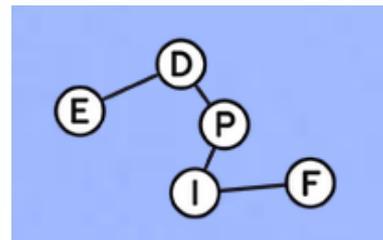




Comprendre le monde,  
construire l'avenir®



UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE 564 :  
PHYSIQUE EN ÎLE-DE-FRANCE

Laboratoire : Thomas Jefferson National Accelerator Facility, VA USA

## THÈSE DE DOCTORAT SYNTHÈSE EN FRANÇAIS

PHYSIQUE

par

**Anne-Marie VALENTE-FELICIANO**

**Développement de couches minces de matériaux  
SRF pour augmenter les performances des  
structures SRF au-delà du Nb massif**

Date de soutenance : 30/09/2014

Composition du jury :

Directeur de thèse :  
Co-directeur de thèse :

Claire ANTOINE  
Jean DELAYEN

Directeur de Recherche (CEA-IRFU)  
(Old Dominion University, VA USA)

Rapporteurs :

Pascal BRIOIS  
Vincenzo PALMIERI  
Marin CHABOT

Maître de Conférences (Université de Montbéliard)  
Professeur (INFN-LNL, Padova Italy)  
Directeur de Recherche CNRS/IN2P3 (IPN Orsay)

Examineurs :

# Développement de couches minces de matériaux SRF pour augmenter les performances des structures SRF au-delà du Nb massif

Anne-Marie Valente-Feliciano

## Introduction

La réduction du coût et de la consommation d'énergie de futurs accélérateurs de particules, à grande ou petite échelle, dépend du développement de nouveaux matériaux pour la surface active des structures supraconductrices en radiofréquence (SRF). Les propriétés SRF sont intrinsèquement un phénomène de surface vu que la RF ne pénètre que la profondeur de pénétration, typiquement entre 20 et 400 nm en fonction du matériau. Le plus grand potentiel d'amélioration des performances réside dans le développement de méthodes et de matériaux qui produisent la surface critique d'épaisseur nanométrique d'une manière délibérée et contrôlée.

Deux opportunités se présentent pour l'utilisation de couches minces de matériaux SRF en monocouche ou en structures multicouches supraconducteur-isolant-supraconducteur (SIS):

Les propriétés SRF étant de façon intrinsèque un phénomène de surface, lorsque d'autres procédés technologiques sont optimisés, la limite fondamentale à l'amplitude maximale de champ RF applicable est comprise comme étant le champ  $H_{c1}$  où le flux magnétique commence à pénétrer la surface. Le niobium (Nb) est le matériau le plus exploité pour les applications d'accélérateur SRF, pour lequel le champ  $H_{c1} \sim 170$  mT, ce qui donne un gradient de champ accélérateur maximum de moins de 50 MV/m. De nouveaux matériaux doivent donc être développés afin de repousser cette limite plus loin. Bien que de nombreux composés aient une température critique de transition supraconductrice ( $T_c$ ) supérieure, leur champ critique ( $H_{c1}$ ) est inférieur à celui de niobium.

Pour contourner ce problème, une approche basée sur des multicouches supraconducteur -isolant- supraconducteur (SIS) a été proposée par A. Gurevich pour atteindre une performance RF supérieure à celle du Nb massif. Dans ce système, le champ critique est augmenté et la pénétration des fluxons retardée en utilisant, au-dessus de la surface de Nb, une superposition de couches supraconductrices, d'épaisseur plus faible que la profondeur de pénétration  $\lambda$ , séparées par une couche diélectrique de quelques nanomètres d'épaisseur. Pour des matériaux supraconducteurs de type II, l'entrée des vortex se produit pour des champs

magnétiques au-dessus du champ magnétique de surface  $H_{c1}$ . L'idée clé de l'analyse de Gurevich est que l'entrée des vortex est retardée si l'épaisseur de la couche de surface ( $d$ ) du supraconducteur est inférieure à la profondeur de pénétration,  $\lambda$ , du matériau. La surcouche fournit un blindage magnétique de la surface de Nb sous-jacente avec un facteur d'atténuation  $\exp(d / \lambda_0)$ . La surface de Nb peut ainsi rester dans l'état Meissner à des champs beaucoup plus élevés que pour le Nb massif du fait de l'augmentation du champ  $H_{c1}$  parallèle dans une couche mince. Cela permettrait une amélioration des performances des cavités SRF en profitant des propriétés de matériaux supraconducteurs à  $T_c$  élevée, sans être limité par leur faible  $H_{c1}$ .

