

RAPPORT DE STAGE INDUSTRIEL
CARACTÉRISATION DE NANOFILS
SEMICONDUCTEURS (INAs) PAR
POMPAGE D'ÉLECTRONS

Nicolas PAILLET

FILIÈRE PNS 2014-2015

Stage réalisé en collaboration avec

GRENOBLE INP PHELMA

AALTO SCHOOL OF SCIENCE



Au sein du PICO GROUP



Sous la direction du Professeur Jukka PEKOLA

Table des matières

Introduction	4
1 Bibliographie	6
1.1 Supraconducteurs	6
1.2 Jonctions NISIN	6
1.3 Nanofils semiconducteurs	6
1.4 Pompage électronique	7
2 Techniques de fabrication de structures en salle blanche	8
2.1 Résines	8
2.2 EBL et développement	9
2.3 Evaporateur	12
2.4 Lift-off et SEM	12
3 Phase de tests	15
3.1 Processus de fabrication, influence des paramètres	15
3.2 Mesures	16
3.3 Interpretation / Conclusions	17
4 Nanofils	19
4.1 Fabrication	19
4.2 Caractérisation	19
4.3 Interpretations	19
5 Bilan	20
5.1 Autres tests à réaliser	20
5.2 Etude théorique poussée	20
5.3 Ouverture vers d'autres structures	20
Conclusion	21
A Structures de Copenhague	22
B Graphes	24

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Jukka Pekola pour avoir accepté ma demande d'intégrer son équipe. Bien sûr cela n'aurait pas été possible sans l'aide du Docteur Clemens Winckelmann qui m'a fourni ses coordonnées. De plus, je souhaite remercier l'ensemble du PICO Group pour m'avoir si bien accueilli tout au long de ce séjour, et plus particulièrement le Docteur Mathieu Taupin, qui m'a intégré au sein de son projet et m'a fourni nombres de conseils en salle blanche. Enfin, je souhaite remercier Grenoble-INP PHELMA qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce stage.

Le PICO Group

Le PICO Group est une équipe de recherche qui exerce sous la tutelle de l'Université d'Aalto. Elle possède ses locaux au sein de la plateforme MICRONOVA situé sur le campus d'Aalto à Espoo (Finlande) : Otaniemi, qui regroupe l'ensemble des activités scientifiques de l'Université. L'équipe est actuellement composé de dix-neuf personnes, dont le Professeur Jukka PEKOLA, qui dirige le groupe et le Docteur Matthias MESCHKE qui est responsable des appareils. L'équipe est ensuite composée de cinq docteurs, sept diplômés actuellement en thèse ainsi que cinq étudiants accueillis pour l'été.

Les sujets de recherches étudiés par le groupe sont divers mais se basent tous sur les propriétés des supraconducteurs. Les principaux sujets d'études sont liés à la thermodynamique quantique et au transport d'électrons au sein de structures quantiques. Ainsi, certains chercheurs sont focalisés sur une dimension théorique : statistiques d'échanges thermiques entre deux résistances[2], par exemple, tandis que d'autres abordent davantage une partie pratique : réalisation de structures afin d'en déterminer les propriétés, refroidissement d'électrons... De plus, le groupe est en étroite collaboration avec le centre de métrologie car l'un des principaux projet en cours est la redéfinition de l'Ampère[5], unité de mesure du courant électrique. Pour pouvoir couvrir l'ensemble de ces sujets, l'équipe a besoin de certains appareils.

Le groupe est également appelé Low Temperature Laboratory, car une grande partie des expériences réalisées sont faites à basse température. Ainsi, le groupe possède trois cryostats à dilution He_3/He_4 et un cryostat à dilution sèche (BlueFors). De plus, le bâtiment possède sa propre salle blanche afin de fabriquer les structures à étudier, avec notamment des Electron Beam Lithographier (EBL), Evaporateurs, Scanning Electron Microscope (SEM), Atomic Layer Deposition (ALD)...

L'université et le bâtiment fournissent ainsi toutes les ressources nécessaires aux recherches effectuées au sein du groupe.

Introduction

Nanofil... un terme très à la mode dans le milieu scientifique de la recherche à l'heure actuelle. Un nanofil est une structure de taille nanométrique et généralement de forme cylindrique ou du moins prismatique. Les propriétés qui découlent de cette forme particulière et de cette taille caractéristique trouvent majoritairement leur origine dans la théorie quantique, c'est pour cela que ces structures intéressent tant. Elle permettent de mieux comprendre certains phénomènes quantiques mal compris, et même d'utiliser les propriétés quantiques de la matière ou obtenir des fonctions électroniques, notamment. La recherche sur les nanofils aura sans doute une application dans le monde pratique dans quelques années voire décennies mais pour cela elle doit davantage progresser. C'est ainsi que nous nous proposons d'étudier des propriétés de supraconduction induite au sein de nanofils semiconducteurs.

Une équipe de Copenhague a mis au point une méthode de croissance de nanofils d'InAs/Al par épitaxie[3] (conservation des directions cristallographiques). L'InAs est un matériau semiconducteur alors que l'Aluminium est supraconducteur à basse température ($T_c = 1.2K$), des phénomènes de supraconductivité de proximité induite vont intervenir au sein du nanofil. C'est ce phénomène que nous souhaiterions observer pour vérifier s'il concorde avec la théorie, qu'il faudra préalablement étudier et comprendre (Chapitre 1). Ainsi, l'équipe a également réalisé des structures en intégrant ces nanofils, cependant ces structures possèdent des éléments parasites qui ne permettent pas de caractériser correctement les nanofils : des quantum dots apparaissent aux extrémités (Voir Annexe Fig.A.1). Pour annuler leurs effets, il est possible de polariser ces zones en appliquant une forte tension via une capacité (Voir Annexe Fig.A.2). Cependant, il est impossible de savoir dans quelle mesure ces capacités se couplent à celles permettant les vraies mesures. Pour une meilleure caractérisation, il faudrait parvenir à isoler les nanofils et à les intégrer à une structure propre. Le but de ce projet est alors de mettre en place un processus de salle blanche visant à intégrer les nanofils réalisés par l'équipe du Dr. Krogstrup puis de les caractériser par pompage d'électrons.

