

Les technologies plasma pour une électronique de demain; du plasma à la Jonction Josephson

N.Holtzer, E.Stamate, H. Toyoda, H.Sugai

Université de Nagoya, Laboratoire Sugai, 21st Century COE Nagoya for Plasma-Nano

名古屋市不老町千種区名古屋大学大学院

工学部 I B 電子情報館、菅井研究室

Tel : 052-789-2726, Fax : 052-789-3152

Mel : nico_h@nuee.nagoya-u.ac.jp

Résumé :

Le bombardement ionique est un traitement souvent utilisé dans le traitement des matériaux par exemple dans la gravure plasma et le dopage de surface. L'uniformité du flux d'ion est un facteur critique et de nombreux efforts sont fournis pour augmenter la surface utilisable des wafers. Les ions accélérés par la gaine percutent le wafer et changent les propriétés de sa surface. La taille du wafer et de son support va définir le potentiel dans la gaine autour de la cible et ainsi les trajectoires des ions et l'angle de l'impact sur la surface. Récemment une non-uniformité et un double-effet de convergence incluant l'existence d'une surface passive sur les bords du wafer ont été rapportés et prouvés expérimentalement [4,5,6]. Une approche théorique et expérimentale de la trajectoire des ions a été réalisée dans le but de proposer des solutions. Un anneau de protection vertical a été proposé et les données expérimentales et théoriques à différentes échelles prouvent son efficacité. Une application sur les Jonctions Josephson (IEJ) permet de tester l'efficacité des techniques proposées pour une électronique à base de supraconducteurs. Ces IEJ pourraient à terme remplacer les transistors et sont actuellement utilisées dans l'imagerie médicale.

Abstract:

The ion bombardment is widely used in various plasma-based materials processing such as reactive ion etching and plasma doping by ion implantation. The ion flux uniformity is a critical issue and a large effort is dedicated to increase the usage of the wafer surface. Typically, ions accelerated in the sheath strike the wafer surface changing its properties. The finite size of the wafer shapes the potential distribution within the sheath around the wafer strongly affecting the ion trajectories and the impact angle on the surface. Recently, ion flux non-uniformity and focusing effects including the existence of a passive surface (no ion impact) near the wafer edge have been experimentally proved [3,4] however there is a lack of methods able to improve the ion flux uniformity. In this work we are reporting experimental and theoretical investigations of ion trajectories within the sheath surrounding wafers immersed plasma, aiming to propose solutions to improve the ion flux uniformity. Simulations agree with observations in RF CCP and ICP reactor.

Application of such control of ion trajectories for ion bombardment over surfaces in IEJ (Interface Engineered Josephson Junction) will allow the testing of such techniques in nanotechnologies. Successful IEJ might be replacing transistors in the future and are actually used in different bio-medical applications.

0.0 Introduction au Plasma [1,2,3]

Le plasma, quatrième état de la matière, est un gaz compressé et chauffé. Il compose plus de 99,9% de la matière connue dans l'univers et en tant que tel est utilisé pour expliquer un grand nombre de phénomènes naturels tels que les étoiles, les vents solaires, mais plus proche de nous les aurores boréales ou les éclairs. Depuis l'émergence d'une électronique grand public il est aussi un aspect méconnu des technologies utilisées pour la microélectronique, mais aussi la fabrication de matériaux nouveaux étant présent dans de très nombreuses étapes de la fabrication.

La maîtrise du plasma est donc un enjeu primordial des technologies du futur puisqu'elle permet l'émergence d'une certaine forme de nanotechnologie, de matériaux aux propriétés telles que la biocompatibilité ou la dureté mais aussi de technologies de dépollution, de propulsion spatiales. Une certaine catégorie de plasmas dits chauds promet par la fusion une énergie propre et illimitée dans un futur proche en imitant les phénomènes qui ont lieu dans les étoiles. Le projet international ITER localisé dans le sud de la France est le plus médiatisé de ceux-ci.