La connaissance et les résultats acquis lors de ce projet permettent d'envisager d'importantes réductions dans les coûts de production et d'opération associés aux futurs accélérateurs de particules, qu'ils soient des machines compactes ou des installations à la frontière de l'énergie. La réalisation de couches minces de qualité pour cavités SRF changera radicalement le coût des systèmes d'accélération et améliorera de façon significative leur performance et fiabilité.

### **Etat de l'art des technologies du Nb massif et Nb/Cu**

Sur la base des aspects fondamentaux de la supraconductivité, pour qu'un matériau soit utile pour des applications accélérateurs, il doit avoir une  $T_c$  élevée, une résistivité normale basse et un champ magnétique critique de surchauffe  $H_{sh}$  élevé, de l'ordre du champ critique thermodynamique,  $H_c$ . Depuis les quatre dernières décennies, le matériau de choix pour les accélérateurs supraconducteurs est le Nb dû au fait qu'il a la  $T_c$  la plus élevée parmi les métaux purs et le champ critique  $H_{c1}$  le plus élevé (180 mT à 2 K) parmi les matériaux supraconducteurs. Des considérations techniques telles que la disponibilité de matériau de haute pureté avec une bonne conductivité thermique, la facilité de fabrication dues aux propriétés mécaniques et la bonne uniformité des propriétés du matériau sur des surfaces de grandes dimensions sont également des éléments en faveur du Nb. Ces dernières années, avec le perfectionnement des techniques de préparation de surface et de mesure, la performance RF des cavités SRF en Nb massif approche la limite intrinsèque du matériau à  $H_{max}=H_{c1}$  (180 mT) avec des champs de claquage proches de la limite de désintégration des paires de Cooper (50 MV/m).

Les propriétés SRF étant essentiellement un phénomène de surface (les champs RF pénètrent uniquement une épaisseur de l'ordre de la longueur de pénétration, 40

nm pour le Nb), le dépôt d'un film de Nb d'épaisseur de l'ordre du micron sur une structure en cuivre présente des avantages.

Au cours des années, la technologie niobium sur cuivre (Nb/Cu) pour les cavités supraconductrices a prouvé être une alternative viable au Nb massif et a été mise en place pour des accélérateurs comme LEP-II, LHC au CERN et ALPI à l'INFN-Legnaro. Cependant, les techniques de dépôt utilisées jusqu'à présent, principalement la pulvérisation magnétron, n'ont pas produit des surfaces SRF permettant d'atteindre de bonnes performances à champ accélérateur élevé.

### **Déposition de films par condensation énergétique**

Avec l'émergence de méthodes à condensation énergétique telles que une source ultravide (UHV) d'ions à résonance cyclotron électronique (ECR), la pulvérisation magnétron à impulsion de haute puissance (HiPIMS), des films de haute qualité peuvent être déposés avec pratiquement uniquement des ions énergétiques, les atomes neutres étant bloqués de manière significative.

Par comparaison avec les techniques de dépôt classiques, telles que la pulvérisation magnétron (énergie d'ions  $\sim 5-10$  eV), les techniques de condensation énergétique créent des ions avec des énergies hyperthermiques (entre 10 et 1000 eV). La condensation énergétique est ainsi caractérisée par un nombre de procédés de surface activés par l'énergie des ions incidents sur la surface tels que la désorption de molécules adsorbées, la mobilité accrue des atomes en surface et le stoppage des ions incidents sous la surface.

Les principaux avantages de ces techniques sont la production de flux d'ions importants avec un angle d'incidence et une énergie cinétique contrôlables ainsi que l'absence de production de macro-particules.