Cependant, il est totalement impossible de se lancer directement dans l'intégration des nanofils sans avoir préalablement établi un processus potentiellement fonctionnel. Pour cela, il nous faudra une bonne connaissance des appareils disponibles en salle blanche, pour distinguer ce qui est réalisable de ce qui ne l'est pas (Chapitre 2).

De plus, le fait d'avoir un processus viable ne suffit pas, il faut connaître les différents paramètres qui entrent en jeu pour la réalisation de la structure. Pour cela, il est impératif de se livrer à un certain nombre de tests sur des structures plus simples notamment pour valider l'efficacité des certaines étapes en fonction des paramètres appliqués. Ainsi, la réalisation des tests permettra de mieux connaître les appareils de salle blanche, de nous familiariser avec ceux-ci, mais constituera aussi

une base solide sur laquelle s'appuyer pour commencer l'intégration des nanofils car elle fournira des informations importantes concernant les paramètres à utiliser dans chaque situation (Chapitre 3).

Munis de ces outils, nous pouvons nous consacrer au but principal de ce projet à savoir l'intégration, puis la caractérisation des nanofils. Une fois qu'au vu des différents tests réalisés, le processus de fabrication semble opérationnel, il nous est possible de le mettre en place. Cependant, comme les structures sont différentes, il faut s'attendre à certains ajustements des paramètres pour obtenir ce que nous souhaitons. Ainsi, une fois les structures réalisées, nous pouvons commencer la caractérisation et les mesures (Chapitre 4).

Pour finir, la recherche ne s'arrête pas ici, il reste encore beaucoup à faire, en fonction des résultats obtenus et de leur validité vis-à-vis de la théorie, il est possible d'aller plus loin et d'ouvrir le sujet à d'autres perspectives. L'étude des phénomènes de Fermions de Majorana au sein des interfaces de ces nanofils en est un par exemple. La recherche n'est pas figée, et il est toujours possible d'aller plus loin et d'ouvrir la porte à des applications pratiques et/ou à de la recherche plus fondamentale (Chapitre 5).

Chapitre 1

Bibliographie

Avant de commencer à réaliser des structures, il peut être utile de comprendre leur comportement et les phénomènes physiques et quantiques qui peuvent intervenir au sein de celles-ci. Dans ce chapitre, nous nous attacherons à présenter succinctement l'étude bibliographique réalisée durant le projet afin de comprendre le contexte théorique d'étude.

1.1 Supraconducteurs

Dans le cadre du projet de recherche effectué en 2^{ème} année d'école d'ingénieur à Grenoble-INP PHELMMA, j'ai travaillé avec mon groupe sur les supraconducteurs, ce qui m'a permis de mieux comprendre d'emblée le sujet. Ce qui suit est donc un résumé succinct de la théorie qui décrit les supraconducteurs.

Les supraconducteurs sont des matériaux sans résistance électrique et qui excluent le champ magnétique. Ce phénomène n'est observable, pour la plupart des matériaux (en particulier les métaux) qu'à basse température. Il provient de l'appariement des électrons libres du métal en paires de Cooper. Ces paires sont des quasiparticules issues de l'interaction entre les électrons et la matrice ionique qui les entoure, et en particulier les phonons. Les paires de Cooper, même si composées d'électrons ne sont plus des fermions mais des bosons, qui respectent la statistique de Bose-Einstein elles forment ainsi un condensat au sein du matériau. Elles modifient également la densité d'états électroniques. Celle-ci voit apparaître un gap, appelé gap supraconducteur entouré de deux pics en théorie infinis à 0K.

1.2 Jonctions NISIN

Dans le cadre des jonctions Josephson, il ne faut pas considérer la supra "bulk" mais il faut prendre en compte la dimension des objets et la quantification induite par la réduction de la dimension. On parlera ainsi de diamant de Coulomb et d'états liés d'Andreev. [1]

1.3 Nanofils semiconducteurs

La physique des nanofils est encore différente de celle des jonctions précédentes. En effet, le projet est basé sur l'utilisation de nanofils d'InAs, qui est semiconducteur. Cependant, celui-ci l'équipe de Copenhague le fait croître épitaxialement à de

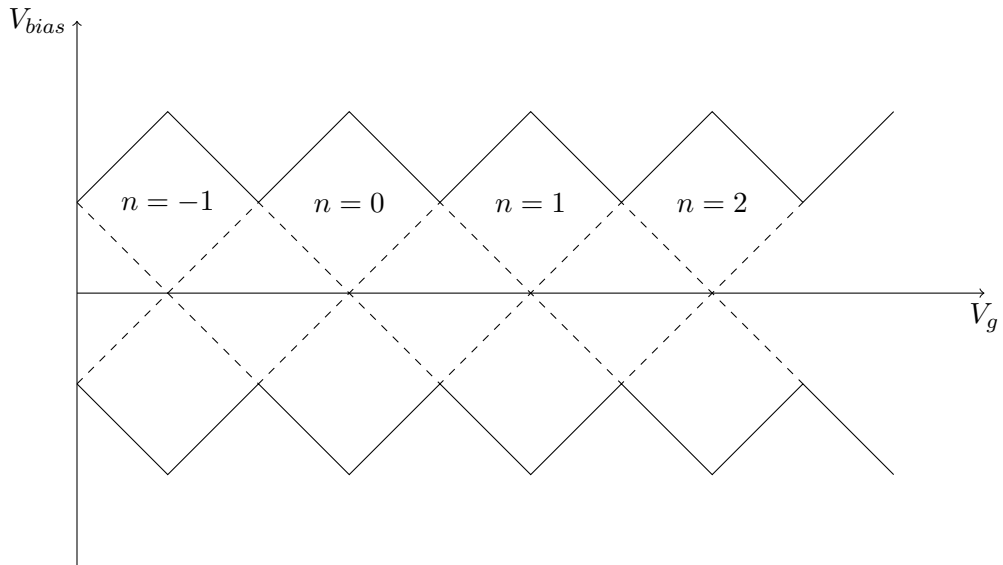


FIGURE 1.1 – Blocage de coulomb dans un supraconducteur et principe du pompage d'électrons