Les plasmas sont donc classés en trois grande catégories: les plasma naturels, les plasmas thermonucléaires, dits chauds, qui couvrent les problématiques de fusion mais qui restent inappropriés pour une utilisation industrielle entre autres à cause de leur température qui endommage les éléments le touchant et enfin les plasmas faiblement ionisés utilisés dans l'industrie. Les plasmas industriels, dits froids, sont aisément contrôlés et utilisés dans l'industrie pour de très nombreuses applications telles que la déposition, la gravure, la stérilisation etc.

Les procédés plasmas ont pris une importance considérable dans le domaine des traitements de surface et trouvent des applications dans des champs d'activité innovants mais est aussi en voie de remplacer de nombreux traitements dans l'industrie chimique, textile.

Dans la suite de ce travail nous allons nous intéresser à l'une des technologies de modification de surface les plus courantes appelée implantation d'ions immergés dans un plasma (PIII). Celle-ci remplace une technique utilisée entre autre dans le traitement de matériaux qui consiste à projeter des faisceaux d'ions dans le vide en les accélérant à l'aide de forts courants et hautes tensions. Celle-ci présentait des problèmes de coût, d'uniformité, et est depuis une dizaine d'année le plus souvent remplacée par la technique d'implantation d'ion sur un objet immergé dans un plasma.

0.1 Définition de plasma

Un plasma est un milieu complexe composé d'électrons, d'ions et d'atomes excités, et sa chimie demeure encore mal connue. Dans les réacteurs de traitements de surface, le plasma est donc bien souvent considéré comme une "boîte noire" et les conditions opératoires sont alors régies par l'usage, les modèles théoriques de comportement des différents éléments étant souvent encore à trouver. Dès le début du XX^{ème} siècle, des études sur le plasma et sa composition ont amorcé l'étude toujours en cours de ce qu'est le plasma. Le plasma a été défini [1,2,3] comme de la matière chauffée au-delà de son état gazeux, chauffée au point que les électrons qui entourent les atomes se voient arrachés. Ce phénomène définit ainsi le plasma comme un ensemble d'ions, d'électrons libres, et majoritairement d'atomes encore non ionisés (dans les réacteurs industriels) appelés neutres interagissant entre eux de manière cohérente. La différence de température entre les électrons et ions de ce plasma va définir la différence entre le plasma chaud (fusion) et froid (plasmas industriels). Cette température va aussi définir le degré d'ionisation et donc les propriétés de cet ensemble de particules électriquement neutre.

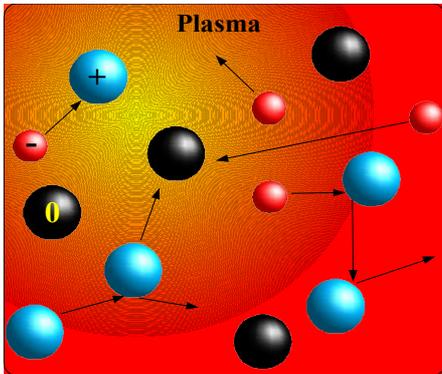


Fig.1 Plasma et particules chargées

Avec:

+ les ions en bleus

- les électrons en rouge se déplaçant à grande vitesse

0: les neutres en noirs, qui peuvent changer de statut selon les collisions, sont les atomes des gazes avec lesquels on fait les plasmas et qui n'ont pas été ionisés

Le plasma, Fig.1, est donc un ensemble de particules dont les éléments chargés vont définir les caractéristiques. Dans les plasmas industriels, les champs électriques et magnétiques utilisés pour transmettre l'énergie au gaz et le transformer en plasma se classent selon le type d'onde utilisée, des radiofréquences aux VHF et micro-ondes, et selon le type de réacteur et de type d'excitation. Le plasma est caractérisé par un mouvement incessant de ses particules interagissant entre elles, les électrons étant les plus mobiles de par leur légèreté. Les mécanismes de ces différents plasmas sont encore aujourd'hui dans de nombreux cas sujets à recherche. Le fait de pouvoir contrôler les différents paramètres du plasma permet de maîtriser les coûts mais surtout la précision des opérations réalisées et représente un enjeu industriel majeur.