Le dépôt par condensation énergétique en ultravide par ECR est étudié pour le Nb sur des substrats avec différents accords de maille et différentes conditions de surface. Un des objectifs est de comprendre la relation entre les conditions de croissance, la microstructure du film et la performance RF pour les matériaux SRF produits par condensation énergétique.

Le modèle de zone énergie-température adapté à partir du modèle de Thornton aux dépôts avec ions énergétiques par André Anders est exploré afin de définir les conditions de dépôt optimales pour produire des films adéquats pour des applications SRF en monocouche et en structures multicouches. La contribution de l'énergie à la fois des ions incidents et du réseau du substrat sur la nucléation des matériaux SRF considérés et des matériaux diélectriques (AlN) ainsi que l'influence

des conditions de dépôt sur les propriétés structurales, supraconductrices et RF sont étudiées. Une attention particulière est accordée à minimiser les contraintes résiduelles (intrinsèques et thermiques) avec le choix du substrat et son traitement in-situ avant dépôt ainsi que la température de dépôt.

Les conditions de dépôt développées sont utilisées, comme preuve de concept, pour préparer des structures multicouches S-I-S ayant le potentiel d'atteindre des gradients de champ élevés. Une attention particulière est accordée aux interfaces entre les couches supraconductrices et diélectriques.

Pour ce travail, diverses techniques d'analyses de matériaux sont utilisées pour caractériser chaque type de matériau : la diffraction aux électrons rétrodiffusés (EBSD), diffraction aux rayons X (XRD), la microscopie électronique à balayage (MEB) à haute résolution, la microscopie électronique en transmission (MET), la profilométrie, la microscopie à force atomique (AFM), SIMS, SAM). Des mesures des propriétés supraconductrices et RF sont également effectuées (rapport de résistivité résiduelle RRR, température de transition  $T_c$ , résistance de surface SRF à basse température, magnétométrie SQUID).

### **Films SRF Nb déposés par condensation énergétique via plasma ECR**

Une source plasma ECR est un outil idéal pour le dépôt de film Nb dans des conditions d'ultravide. Un canon à électron est utilisé pour créer une vapeur dense de Nb introduite dans une chambre ECR où des champs magnétiques et électriques perpendiculaires sont appliqués pour la création des conditions nécessaires à la résonance électronique. Les ions Nb ainsi créés sont mono-chargés avec une énergie de 64 eV. Une tension de polarisation peut être appliquée sur le porte-échantillon pour contrôler l'énergie des ions incidents. Pour les besoins de ce travail, un porte-échantillon a été conçu permettant le dépôt in-situ simultané de films Nb avec 8 énergies d'ions incidents différentes. Un deuxième porte-échantillon est utilisé pour les dépôts de films Nb sur les substrats de 50 mm requis pour les mesures RF.

Les conditions d'élaboration des films Nb ont été étudiées en fonction de l'énergie incidente des ions et la température de dépôt (de 100 °C à 700 °C) sur une sélection de matériaux de substrat avec différents accord de maille, métalliques et isolants, monocristallin, polycristallins et amorphes. La qualité du substrat, tant au niveau chimique qu'au niveau de la présence de défauts (pores, dislocations...), influence de façon critique la qualité du film de Nb. Tout défaut sur le substrat constitue un centre de nucléation qui peut altérer la croissance de la couche de Nb.

Des films Nb monocristallins ont été produits sur une variété de substrats cristallins, métalliques et isolants. Dans ce cas, le mécanisme de croissance des films est l'hétéroépitaxie. Les orientations des couches minces dépendent fortement des plans cristallins du substrat, ainsi que de la tension de polarisation c'est à-dire l'énergie cinétique des ions Nb<sup>+</sup> incidents. Cette étude révèle les relations d'épitaxie suivantes: Nb {110} || Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> {11-20}, {100} Nb || Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> {1-120}, {110}, {111} Nb || Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> {0001}, {110} Nb || MgO (100), {110} Nb || Cu {100}, {100} Nb || Cu {110}, {110} Nb || Cu {111}. La température de chauffage du substrat minimum (environ 360 °C) afin de promouvoir l'épitaxie est modérée, environ 0.23T<sub>m, Nb</sub>. La croissance de films sur des surfaces de cuivre polycristallines et amorphes a également été étudiée, révélant que, par le contrôle de l'énergie des ions et la température du substrat, la structure du film lui-même peut être ajustée.