l'aluminium. Il subit ainsi une supraconductivité de proximité induite par celui-ci. C'est ce phénomène que l'on se propose d'étudier.

1.4 Pompage électronique

A partir des coulomb diamonds, haute fréquence, observation d'un courant d'un seul électron

Chapitre 2

Techniques de fabrication de structures en salle blanche

Pour réaliser la structure que l'on souhaite à partir des nanofils, il va falloir utiliser différentes méthodes de salle blanche. De plus, avant même de commencer à travailler sur de vrais échantillons, il est important de réaliser des tests avec des structures de test, pour savoir si le processus que l'on veut mettre en place est viable.

2.1 Résines

Point central de la fabrication, les résines permettent de créer le dessin que l'on souhaite obtenir sur le wafer.

2.1.1 De la théorie...

Les résines que nous allons utiliser sont composées de matériaux polymères : le Polyméthyl Methacrilate (PMMA) (Fig. 2.1) et copolymères Methyl Methacrilate (MMA).

Il existe bien sûr d'autres types de résines, notamment sensibles à la lumière (photorésines) davantage utilisées pour les processus de fabrication impliquant des semiconducteurs.

Les résines que nous utilisons sont sensibles aux électrons : Envoyer un faisceau d'électrons de haute énergie (Voir 2.2.1) impliquera des modifications structurales. Pour le PMMA par exemple, le faisceau d'électrons brise le polymère en monomères

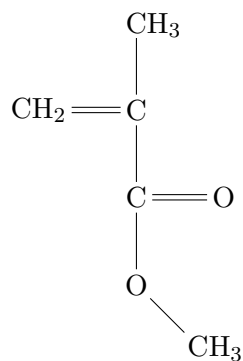


FIGURE 2.1 – Structure chimique du MMA, le monomère qui compose le PMMA

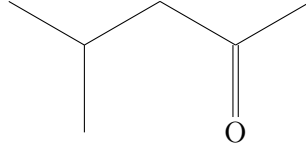


FIGURE 2.2 – Structure chimique du MethylIsoButylKetone (MIBK)

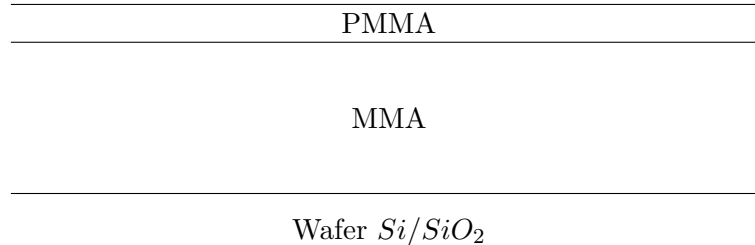


FIGURE 2.3 – Vue en coupe du wafer après dépôt de résine

beaucoup plus solubles dans le Methyl IsoButyl Ketone (MIBK) (Fig. 2.2). Les résines sont liquides et déposées au centre du wafer. On place ensuite celui-ci dans un spinner, qui va tourner et répartir la résine de manière uniforme sur le wafer.

2.1.2 ...A la pratique

En pratique, nous utilisons deux types de résines différentes : D'abord une couche, relativement épaisse de MMA, puis une couche fine de PMMA. Les résines sont liquides et déposées à la surface du wafer de Silicium celui-ci est ensuite placé sur un spinner, qui va le faire tourner et uniformiser l'épaisseur des couches de résine. Comme on souhaite une épaisseur plus importante de MMA, il faudra répéter cette étape plusieurs fois. Il faut ensuite cuire les résines pour les rendre solide. Enfin, on se retrouve avec ce type de vue en coupe (Fig. 2.3). Le wafer est ensuite exposé à un faisceau d'électrons dans l'Electron Beam Lithographier.

2.2 EBL et développement

2.2.1 Fonctionnement de l'EBL

L'Electron Beam Lithographier est un appareil qui sert à dessiner les pattern au sein de la résine, il permet ainsi de sélectionner les zones où il y aura de la matière par la suite[4]. Il consiste simplement en l'envoi d'un faisceau d'électrons sur le wafer. Son schéma fonctionnel est représenté en Fig. 2.4. Il consiste principalement en la focalisation d'un faisceau d'électrons sur des zones précises. La résolution est ajustable pour chaque partie du pattern. En effet, certaines parties (pad de soudure par exemple) ne nécessitent pas d'une grande précision, et avoir un faisceau précis prend plus de temps. Ainsi, nous utiliserons de bonnes résolutions uniquement pour les jonctions que quelques μm . Un autre paramètre ajustable est la dose d'électrons envoyée qui va influencer sur la qualité des undercuts notamment. Bien sûr, il faut qu'elle soit en adéquation avec la taille des structures que l'on veut réaliser. En effet, utiliser une dose importante sur un pattern petit peut nuire à la qualité globale de la structure. Ainsi, l'EBL envoie un faisceau d'électrons sur la résine. Ces électrons possèdent une énergie trop importante pour interagir avec les liaisons, ce-

