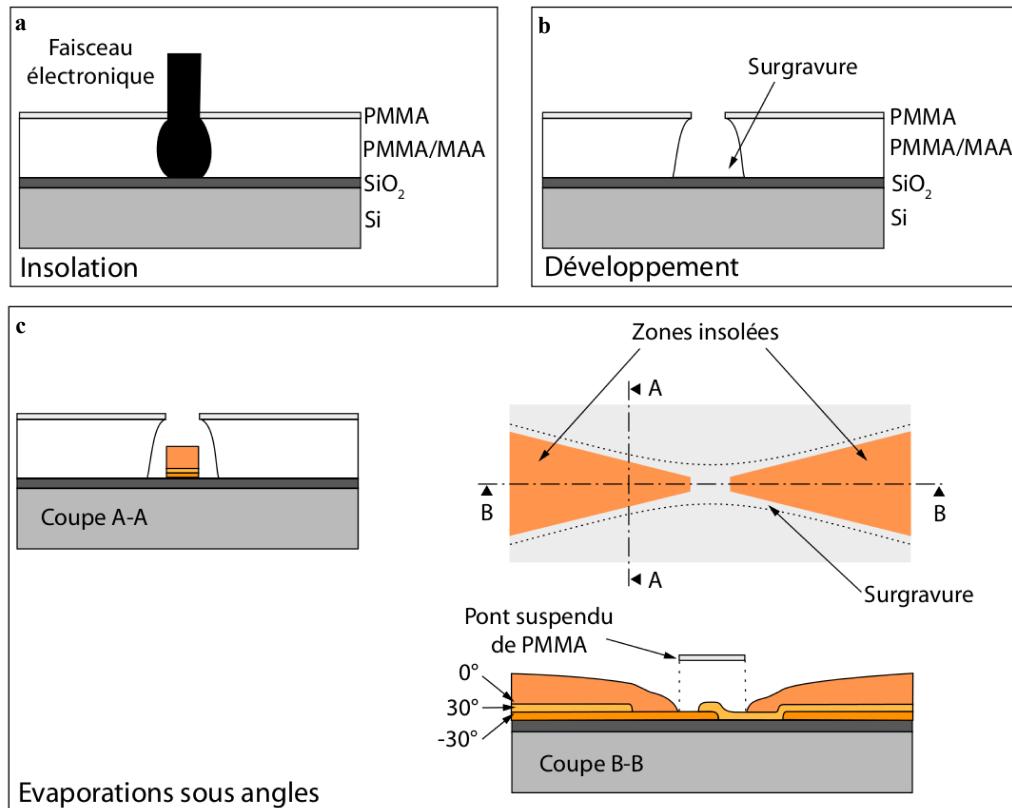


FIGURE 1.4 – **a** : Insolation par lithographie électronique de la bicouche de résine. La partie la plus proche du substrat (PMMA/MAA) se trouve plus insolé depuis une plus grande sensibilité aux électrons et la présence des électrons rétrodiffusés. **b** : résultats après développement montrant clairement la surgravure générée par la surexposition de la partie basse. **c** : Evaporation sous angle : différentes couleurs représentent les différents angles d'évaporation (-30° , 0° et 30°). (extrait de la thèse de Nico).

évaporés à 0° afin de venir relier la constriction aux plots de connexion. Cet épaisseur doit être également suffisant pour assurer un bon passage entre la partie se situant sur la grille et celle se trouvant sur la surface même du wafer. La structure finale est présentée dans la Fig.1.5.