Bien que le saphir ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et le MgO n'aient pas d'application pratique en tant que substrat pour les cavités SRF, ils constituent des exemples de surface idéale pour étudier la croissance du Nb dû à sa rugosité minimum et à une différence de maille relativement faible avec le Nb (en particulier pour le saphir). Sur l' $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11-20) et (1-120), le régime de croissance des films Nb est l'hétéroépitaxie. Les films sont respectivement monocristallins (110) et (100) avec d'excellentes propriétés de matériau.

L'orientation du Nb déposé sur du  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) varie de (111) à (110) au-dessus d'une certaine énergie d'ions incidents, en fonction de la température de dépôt (214 eV à 360 °C). Plus la température du substrat est élevée et plus le seuil d'énergie des ions incidents est bas pour cette transition. Ce phénomène n'est observé pour les techniques de dépôts classiques (épitaxie par faisceau moléculaire ou pulvérisation cathodique) qu'à des températures de dépôt au-delà de 1000 °C. Pour les films déposés sur de l'alumine (céramique) et de la silice fondue, la structure des films est fibreuse avec des tailles de grains de l'ordre du micron.

Sur le cuivre monocristallin et polycristallin (la couche d'oxyde natif étant réduite par traitement thermique au-dessus de 360 °C), le mode de croissance du Nb est également épitaxial avec des interfaces cristallines abruptes, comme observe par microscopie électronique à transmission. Sur le cuivre polycristallin recuit, les films Nb ont une taille de grain comparable à ceux du Cu, i.e. de l'ordre du  $\mu\text{m}^2$ . Pour les films déposés sur la couche d'oxyde native du Cu, l'interface avec le substrat est amorphe et le mode de croissance du film est colonnaire fibreux. Les grains observés sont toutefois de la taille de quelques dizaines de microns par opposition à quelques 100 nm pour les films fibreux produits par pulvérisation magnétron.

Les analyses de la composition chimique des films par SIMS ont révélé une teneur en impuretés légères (telles que l'hydrogène) réduite de plusieurs ordres de grandeurs par rapport au Nb massif.

Par le passé, des arguments que les films Nb ont une limite intrinsèque en raison de leur faible RRR ont été mis en avant. Il est démontré ici que le RRR des films Nb ECR peut être varié de faibles valeurs à des valeurs équivalentes au Nb massif. Les films Nb (100) déposés sur l' $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1-120) et le Cu (110) ont systématiquement un RRR plus élevé que pour les films (110) et (111) et une température de transition T<sub>c</sub> plus proche du Nb massif. Sur le cuivre polycristallin recuit, les films ont un RRR plus élevé dû au fait que le stress et tensions sont relâchés dans le substrat conduisant à une réduction de la densité de défauts dans le film Nb. La variation de RRR pour les films déposés sur des substrats amorphes tels que l'alumine et la silice fondue est plus modeste. Toutefois le RRR de ces films Nb reste élevé que pour les films épitaxiaux déposés par pulvérisation cathodique pour les cavités RF 1.5GHz Nb/Cu (CERN).

Pour chaque substrat, on constate qu'une énergie optimum d'ion incident maximise le RRR du film Nb. Des RRR sans précédents (voir tableau) ont été mesurés pour des films Nb sur une variété de substrats. Les mesures du gap supraconducteur ont démontré que le gap des films Nb ECR est très similaire au Nb massif.