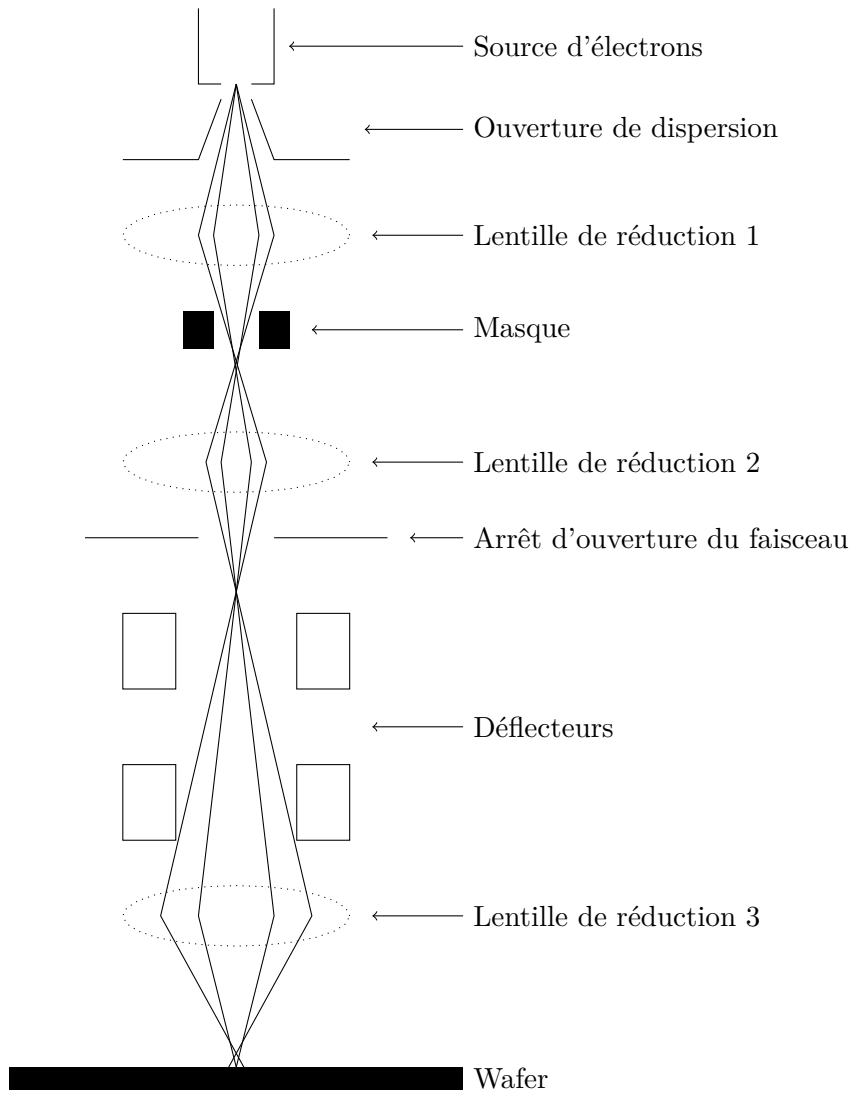


FIGURE 2.4 – Schéma fonctionnel simplifié de l'EBL

pendant lorsqu'ils entrent en contact avec de la matière, ils provoquent la formation d'électrons secondaires qui, eux, possèdent l'énergie adéquate pour briser les liaisons au sein du polymère. Si les électrons primaires possèdent une si haute énergie, c'est pour pénétrer profondément au sein du polymère et ainsi multiplier la formation d'électrons secondaires qui vont fragiliser la résine.

2.2.2 Tracé du pattern

Le faisceau peut être contrôlé informatiquement, via logiciel, on crée notre pattern et on peut ainsi dessiner directement sur le wafer des pattern nanoscopiques. Le faisceau d'électrons altère la résine dans les zones souhaitées, comme le montre la vue en coupe en Fig. 2.6

2.2.3 Développement

Le développement consiste au retrait de la résine exposée à l'EBL. Réalisé par une succession de réactions chimiques, on perce tout d'abord le PMMA avant d'attaquer



FIGURE 2.5 – Photographie de l'Electron Beam Lithographier de la Salle Blanche Nanofab