0.2 Définition de la gaine

Lorsque le plasma touche un objet, une zone aux propriétés spéciales se crée autour de cet objet. La gaine est un état électroniquement non neutre entretenu par des agitations thermiques et freinée par des interactions coulombiennes qui ne permettent le passage de particules que si elles dépassent une certaine énergie. De manière plus prosaïque on peut définir la gaine comme un espace où la densité d'ion est plus forte que la densité électronique ce qui ne correspond plus aux conditions du plasma. Entre le plasma et cette région existe une zone de pré-gaine qui va permettre de réaliser la transition entre les deux états. Cette région, définie arbitrairement par le critère de Bohm, est un modèle qui comme un filtre empêchera des particules chargées de passer si elles ne disposent pas d'énergie suffisante, ce qui correspondra à une vitesse minimum pour les ions exprimé avec le critère de Bohm.

Une forte polarisation d'une cible va créer un autre type de gaine appelée gaine haut-voltage formée par une gaine matrice d'ions qui s'étend en suivant la loi de Child-Law. Nous allons par la suite de ce travail montrer la relation entre la forme de la gaine dans la PIII et l'uniformité de du flux d'ions, ainsi que proposer des solutions afin d'éliminer les pertes de surface sur le wafer dues à un effet de gaine qui va agir comme une lentille électrostatique.

1. Introduction à l'effet de gaine-lentille électrostatique.[4,5,6]

Le bombardement d'ions sur une surface est un traitement très utilisé dans un grand nombre de traitements plasma de matériaux tels que la gravure RIE ou le dopage par implantation d'ions. L'uniformité du flux des ions vers la surface est un facteur critique, et de gros efforts sont dédiés à l'augmentation de la surface utilisable sur un wafer. De fait, les ions sont accélérés dans la gaine vers la surface et en heurtant celle-ci modifient ses propriétés.

Les dimensions du wafer et de son support déterminent la distribution des potentiels dans la gaine l'entourant ce qui va affecter très fortement les forces électrostatiques en découlant, les trajectoires des ions et conséquemment l'angle de collision de ceux-ci avec la surface. Des effets de convergence rendant le dosage en ion non uniforme et amenant à des surfaces passives (pas d'impacts ioniques) ont été étudié et expérimentalement rapportés [2,3] mais un manque de solutions pour améliorer l'uniformité du flux d'ion sur la surface a été rapporté.

Dans ce travail, nous rapportons des études théoriques et expérimentales sur la trajectoire des ions dans la gaine entourant un wafer immergé dans un plasma dans le but de proposer des solutions pour améliorer la distribution et le dosage des ions pour implantation d'ions. Des simulations et des observations dans un réacteur CCP asymétrique, puis un réacteur ICP à haute densité, en utilisant des wafers de dimensions différentes ont été réalisées pour ce travail.

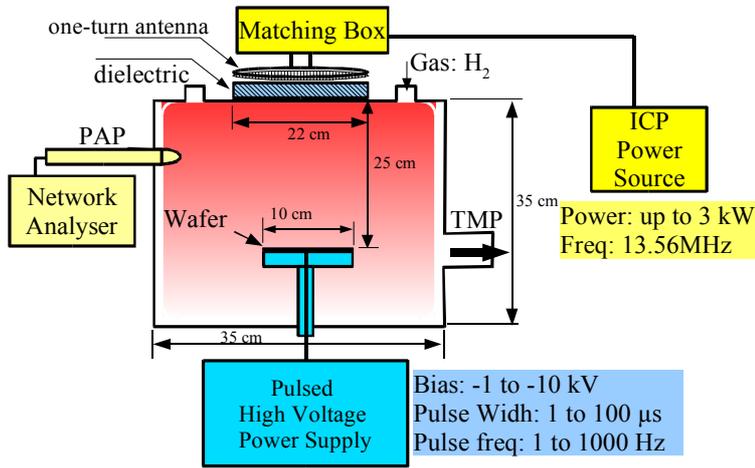


Fig2. Dispositif expérimental

Setup de type ICP pour implantation ionique à haute ratio : potentiel de polarisation /densité