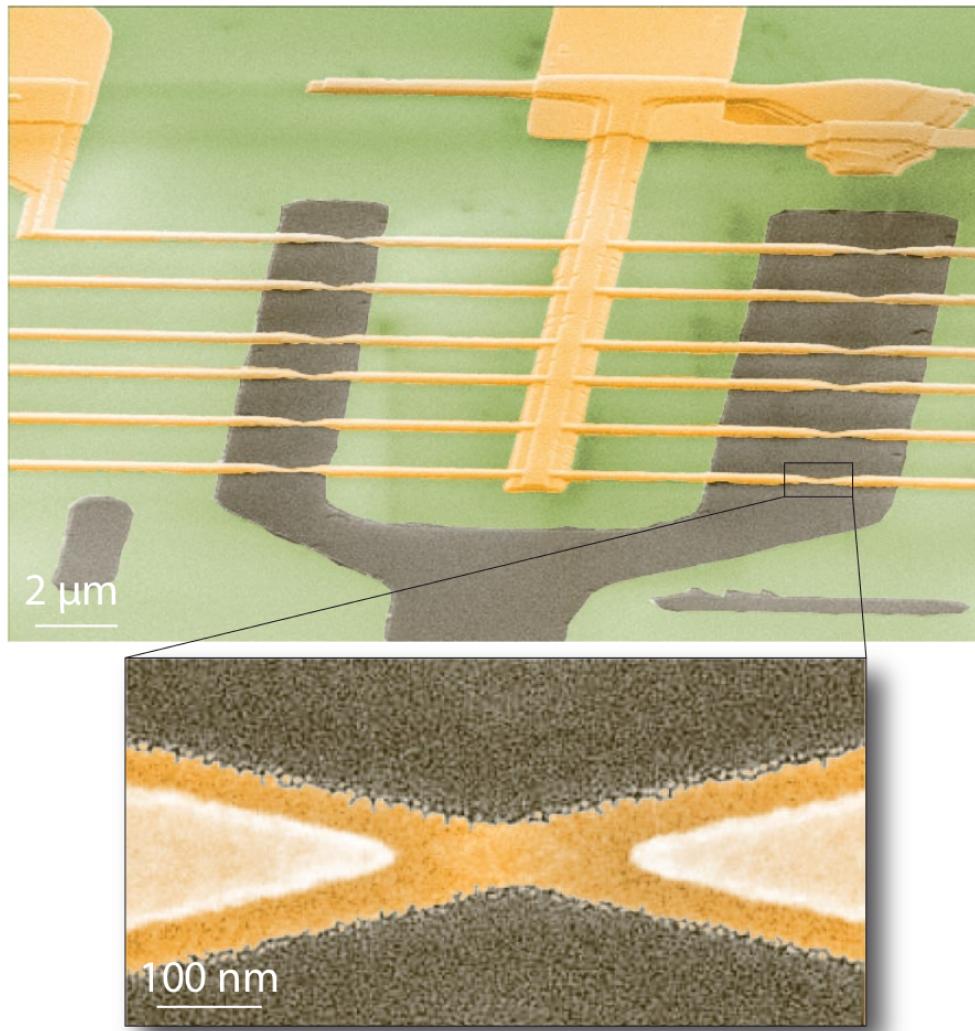


FIGURE 1.5 – Image obtenu par microscopie électronique à balayage montrant la structure centrale de nos échantillons. Le grossissement présente une constriction obtenue à l'aide de l'évaporation sous angle. La grille, coloré en gris, est clairement visible au centre.

1.4 Réalisation d'un interstice nanométrique

Une fois que nous avons obtenue nos constrictions métalliques, il faut procéder à la dernière étape de fabrication : l'électromigration. Cette dernière, qui est effectuée à basse température, va nous permettre d'obtenir les interstices de quelques nanomètres de largeur nécessaires à la fabrication d'un transistor moléculaire. Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps la technique d'électromigration ainsi que les différentes méthodes de mise en œuvre. Nous finirons par une description de notre technique de contre-réaction rapide à basse température.

1.4.1 L'électromigration

L'électromigration est un phénomène connu depuis plus d'un siècle maintenant [10]. Ce phénomène a connu un regain intéré avec le développement de la micro-électronique notamment parce qu'il a été identifié comme étant une cause de panne récurrente [11, 12].

Le phénomène d'électromigration se produit lorsqu'une forte densité de courant traverse un conducteur. Les ions du réseau sont alors soumis à deux forces : la première est induite par le champ électrique induisant le courant, la seconde est dû aux électrons qui, du fait de la diffusion, viennent céder un peu de leur moment cinétique [13]. L'action de ces deux forces de résume par la formule suivante :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_v = Z^* e \mathbf{E}$$

où \mathbf{F}_d est la force induite par le champ électrique et \mathbf{F}_v celle induite par la diffusion des électrons. Le terme Z^* est en général utilisé pour représenter la charge effective des ions soumis à un champ électrique et rend compte de l'interaction ions/électrons.