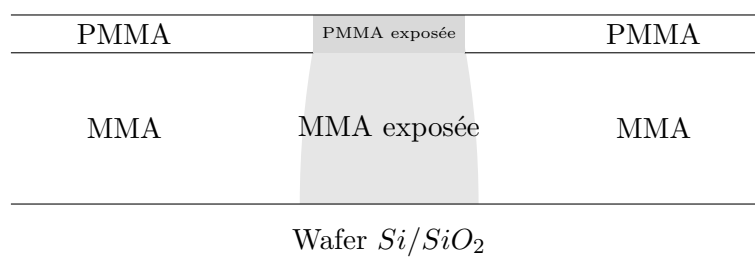


FIGURE 2.6 – Vue en coupe du wafer après passage dans l'EBL

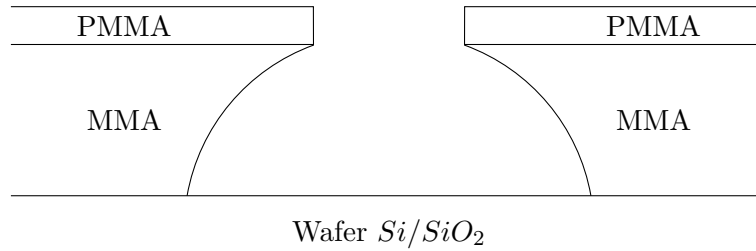


FIGURE 2.7 – Vue en coupe après le développement

le MMA pour réaliser ce qu'on appelle des undercut, le MMA étant plus sensible, il est plus atteint et on forme un cône sous le PMMA où la structure prendra place. Les deux résines réagissent au MIBK, qui peut les dissoudre. En effet, en attendant suffisamment longtemps, la résine disparaît complètement si elle reste dans la solution de MIBK. En revanche, la partie exposée au faisceau d'électrons est bien plus sensible. Les liaisons étant déjà fragilisées, il suffit de très peu de temps pour retirer la partie souhaitée. À ce moment, la résine de la zone exposée a disparu. Cependant, ce n'est pas suffisant, on souhaite créer une surface accessible / ! A CHANGER plus grande pour déposer selon un angle précis. C'est le rôle du méthyl glycol. Ce dernier va attaquer sélectivement le MMA, et créer ce qu'on appelle des undercuts : une partie du MMA sous le PMMA encore existant est rongée, ce qui crée un dôme sous la PMMA (Fig. 2.7).

2.3 Evaporateur

2.3.1 Fonctionnement de l'évaporateur

L'évaporateur permet de déposer une fine couche uniforme de métal à l'intérieur des undercuts fraîchement développées. Un filament est soumis à un fort courant et une forte tension, il émet des photons qui vont faire fondre le métal puis en arracher des atomes. Ces atomes se dispersent dans la chambre, et comme le libre parcours moyen est grand, finissent par se déposer uniformément partout. Il y a des capteurs d'épaisseur permettant de fixer l'épaisseur que l'on souhaite atteindre. L'évaporateur possède une valve pour l'oxygène, cela permet d'oxyder les métaux si on souhaite réaliser des jonctions avec isolant par exemple. Il y a également une valve pour injecter de l'argon et réaliser ainsi un plasma au sein de la chambre. Ce plasma possède plusieurs utilités : simplifier le lift-off en fragilisant légèrement la résine. Nous l'avons principalement utilisé pour réaliser du plasma etching : le retrait de matière par plasma. Cela fait partie des tests réalisés en vue d'intégrer les nanofils à une structure permettant leur caractérisation.

2.4 Lift-off et SEM

2.4.1 Le Lift-off : retrait de la résine

Le métal s'est déposé partout suite à l'évaporation, cependant, dans la plupart des endroits, il est sur la résine, il nous suffit ainsi de retirer celle-ci pour avoir nos structures. C'est le rôle de l'acétone qui va dissoudre totalement la résine et ainsi décoller du wafer le métal déposé par évaporation en dehors des zones souhaitées,

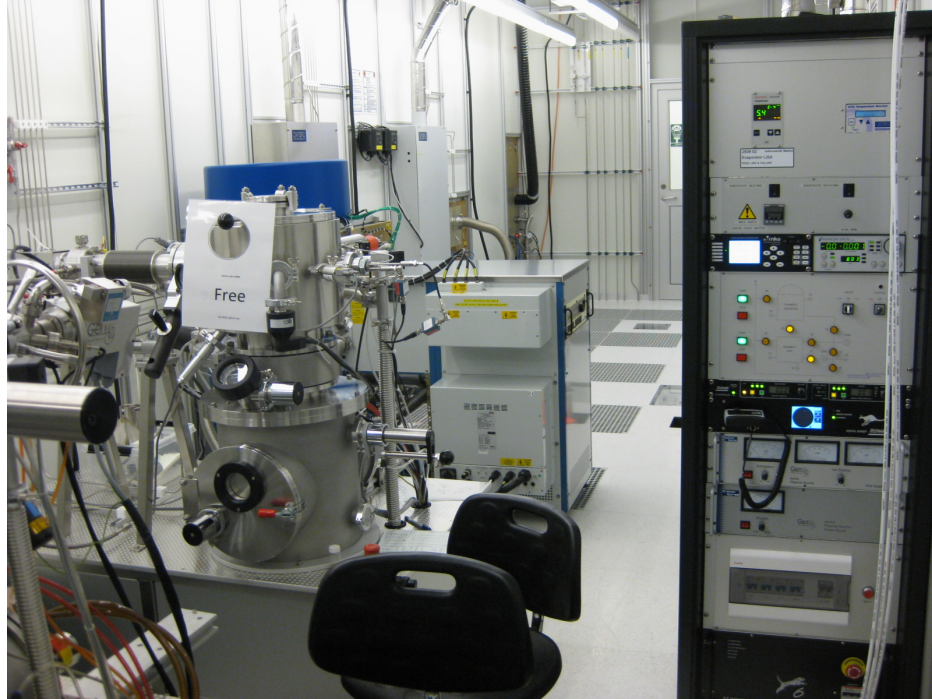


FIGURE 2.8 – Photographie de l'évaporateur LISA utilisé pour réaliser les structures

cette étape s'appelle lift-off.

2.4.2 Fonctionnement du SEM

Le fonctionnement du SEM est très similaire à celui de l'EBL : on envoie un faisceau d'électrons sur la matière, sauf que cette fois-ci, on ne cherche pas à fragiliser la matière mais à observer la dispersion des électrons dans les échantillons. Chaque matériau ne disperse pas les électrons de la même manière (en particulier, isolant et métal), on peut ainsi observer un contraste entre de la matière isolante et du métal. De plus, le SEM possède un mode "électrons secondaires" qui permet de repérer les électrons créés au sein du matériau. Ces électrons sont différents selon l'élément chimique qui compose le matériau. Ce mode permet de distinguer le cuivre de l'aluminium par exemple. Cependant, ces électrons créés étant peu nombreux, ce mode est plus soumis au bruit et beaucoup plus sombre.