Les performances RF de films Nb déposés sur Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11-20) et Cu polycristallin ont été mesurées dans une cavité TE<sub>011</sub> avec saphir à 7,5 GHz. Bien que l'interprétation des résultats de la RF soit entravée par les limitations du système de mesure, certaines tendances se dégagent. En général, la résistance résiduelle des films de Nb ECR reste plus élevée que pour le Nb massif mesuré sur le même système expérimental. Cependant pour les films déposés avec des ions d'énergie élevée et au-dessus de 4 K, la résistance RF est similaire à celle du Nb massif. Il a aussi été montré que les joints de grains pour des films Nb de haute qualité ne sont pas nécessairement préjudiciables à la performance RF. Les résultats RF sur des échantillons monocristallins déposés sur saphir et polycristallins déposés sur du cuivre à larges grains simultanément montrent que les joints de grains, s'ils sont denses, ne sont pas forcément un facteur limitant pour la performance RF des films Nb. Les mesures sur des échantillons déposés à énergie d'ions croissante montrent une amélioration de la résistance de surface. Les dépôts avec énergies différentes pour la nucléation et le reste de la croissance du film révèlent une augmentation du RRR et une réduction de la résistance de surface RF. Ceci suggère qu'une fois le film établi sur le substrat, une croissance à une énergie plus basse qui minimise la création de défauts produit de meilleures propriétés et une meilleure performance RF.

La condensation énergétique permet donc la croissance de films Nb de haute qualité à des températures bien plus basses que pour la pulvérisation magnétron et bien adaptées à des températures de substrat adaptées aux applications SRF pratiques.

Valeurs de RRR récemment mesurées pour des films Nb ECR

	Substrat	RRR max
monocristal	MgO (100)	196
	MgO (110)	424
	MgO (111)	197
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (11-20)	488
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0001)	247
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1-120)	640
	Cu (100)	181
Polycristallin	Cu (110)	275
	Cu (111)	245
	Cu grains fins	193
Amorphe	Cu grains large	305
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> céramique	135
	AlN céramique	110
	Silice fondue	84

### Multicouches SIS NbTiN/AlN

Afin de valider expérimentalement le concept proposé par A. Gurevich, une étude de la croissance de films NbTiN et AlN ainsi que le dépôt de multicouches sur des surfaces de Nb massif et en couche épaisse a été entreprise par dc-MS et HiPIMS. Une attention particulière est apportée aux interfaces.

Le nitrure de niobium titane (NbTiN) est choisi pour les couches supraconductrices à haute  $T_c$ . Il a une structure NaCl avec une  $T_c$  pour le matériau massif de 17.3K, correspondant à la phase supraconductrice  $\delta$ . La  $T_c$  est très sensible à la stœchiométrie de l'azote. Bien que ce composé soit très largement utilisé dans l'industrie, sa structure exacte est mal connue et son diagramme de phase incomplet, voire inexistant en-dessous de 1300 °C. L'addition de Ti dans le système Nb-N semble stabiliser le composé par comparaison au NbN tout en préservant une  $T_c$  élevée.

Le matériau diélectrique choisi est le nitrure d'aluminium (AlN) qui peut croître avec une structure hexagonale (wurtzite) ou cubique (sphalérite). L'AlN est souvent utilisé pour les détecteurs multicouches THz en raison de ses propriétés diélectriques et

piézoélectriques, stabilité chimique, haute conductivité thermique, isolation électrique et un gap large. Sa conductivité thermique est comparable à celle du cuivre. Le travail sur les senseurs THz a démontré que la présence d'une inter-couche d'AlN peut améliorer la  $T_c$  des couches de NbN et de NbTiN.

Le système de dépôt utilisé est un système à ultraviolet équipé de 3 magnétons DC/RF. L'alimentation HiPIMS est une alimentation Huettinger HighPulse 4006 (2000 V, 3000 A). Les films NbTiN ont été étudiés par dc-MS et HiPIMS et les films AlN par dc-MS.