Ce phénomène a été pour la première fois utilisé en électronique moléculaire par le groupe de D.C. Ralph à Cornell [14]. La technique a notamment était mis en œuvre pour réalisé le premier transistor à molécule unique [8]. Depuis, elle a connu de nombreuses évolutions comme nous allons le voir maintenant

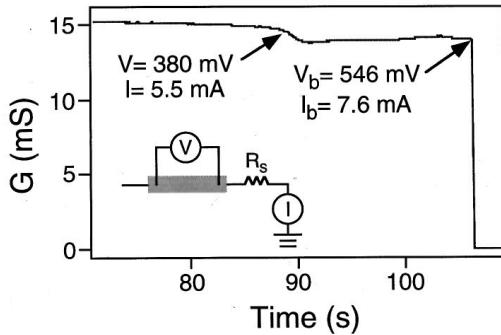


FIGURE 1.6 – Evolution de la conductance d'un nanofil au court du temps lors d'une procédure d'électromigration. Extrait de [14].

1.4.2 Etat de l'art

On peut classer les techniques d'électromigrations en trois grande catégorie : à rampe unique, à contre-réaction et à cassure-spontanée [15].

A rampe unique

C'est la première technique qui a été mise en oeuvre dans le domaine de l'électronique moléculaire par Park *et al.* [14]. Elle consiste en l'application d'une rampe de tension croissante sur une fin fil de métal. La simplicité de la méthode est séduisante mais mal contrôlé, elle peut conduire à une destruction de la jonction, notamment dû au chauffage induit par effet Joule.

A contre-réaction

Cette méthode à été développé par Strachan *et al.* en 2005 [16]. Elle a pour but de réduire le chauffage de la jonction par effet Joule [17] en introduisant une boucle de contre-réaction asservie sur la résistance de la jonction. Si celle-ci dépasse une valeur critique fixée à l'avance, la tension est diminué puis augmente à nouveau depuis une valeur plus basse. Ceci à pour effet de diminuer la puissance dissipé par la jonction lors de l'électromigration (voir figure). Le principal inconvénient de cette technique est son temps de mise en œuvre : la formation d'un seul gap peu prendre quelques heures.

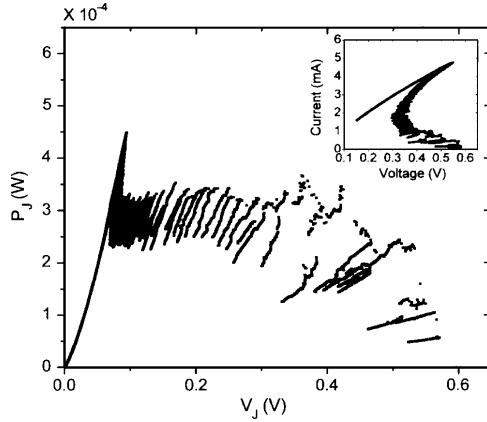


FIGURE 1.7 – Evolution de la puissance dissipée en fonction de la tension appliquée lors d'une procédure d'électromigration à contre-réaction. En encart, caractéristique courant-tension lors de cette même procédure. Extrait de [17].

A cassure spontanée

Cette dernière méthode a été mise au point dans le groupe de H.S.J. van der Zant en 2007 [18]. Une première étape d'électromigration contrôlée est d'abord réalisé à l'aide d'une méthode à contre-réaction. Lorsque la conductance du nanofil atteind une valeur de quelques kilo-Ohm. On laisse ensuite évoluer la jonction qui, du fait de l'instabilité de la nanoconstriction, va se rompre naturellement. On obtient ainsi un gap de quelques nanomètres. La durée d'une telle procédure varie d'un échantillon à l'autres : de quelques minutes à plusieurs heures.

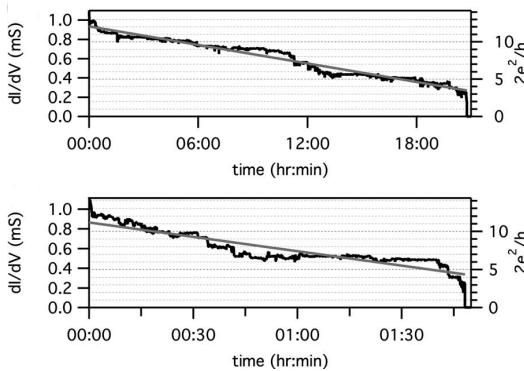


FIGURE 1.8 – Evolution de la conductance de deux nanofils au court du temps lors d'une procédure d'électromigration à cassure spontanée. Extrait de [18].

1.4.3 Notre technique

Notre technique de fabrication a été développé à partir des travaux de Park *et al.* [14] puis améliorer en s'inspirant de travaux ultérieurs.