2.4.3 Observation d'échantillons

Avant de pouvoir observer distinctement les échantillons, un certain nombre de réglages sont à faire, ressemblant beaucoup à des réglages d'optique : focale, stigmatisme, ouverture... Lorsque l'on réalise les réglages, on choisira un endroit exempt d'échantillons sur le wafer car le SEM envoie des électrons dans la matière et donc la charge. En choisissant un autre endroit (contenant tout de même de la matière autre que le wafer), on évite de charger nos échantillons. On commence par régler la focale et on tente de faire le point sur l'échantillon. Puis, on règle le stigmatisme en fonction de cette focale. On cherche à obtenir l'image la plus nette possible avant de passer à l'observation des échantillons et la prise d'images comme en Fig.2.10.



FIGURE 2.9 – Photographie du Scanning Electron Microscope utilisé pour observer les structures réalisées

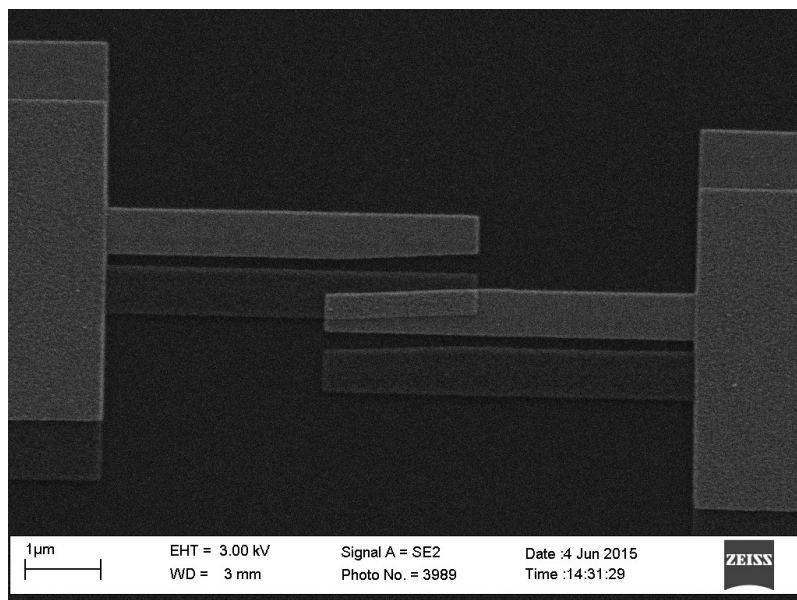


FIGURE 2.10 – Exemple d'une structure observée au SEM

Chapitre 3

Phase de tests

Nous souhaitons réaliser quelque chose de nouveau et d'assez lourd à mettre en place, nous souhaitons d'abord savoir quels paramètres utiliser pour avoir ce que l'on souhaite. Nous allons réaliser des structures simples à réaliser et à mesurer pour réaliser ces tests. Notre but est de réaliser une jonction entre Cuivre et Aluminium, avec une couche d'oxyde d'Aluminium entre les deux. En effet, les nanofils vont s'oxyder sur durant leur voyage depuis Copenhague, et nous souhaitons savoir comment se débarrasser de cette couche d'oxyde.

3.1 Processus de fabrication, influence des paramètres

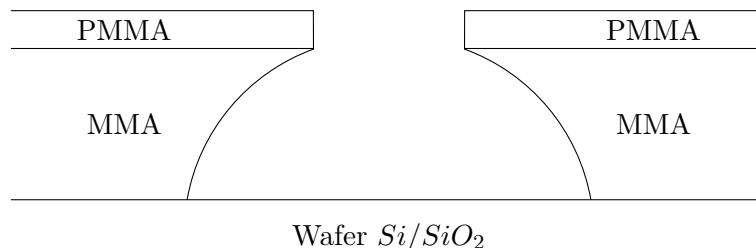
La fabrication d'échantillon se déroule en plusieurs étapes, chacune apportant son lot de paramètres pouvant influencer de manière, comme nous le verrons, plus ou moins importante.

- **Dépot de résine** Vitesse de rotation, température de cuisson
- **EBL** Dose d'électrons, résolution, énergie, forme
- **Développement** Durée d'immersion dans MIBK et MethyGlycol
- **Dépot d'Aluminium** Angle d'évaporation
- **Oxydation** Pression et durée
- **Plasma Etching** Pression d'Argon, durée, Voltage, énergie des ions
- **Dépot de Cuivre** Angle d'évaporation
- **Lift-off**
- **SEM**

Les paramètres que nous ferons varier au cours de ces tests seront : la forme du pattern (différentes surfaces de jonction : 0.5, 1, 1.5 et $2\mu m^2$), la dose d'électrons de l'EBL (de 2000 à $3000\mu C/cm^2$ par pas de 250), et la durée du plasma pour connaître son effet sur la jonction.

3.1.1 Temps de développement

Le temps de développement, c'est-à-dire le temps pendant lequel la résine est placée dans le MIBK et le Methyglycol, influe globalement sur la qualité des undercut. Pour le MIBK, il faut un temps suffisant pour que tout le PMMA et le MMA exposé soit dissout, mais pas trop long pour éviter d'agrandir le pattern. De même



pour le Methylglycol, il faut un temps suffisant pour avoir des undercuts suffisamment grandes (ie. que le métal ne s'évapore pas sur le MMA.) mais pas trop long pour éviter que le PMMA ne s'affaisse si trop de MMA est dissout. Cette étape a été réalisée avant mon arrivée des valeurs qui fonctionnaient ont été trouvées, je ne m'étendrais donc pas sur cette partie, cependant c'est un paramètre important à prendre en compte, c'est pour cela que je le mentionne.