2. Simulations et études théoriques

Supposons qu'un wafer de rayon r_w polarisé avec une impulsion d'amplitude $V_0 \ll V_{pi}$ de fréquence ν avec V_{pi} le potentiel du plasma. Si la largeur des impulsions est suffisamment grande (plus de quelques μs), une gaine se forme autour du wafer. La distribution des potentiels dans la gaine, $V(x, y=r, z)$ avec l'axe z perpendiculaire à la surface de la sonde est donnée par les équations de Poisson suivantes:

$$\Delta V = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_+^*(V) - n_e^*(V)) \quad (1)$$

où,

$$n_+^*(V) = \frac{n_+}{2} \left(\frac{S_{sh}}{S(V)} \right) \sqrt{\frac{kT_+}{\pi e V}} \quad (2)$$

avec S_{sh} le bord de la gaine, $S(V)$ le contour de la surface de l'équipotential correspondant à V , T_+ la température des ions positifs et n_+ la densité des ions positifs. On a assumé que la distribution des électrons dans la gaine n_e^* était maxwellienne avec une température électronique T_e et une densité électronique dans le plasma n_e . La distribution des potentiels dans la gaine (projections 2D) et la trajectoire des ions vers un wafer de rayon $r_w = 75 \text{ mm}$ polarisé avec un potentiel $V = -15000 \text{ V}$ a été présentée ci-dessous fig.3 avec $n_+ = 10^{15}$ et $T_e = 3 \text{ eV}$.

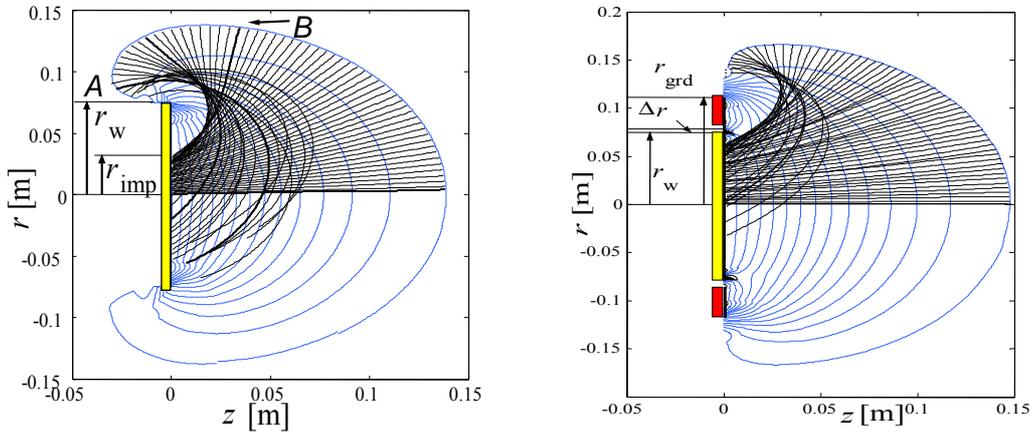


Fig.3 et 4 Cinétique des ions sans anneau de protection et avec anneau de protection

Distribution de potentiel (en bleu) et trajectoire (en noir) des ions $r_w = 75 \text{ mm}$ polarisé à $V_0 = -15000 \text{ V}$, avec $n_+ = 10^{15} \text{ m}^{-3}$ et $T_e = 3 \text{ eV}$.