Afin d'augmenter le rendement de la méthode et la qualité des interstices obtenus, il a fallu apporter quelques modifications. Tout d'abord, la résistance en série avec la jonction à été diminuée au maximum [2, 19, 20]. Cela permet de limiter la puissance dissipée au niveau de la jonction et donc de mieux contrôler l'électromigration.

L'échelle de temps de l'électromigration est du domaine de la centaine de μs [18]. Afin de pouvoir contrôler parfaitement le déroulement du phénomène, il faut être capable d'agir sur ce dernier en un laps de temps du même ordre. Ceci n'est possible que si la procédure d'électromigration se fait à l'aide d'une électronique en temps réel. Nous avons pour cela utilisé un ADWin contrôlé par le programme NanoQT, développé au sein du groupe. Grâce à ce dispositif, l'électromigration peut être détectée et la tension au borne de la jonction ramenée à zéro dans un intervalle de $10 \mu s$.

De plus, l'étape d'électromigration se fait à $4 K$ et sous atmosphère hélium ce qui prévient la contamination de l'interstice. De plus, nous pouvons analyser le dispositif directement après la procédure.

1.5 Fabrication d'un transistor à molécule unique

Pour obtenir un transistor moléculaire, il faut procéder selon trois étapes. La première consiste en la réalisation d'un nanofil reposant sur une grille. On dépose ensuite les molécules sur la puce avant de la micro-souder et de la disposer dans un frigo à dilution. Enfin, on procède à l'électromigration. Dans la partie précédente, nous avons abordé l'étape un et trois. Nous allons maintenant voir comment on dépose les molécules ainsi que la technique de caractérisation électrique des interstices.

1.5.1 Dépôt des molécules

Les cristaux de $TbPc_2$ sont dissous dans du dichlorométhane à la concentration $10^{-6} mol.L^{-1}$. Une goutte de la solution obtenue est ensuite déposé sur l'échantillon et séché par un flux d'azote. L'échantillon obtenu est ensuite microsoudé sur l'échantillon, disposé dans un frigo à dilution et électromigré

à basse température. Les jonctions obtenues (jusqu'à 12 par échantillons) sont ensuite analysé en transport.

1.5.2 Les trois régimes de transport

La première analyse généralement effectué consiste à mesurer la conductance du système en fonction de la tension de grille, pour une tension source-drain nulle. La présence d'un objet nanométrique fait apparaître dans ce genre de mesures un ou plusieurs pics que l'on nomme pic de Coulomb (cf annexe sur le transport mésoscopique) [21, 22, 23]. Si cette première analyse se révèle concluante, on procède à une étude plus fine à l'aide d'un diagramme de Coulomb dans lequel on trace la conductance différentielle en fonction de la tension de grille V_g et la tension source-drain V_{ds} . On peut alors identifié trois régimes en fonction du couplage électronique entre l'objet situé dans l'interstice et les électrodes.

Couplage faible

Dans ce régime, le couplage aux électrodes est faible et la conductance mesuré est largement inférieur au quantum de conductance G_0 ($\sim 72 \text{ } mS$). Cela se traduit par la présence de diamant de Coulomb au bord très bien défini comme le montre la Fig???. Ce faible couplage ne perturbe que légèrement les niveaux de l'îlot. Il conserver donc leur élargissement intrinsèque, d'où la finesse des bords de diamant. Dans cette configuration, seul le tunneling séquentiel est responsable du courant circulant à travers le système. Si l'on désire explorer les propriété intrinsèque de l'îlot, le couplage faible est le régime idéal.