3.1.2 Angles d'évaporation

A partir du pattern, toutes les surfaces où la résine a été retirée vont être recouvertes de métal. Ainsi, il faut faire attention à l'angle avec lequel on évapore sinon il n'y aura pas de jonction. Le docteur Taupin avait déterminé $+14^\circ$ et -14° comme des angles fonctionnels pour l'évaporation. Cependant, en regardant les images SEM, on se rend compte que la surface de la jonction n'est pas optimale. J'ai donc réalisé quelques calculs pour déterminer un meilleur angle.

3.1.3 Durée du plasma

Un but annexe que nous nous sommes fixé est de caractériser le plasma, et notamment son utilisation en gravure. D'ordinaire utilisé pour faciliter le lift-off, nous utilisons ici le plasma pour graver l'oxyde d'aluminium. Ainsi, la durée d'exposition au plasma ainsi que l'énergie des ions sont des paramètres importants.

Détermine la quantité d'Al qui sera gravée. On oxyde fortement l'Al avant de rogner l'oxyde pour revenir en clean contact. En comparant les résistances obtenues à celle sans plasma, on peut déterminer la quantité d' Al_2O_3 retirée.

3.2 Mesures

3.2.1 Méthode de mesures

On réalise des mesures 4 fils sur les jonctions afin de s'affranchir des résistances parasites qui pourraient intervenir. En faisant cela on ne mesure que la résistance de la jonction. Le schéma permettant une telle mesure est le suivant :

Par la suite, j'ai réalisé des structures à 4 pads de mesures, j'ai donc utilisé une probestation, bien plus adaptée à la réalisation de mesures rapides.

3.2.2 Résultats obtenus

Les premiers tests réalisés ont été peu rigoureux dans leur manière d'être abordés : échantillons différents, manque de paramètres pris en compte, structures pas adaptées. Ainsi, nous avons mis en place une autre série de tests, plus systématique, et prenant en compte un plus grand nombre de paramètres. Nous avons réalisé

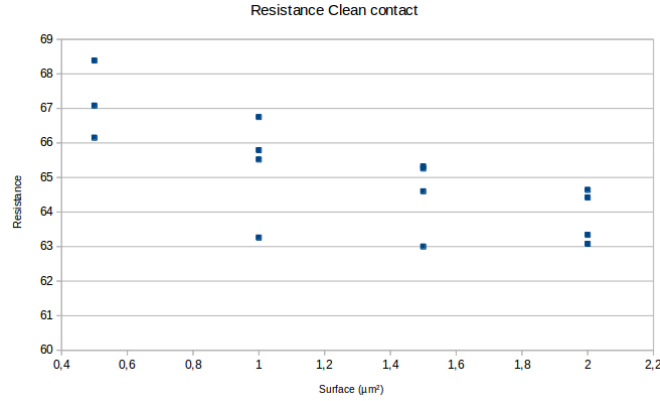


FIGURE 3.1 – Résistance de la jonction Al/Cu en fonction de la surface de la jonction

plusieurs séries de mesures avec des paramètres différents pour tenter de caractériser le plasma de l'évaporateur. La première étape fut de réaliser une jonction $AlCu$ et de mesurer sa résistance. Celle-ci constitue la base de toutes nos mesures. En la retirant, on peut directement associer la résistance résiduelle à l'épaisseur d'oxyde restant, ou bien aux détériorations provoquées par le plasma.

Sur la Figure 3.1, on remarque que la résistance dépend peu de la surface de la jonction. C'est normal car il s'agit d'un contact propre, c'est à dire un contact entre deux métaux. Ainsi la résistance vaut

$$R = \frac{\sigma_{Cu}L}{S} + \frac{\sigma_{Al}L}{S}$$

Les résistances obtenues pour cet échantillon témoin permettront de connaître la résistance de la partie isolante en la soustrayant, donc l'épaisseur d'oxyde.

3.3 Interpretation / Conclusions

3.3.1 Influence de la durée du plasma

Nous avons pu déterminer comment la durée du plasma influait sur la résistance de la jonction à travers le graphe 3.2. Ceci nous renseigne directement sur l'épaisseur d'oxyde entre les deux métaux et nous permet de savoir quelle durée utiliser pour retirer l'oxyde sur les nanofils.

3.3.2 Influence de la position de l'échantillon

Le but secondaire de ces tests était de caractériser le plasma du LISA, l'appareil est relativement récent et on en connaît pas tout ces paramètres, cette partie a donc davantage un but communautaire. Le graphe 3.3 montre la résistance en fonction de la position de l'échantillon sur le porte-échantillon. On remarque que l'ensemble est relativement homogène, le plasma semble donc actif sur la totalité de la zone étudiée.

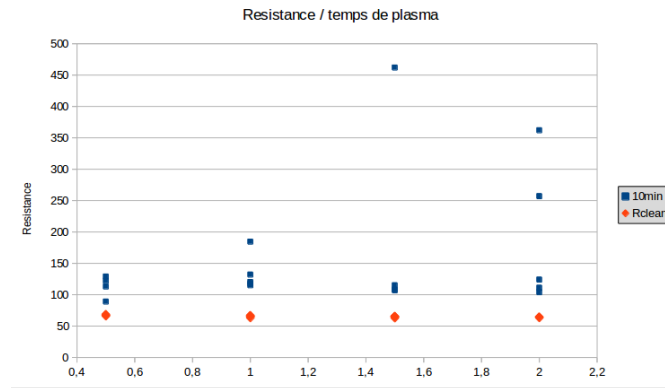


FIGURE 3.2 – Résistance mesurée en fonction de la surface de la jonction pour différentes durées de plasma