Le dépôt des films NbTiN a été optimisé avec une cathode de NbTi (80%/20%) et étudié sur une variété de substrats tels que l' $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11-20), le MgO (100), le monocristal w-AlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11-20) et l'AlN céramique. Il a été démontré que des films de NbTiN et AlN de bonne qualité peuvent être déposés par DC-MS. Des films de NbTiN massifs, c'est à dire d'une épaisseur supérieure à 1 micron, sont produits avec une  $T_c$  de 17,25 K, proche de la valeur pour le matériau massif. Les films NbTiN d'une épaisseur supérieure à 50 nm ont de bonnes caractéristiques de matériau et une  $T_c$  supérieure à 16,5 K. Le développement des films NbTiN par HiPIMS en mode réactif est en cours. Jusqu'à présent, les meilleurs films ont une  $T_c$  de 16,6 K. Une augmentation modeste de  $H_{c1}$  est observée par magnétométrie SQUID pour certains films de NbTiN. Des études plus poussées de la variation de  $H_{c1}$  pour les couches minces de NbTiN en fonction de l'épaisseur sont nécessaires à la fois sur des substrats de MgO et sur des couches minces d'AlN déposées pour les deux techniques de dépôt, dc-MS et HiPIMS. Des films d'AlN de différentes épaisseurs sont produits par dc-MS avec de bonnes propriétés diélectriques, mesurées par ellipsométrie. Pour une température de dépôt de 600 °C et sur MgO, leur structure est cubique. Les films déposés sur MgO en-dessous de 450 °C sont polycristallins avec une structure hexagonale.

Pour les structures NbTiN / AlN, la température de dépôt des structures multicouches doit être maintenue en dessous de 600 °C. En effet, à 600 °C, les analyses MET révèlent que l'aluminium diffuse dans les couches de Nb et de NbTiN. Des couches NbTiN / AlN de bonne qualité ont été produites à 450 °C avec une  $T_c$  pour les couches NbTiN entre 16,6 et 16,9 K. Les interfaces avec le substrat et entre les couches de NbTiN et AlN sont abruptes. Les films sont polycristallins. Il est montré que, si la couche diélectrique peut être déposée en tant que couche d'adaptation (« template ») adéquate pour la croissance de films NbTiN et si la température de croissance est suffisante pour favoriser la mobilité des atomes en surface, la rugosité du substrat n'est pas nécessairement préjudiciable à la  $T_c$  du film supraconducteur. La poursuite de l'amélioration des interfaces est cependant

nécessaire. Le dépôt par HIPIMS peut être utile pour l'amélioration de la structure des films NbTiN et AlN.

Des mesures RF sur des structures NbTiN/AlN déposées sur du Nb massif et sur un film de Nb/Cu déposé ex-situ par ECR montrent une résistance de surface  $R_s$  au-dessus de 4 K plus basse que pour le Nb massif ou le film Nb ECR de départ. Ceci donne donc quelques indications que les structures SIS déposées sur des surfaces de Nb, massif et en couche épaisse, présentent le potentiel de retarder la pénétration des fluxons et de réduire les pertes RF pour les cavités SRF. Beaucoup reste cependant encore à faire pour développer une application pratique pour les cavités SRF.

Pour poursuivre le développement de structures NbTiN / AlN où les deux types de couches sont déposées dans des conditions optimales, des modifications du système de dépôt doivent être mis en place. A cet effet, un porte-échantillon central a été conçu, construit et est en cours d'installation.

## **Conclusions et Perspectives**

Les objectifs principaux de ce travail ont été le développement des films Nb avec des propriétés correspondant au Nb massif ainsi qu'une évaluation du potentiel des structures multicouches nanométriques SIS pour des applications SRF.

Les modes de croissance en hétéroépitaxie et colonnaire fibreux ont été étudiés sous différentes conditions dans l'effort de déterminer les conditions optimales de dépôts pour des surfaces RF basées sur des films de Nb. Bien que l'optimisation complète demande encore du travail, l'influence de l'énergie des ions incidents et de la température du substrat sur la structure du film Nb a été étudiée en explorant le diagramme modifié de Zones de structures proposé par A. Anders, aussi bien sur des surfaces dites « idéales » et des surfaces pratiques pour les applications SRF telles que le cuivre polycristallin.

Des films Nb monocristallins ont été produits en épitaxie par déposition plasma ECR sur une variété de substrats cristallins, métalliques et isolants. L'orientation des films dépend fortement sur l'orientation cristalline du substrat ainsi que sur l'énergie cinétique des ions  $Nb^+$  incidents.

La croissance des films Nb ECR a aussi été étudiée sur des substrats polycristallins et amorphes. Cette étude révèle qu'en variant la température du substrat et l'énergie des ions Nb incidents, la structure du film varie.