Le flux ionique change de manière drastique avec r , amenant à une région passive près du bord du wafer (pas d'impact ionique) et une région étroite en forme d'anneau où une très forte densité de courant ionique apparaît. Ce phénomène est appelé convergence discrète. Les ions entrant dans la gaine des bords sont éjectés vers le centre du wafer heurtant la surface avec des angles d'incidence élevés. Ce phénomène est appelé convergence modale. Si r_{imp} est le rayon délimitant les surfaces actives et passives, sa valeur dépend de l'épaisseur de la gaine, des paramètres du plasma et de V_0 . Si un anneau de protection a été proposé, il n'est pas adapté dans tous les cas de figure. Fig.4 montre que l'effet peut apparaître malgré la protection. De plus l'augmentation des diamètres de ces anneaux de protection amène un coût supérieur pour les réacteurs de même que la modification de ceux utilisés présentement dans l'industrie électronique.

Une autre solution est d'introduire des anneaux verticaux sous la forme d'un cylindre entourant le support du wafer. Les simulations suivantes nous montrent que pour cette géométrie particulière la convergence se déplace sur l'anneau vertical.

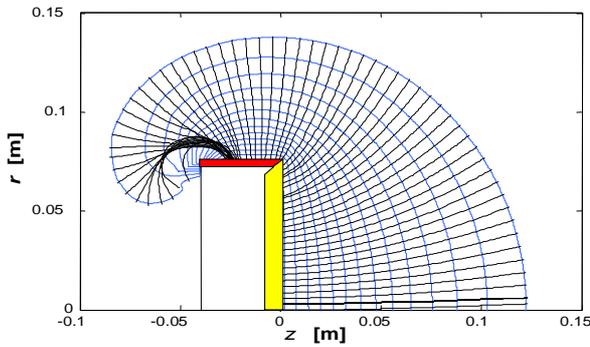


Fig.5 Cinétique avec anneau vertical

Anneau de protection vertical polarisé supporté par un cylindre de 150 mm de diamètre avec :
 $r_d=75$ mm,
 $n_+=10^{15}$ m⁻³, $T_e=3$ eV, $n_e=0$ et $V_0=15000$ V.

3. Résultats expérimentaux

Le réacteur utilisé est un réacteur RF (radiofréquences) ICP (Inductively Coupled Plasma). Afin d'obtenir un effet clairement visible et identifiable sur le wafer; le ratio « potentiel de polarisation sur densité » du plasma doit être contrôlé afin d'avoir une gaine de hauteur suffisante dans le but d'avoir une convergence discrète le plus proche possible du centre. Les densités observées étaient de l'ordre de grandeur de 10^{15} voir au maximum 10^{16} m⁻³ dans une gamme de pression évoluant de 20 à 200 mTorr. La polarisation a été réalisée par des impulsions variant de -7kV à -10kV selon les possibilités du set-up en place et de largeur d'impulsion de 20 à 50μs. Le design du support du wafer étant déterminant pour la forme de la gaine, de nouveaux stands ont du être élaborés. Ceux-ci peuvent accueillir des anneaux de protection des différents types précités: verticaux et horizontaux. On peut observer dans la photographie ci-dessous les effets de convergence sur un wafer de 100mm polarisé avec -10kV, 30μs et 34 Hz. Les points les plus clairs représentent des surfaces où la dose ionique a été la plus élevée.