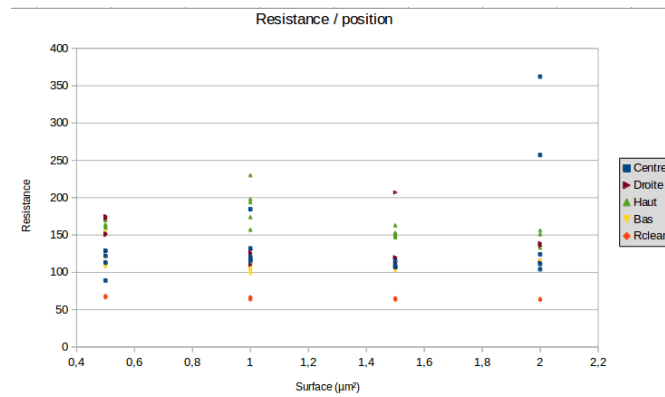


FIGURE 3.3 – Résistance mesurée en fonction de la surface de la jonction pour différentes positions sur le porte-échantillons

Chapitre 4

Nanofils

Muni de ces résultats sur les tests, nous pouvons nous atteler à réaliser le dispositif que nous souhaitons obtenir au départ.

4.1 Fabrication

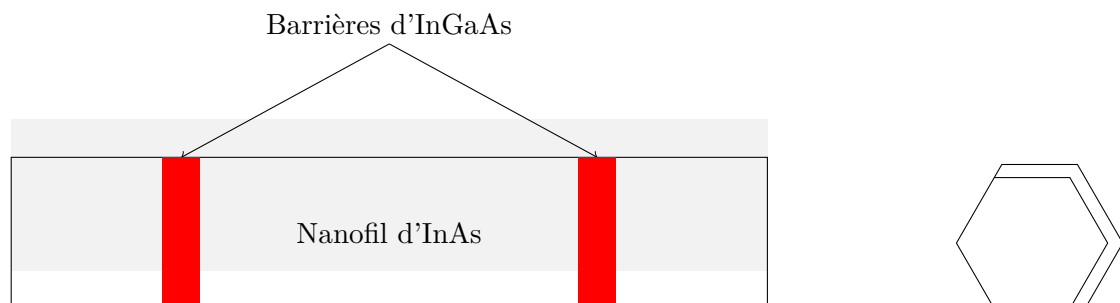
La principale question à se poser est comment, à partir des différentes techniques de salle blanche et des tests effectués, pouvons-nous intégrer les nanofils à une structure que l'on peut caractériser ? Il y a deux types de nanofils, nous détaillerons les différents Process Flow.

4.1.1 Jonctions NIS avec nanofils à barrière

Ici, le but est de réaliser une structure NIS avec les nanofils, le métal normal étant le lead en *Cu*, l'isolant étant la barrière d'*InGaAs* et le supraconducteur est le nanofil ainsi que le deuxième lead en *Al*.

4.2 Caractérisation

4.3 Interpretations



Chapitre 5

Bilan

Le projet ne s'arrete pas avec mon départ et il reste encore beaucoup à faire.

5.1 Autres tests à réaliser

5.2 Etude théorique poussée

5.3 Ouverture vers d'autres structures

Conclusion

Annexe A

Structures de Copenhague

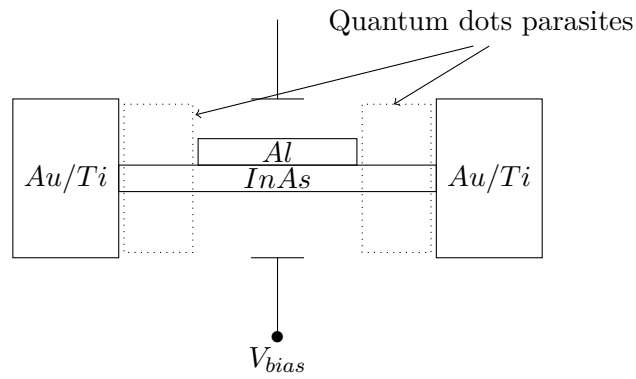


FIGURE A.1 – Schéma en coupe représentant la structure réalisée à Copenhague

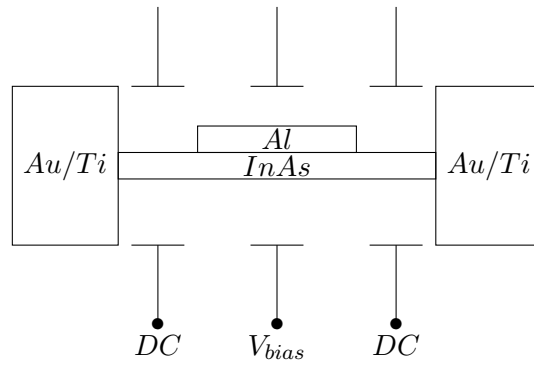


FIGURE A.2 – Schéma en coupe représentant la structure réalisée à Copenhague après ajout de capacités de polarisation de quantum dots

Annexe B

Graphes

Bibliographie

- [1] GFrancesco Giazotto, Tero T. Heikkilä, Arttu Luukanen, Alexander M. Savin, and Jukka P. Pekola. Opportunities for mesoscopies in thermometry and refrigeration: Physics and applications. *Rev. Mod. Phys*, 2006.
- [2] D. Gobulev and J.P. Pekola. Statistics of heat exchange between two resistors. 2015.
- [3] P. Krogstrup, N.L.B. Ziino, S.M. Albretch, M.H. Madsen, E. Johnson, J. Nygard C.M. Marcus, and T.S. Jespersen. Epitaxy of semiconductor-superconductor nanowires. *Nature Materials*, 2015.
- [4] M.A. Mohammad, M. Muhammad, S.K. Dew, and M. Stepanova. Fundamentals of Electron Beam Exposure and Development. *Springer*, 2012.
- [5] J.P. Pekola, O.P. Saira, V.F. Maisi, A. Kemppinen, and M. Möttönen. Single-electron current sources: Toward a refined definition of the ampere. *Review of Modern Physics* 85, 2013.