Les films ECR révèlent des concentrations d'impuretés légères telles que l'hydrogène plus faibles de plusieurs ordres de grandeur que pour les surfaces de Nb massif

préparée en l'état de l'art. Il a été démontré que les valeurs de RRR pour les films de Nb peuvent être variées de valeurs à un seul chiffre jusqu'à des valeurs sans précédent et comparable au Nb massif, réfutant ainsi les arguments que les films Nb présente des limites intrinsèques dues à leur faible RRR. Les mesures du gap supraconducteur révèlent également des valeurs équivalentes au gap supraconducteur du Nb massif.

L'évaluation des performances RF pour les films Nb ECR est en cours. En dépit des limitations présentes du système RF utilisé, des mesures de films Nb déjà obtenues sur du cuivre polycristallins et du saphir (11-20) révèlent certaines tendances, comme l'amélioration de la résistance de surface pour des énergies incidentes croissantes. Des films déposés sur du cuivre recristallisé, donc sans contraintes, ont un RRR aussi élevé que des films monocristallins déposés sur saphir ainsi qu'un comportement RF très similaire, suggérant que des joints de grain pour des films de haute qualité ne sont pas forcément un détriment. Certains résultats sur des films produits avec des énergies différentes pour la nucléation et la croissance ultérieure suggèrent le bien fondé d'un traitement de la croissance des films en phases.

En second lieu, le développement des structures de films multicouches SIS suivant le concept propose par Gurevich a été étudié avec le NbTiN et l'AlN respectivement pour les films à haute  $T_c$  et diélectrique. Des monocouches de NbTiN de bonne qualité ont été produites par pulvérisation magnétron DC à différentes épaisseurs. Une  $T_c$  équivalente au NbTiN massif est obtenue pour des films d'épaisseur  $> 1 \mu\text{m}$ . Les premiers films de NbTiN produits par HiPIMS ont été produits avec une  $T_c$  de l'ordre de 16.6 K. Les mesures par magnétométrie SQUID pour des films très minces NbTiN/MgO révèlent une augmentation modeste du champ critique  $H_{c1}$ . Des études plus poussées du champ critique en fonction de l'épaisseur du film sont encore nécessaires aussi bien pour des films produits par dc-MS et par HiPIMS. Des structures multicouches NbTiN/AlN de bonne qualité ont été produites. La déposition par HiPIMS pourrait toutefois permettre d'améliorer encore la structure et propriétés des couches NbTiN et AlN avec les faibles épaisseurs requises par le concept de Gurevich. La caractérisation RF de ces structures SIS déposées sur du Nb massif et sur des films Nb/Cu révèlent que ce concept a le potentiel de retarder la pénétration des fluxons et d'améliorer les performances RF pour les cavités SRF au-delà du Nb massif.

Afin de d'optimiser le dépôt de films SRF, plusieurs avenues sont encore à développer et à explorer. Ainsi, l'interface entre le film Nb et le substrat peut encore être améliorée et adaptée pour optimiser les propriétés RF finales du film. Par exemple, la surface du substrat peut être nettoyée in-situ par gravure plasma (plasma etching) ou adaptée à la déposition du film par implantation d'ions (interface mixing).

Bien qu'il existe plusieurs dispositifs expérimentaux pour la mesure de résistance de surface RF sur échantillons, la meilleure méthode pour évaluer le potentiel en performance RF reste la mesure d'une cavité SRF tridimensionnelle. Le dépôt de couches Nb de qualité sur une structure tridimensionnelle demande encore bien des développements. Une des méthodes pourrait être d'utiliser le plasma ECR en conjonction avec un magnétron cylindrique comme source de Nb.

Du côté des structures SIS, afin de poursuivre le développement des structures NbTiN/AlN dans des conditions optimales, le système de dépôt a été modifié et équipé d'un carrousel de porte-échantillons central. L'effet de l'épaisseur du film de NbTiN sur l'augmentation de  $H_{c1}$  continuera avec les méthodes de dépôt dc-MS et HiPIMS. Ces méthodes pourront aussi être étendues à d'autres matériaux tels que le Nb<sub>3</sub>Sn. Un concept pour le dépôt de structures SIS sur cavité SRF elliptique est en développement.