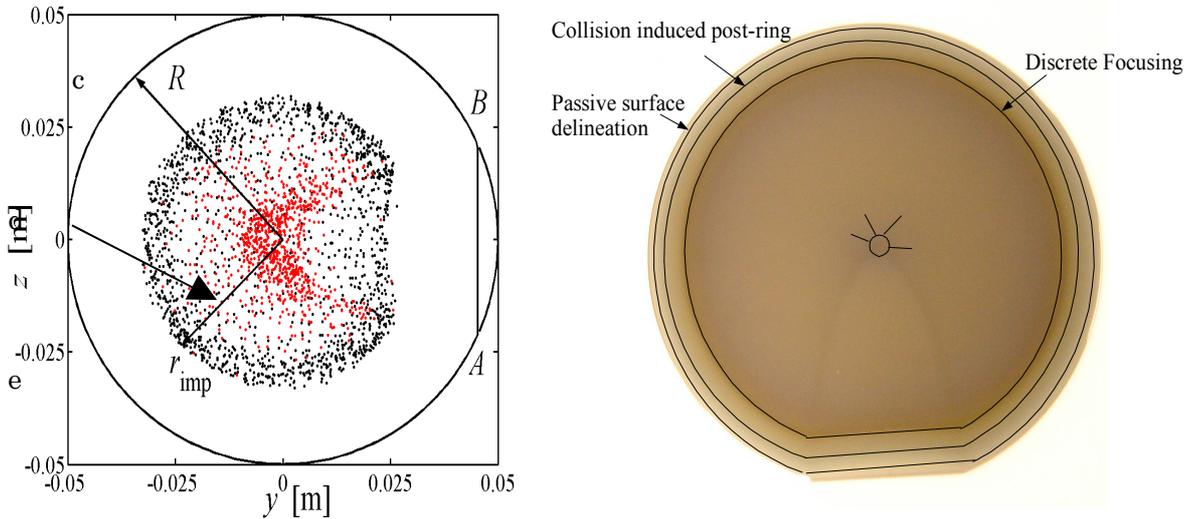


Fig.6 et 7 : Dose ionique sur un wafer de 10 cm simulation et expérience

L'évolution de la convergence discrète a été observée en variation de la densité plasma.

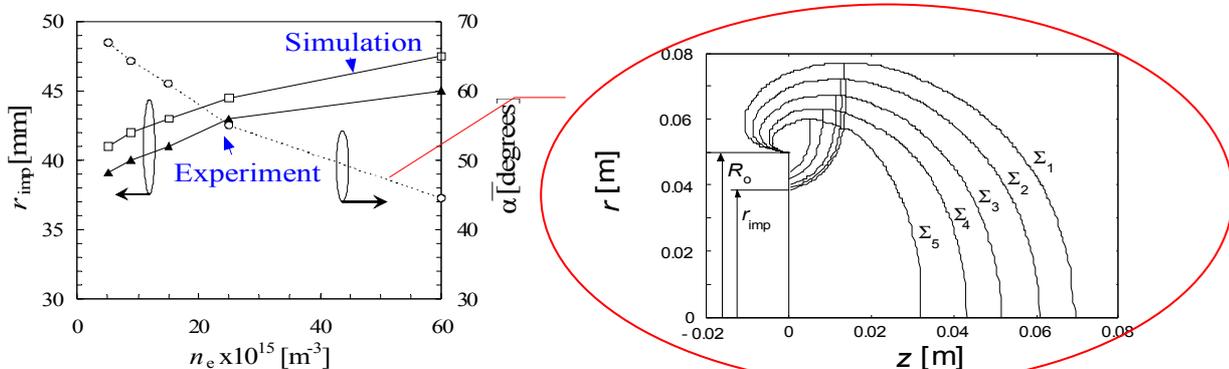


Fig.8 et 9 montre l'évolution du rayon d'impact en fonction de la densité du plasma et la simulation permettant de calculer le rayon d'impact.