Bibliographie

- [1] Sujit S. Datta, Douglas R. Strachan, and A. T. Charlie Johnson. Gate coupling to nanoscale electronics. *Phys. Rev. B*, 79(20) :205404–, May 2009.
- [2] Herre S. J. van der Zant, Yann-Vai Kervennic, Menno Poot, Kevin O'Neill, Zeger de Groot, Jos M. Thijssen, Hubert B. Heersche, Nicolai Stuhr-Hansen, Thomas Bjornholm, Daniel Vanmaekelbergh, Cornelis A. van Walree, and Leonardus W. Jenneskens. Molecular three-terminal devices : fabrication and measurements. *Faraday Discuss.*, 131 :347–356, 2006.
- [3] M. J. Biercuk, D. J. Monsma, C. M. Marcus, J. S. Becker, and R. G. Gordon. Low-temperature atomic-layer-deposition lift-off method for microelectronic and nanoelectronic applications. *Appl. Phys. Lett.*, 83(12) :2405–2407, September 2003.
- [4] Carina Fasth, Andreas Fuhrer, Mikael T. Björk, and Lars Samuelson. Tunable double quantum dots in inas nanowires defined by local gate electrodes. *Nano Lett.*, 5(7) :1487–1490, June 2005.
- [5] Ali Javey, Hyoungsub Kim, Markus Brink, Qian Wang, Ant Ural, Jing Guo, Paul McIntyre, Paul McEuen, Mark Lundstrom, and Hongjie Dai. High-[kappa] dielectrics for advanced carbon-nanotube transistors and logic gates. *Nat Mater*, 1(4) :241–246, December 2002.
- [6] Renaud Leturcq, Christoph Stampfer, Kevin Inderbitzin, Lukas Durrer, Christofer Hierold, Eros Mariani, Maximilian G. Schultz, Felix von Oppen, and Klaus Ensslin. Franck-condon blockade in suspended carbon nanotube quantum dots. *Nat Phys*, 5(5) :327–331, May 2009.

- [7] A. Mangin, A. Anthore, M. L. Della Rocca, E. Boulat, and P. Lafarge. Transport through metallic nanogaps in an in-plane three-terminal geometry. *J. Appl. Phys.*, 105(1) :014313–5, January 2009.
- [8] Hongkun Park, Jiwoong Park, Andrew K. L. Lim, Erik H. Anderson, A. Paul Alivisatos, and Paul L. McEuen. Nanomechanical oscillations in a single-C₆₀ transistor. *Nature*, 407(6800) :57–60, September 2000.
- [9] Markku Leskelä and Mikko Ritala. Atomic layer deposition chemistry : Recent developments and future challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 42(45) :5548–5554, 2003.
- [10] M. Gerardin. *Compte Rendu de l'Academie des Sciences*, 53 :727, 1861.
- [11] I. A. Blech and E. S. Meieran. Direct transmission electron microscope observation of electrotransport in aluminum thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 11(8) :263–266, October 1967.
- [12] J.R. Black. Electromigration failure modes in aluminum metallization for semiconductor devices. *Proceedings of the IEEE*, 57(9) :1587–1594, 1969.
- [13] P S Ho and T Kwok. Electromigration in metals. *Reports on Progress in Physics*, 52(3) :301–, 1989.
- [14] Hongkun Park, Andrew K. L. Lim, A. Paul Alivisatos, Jiwoong Park, and Paul L. McEuen. Fabrication of metallic electrodes with nanometer separation by electromigration. *Appl. Phys. Lett.*, 75(2) :301–303, July 1999.
- [15] Stéphanie Girod. *Vers la mesure de nano-objets uniques, réalisation de nanogaps par électromigration*. PhD thesis, Institut Jean Lamour, Université de Nancy, 2012.
- [16] D. R. Strachan, D. E. Smith, D. E. Johnston, T.-H. Park, Michael J. Therien, D. A. Bonnell, and A. T. Johnson. Controlled fabrication of nanogaps in ambient environment for molecular electronics. *Appl. Phys. Lett.*, 86(4) :043109–3, January 2005.
- [17] G. Esen and M. S. Fuhrer. Temperature control of electromigration to form gold nanogap junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 87(26) :263101–3, December 2005.

- [18] K. O'Neill, E. A. Osorio, and H. S. J. van der Zant. Self-breaking in planar few-atom au constrictions for nanometer-spaced electrodes. *Appl. Phys. Lett.*, 90(13) :133109–3, March 2007.
- [19] M. L. Trouwborst, S. J. van der Molen, and B. J. van Wees. The role of joule heating in the formation of nanogaps by electromigration, 2006.
- [20] Thiti Taychatanapat, Kirill I. Bolotin, Ferdinand Kuemmeth, and Daniel C. Ralph. Imaging electromigration during the formation of break junctions. *Nano Lett.*, 7(3) :652–656, February 2007.
- [21] C. W. J. Beenakker. Theory of coulomb-blockade oscillations in the conductance of a quantum dot. *Phys. Rev. B*, 44(4) :1646–1656, July 1991.
- [22] W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven. Electron transport through double quantum dots. *Rev. Mod. Phys.*, 75(1) :1–22, December 2002.
- [23] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha, and L. M. K. Vandersypen. Spins in few-electron quantum dots. *Rev. Mod. Phys.*, 79(4) :1217–1265, October 2007.