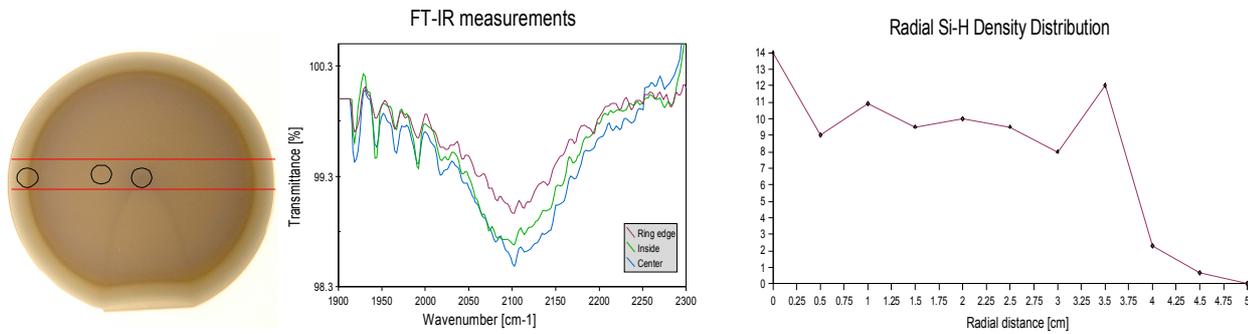


Fig. 10, 11 et 12 montrent la sélection des échantillons sur le wafer, l'analyse par spectroscopie infra rouge et la densité ionique obtenue à partir du spectre.

4. Conclusion de l'étude PIII.

Dans cette étude nous avons cherché à modéliser et montrer l'effet de lentille électrostatique déterminé par la forme de la gaine et son influence dans le traitement d'implantation ionique, mais aussi les remèdes aux problèmes rencontrés issus de cette compréhension des mécanismes. A partir de données expérimentales, des données ont été rassemblées et ont permis l'élaboration de modèles de cinétique d'ions à l'intérieur de la gaine afin de remédier aux problèmes industriels liés à cet effet. Une solution aisément implantable a été dégagée de cette étude avec un anneau de protection vertical qui va limiter l'effet de convergence sur la tranche latérale. La cinétique des ions dans ce cas a été modélisée et expérimentalement validée.

5. Applications des technologies de guidage ionique pour les nanotechnologie : IEJ [7]

5.1 Les matériaux supraconducteurs

La supraconductivité a été découverte dès 1911 dans le mercure par le Pr. Onnes. Depuis, 4 prix Nobel ont consacré l'importance de ce champ d'étude dans la communauté scientifique. La supraconductivité se définit par l'absence de résistance électrique et l'annulation du champ magnétique à l'intérieur du matériau (Effect Meisner). Un grand nombre d'applications des supraconducteurs pour la fabrication de superaimants ont permis l'émergence de trains à lévitations, de stockage d'énergie, d'imagerie médicale voir la perspective de contrôle de plasmas thermonucléaire par confinement électromagnétique lors d'expériences déjà effectuées ou à venir sur le projet JET, le projet CERN LHC ou le projet ITER.



Fig. 13, 14, 15 montrent les projets ITER, LHC et le train magnétique LINIMO de l'exposition universelle AICHI

Depuis quelques années, un nombre de plus en plus grand de recherches portent sur l'utilisation de matériaux supraconducteurs dans la création de transistors. Les avantages de ce genre de transistors seraient une consommation négligeable, une diminution de la taille de ceux-ci, des interruptions à très hautes fréquences qui permettraient de radicalement accélérer la vitesse des circuits qui les utiliseraient (comme un microprocesseur par exemple). La création de transistors SFQ single flux quantum permettrait de diminuer la taille des transistors à quelques molécules.

5.2 Présentation des IEJ

Les Interface Engineered Josephson-Junction ou IEJ permettent dès aujourd'hui de réaliser des transistors à base de matériaux supraconducteurs. 10.000 de ces jonctions permettent de réaliser un circuit de la complexité d'un convertisseur analogique numérique, 100.000 de réaliser des microprocesseurs dédiés. Le problème majeur de ces IEJ est une difficulté de réalisation de ceux-ci, couplé à une difficulté de production en masse.

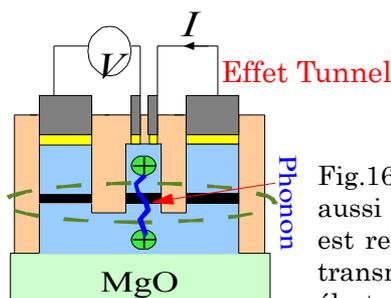


Fig.16 : IEJ est un interrupteur qui peut être utilisé dans les SQUIDS mais aussi pour de nouveaux types de transistors. La paire d'électrons de Cooper est relié par un phonon, ce qui permet de faire un effet tunnel, et donc de transmettre de l'information sans presque aucun courant (théoriquement un électron)

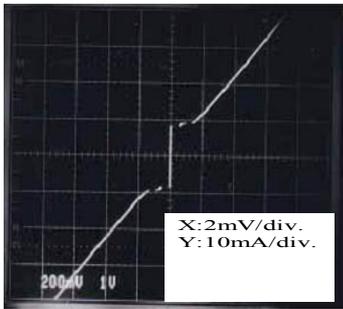


Fig.17 : On mesure la qualité de cette Iej en vérifiant la qualité à la sortie du signal que l'on met en entrée. Après un potentiel de seuil, on doit pouvoir observer l'effet tunnel, soit le courant dans l'autre électrode. Malheureusement, des problèmes de courts-circuits apparaissent dans un quart des Iej fabriquées.

5.3 Fabrication et problématique

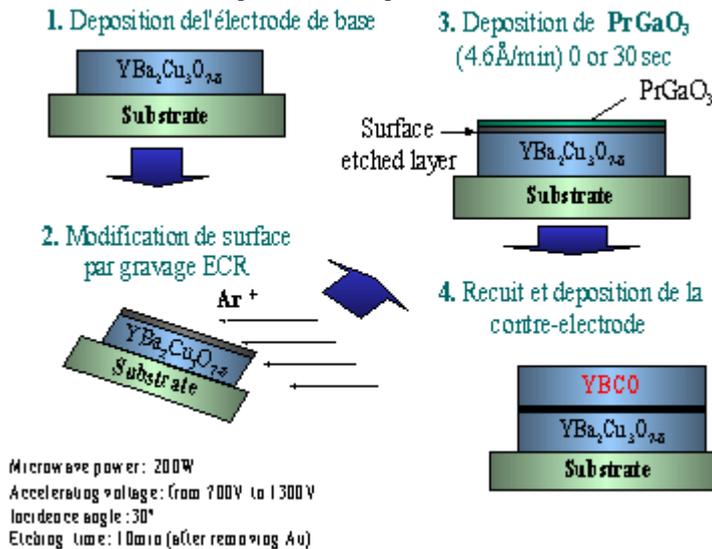


Fig.18 : fabrication de la couche de supraconducteurs

Le contrôle de la modification de surface permet de détruire la structure de la surface et de transformer le YBCO en un isolant qui permet de faire l'isolation nécessaire avant empreinte de la structure 3D par gravure plasma. Le problème principal vient de la non-homogénéité de la surface isolante créée par un faisceau ionique. L'étude présentée lors de la présentation portera sur la création de surfaces isolantes pour Iej par PIII.

6. Conclusion

La maîtrise du flux ionique en utilisant des anneaux de protection verticaux permet de modifier des nano-surfaces et permet la création de technologies plus performantes afin de créer les nano-objets et nano-composants de l'électronique de demain.

Bibliographie

- [1] "Principles of Plasma Discharge and Material Processing", M.A.Lieberman, A.J.Lichtenberg, Wiley 1994
- [2] "プラズマエレクトロニクス", 菅井秀郎 (H.Sugai), Inter University, Ohmsha 2000
- [3] "Physique des Plasmas" Jean-Marcel Rax, Sciences Sup; Dunod 2005
- [4] "Improvement of the Dose uniformity in PIII by introducing a vertical biased ring" E. Stamate N. Holtzer and H. Sugai, Thin Solid Films 2005 (in press)
- [5] "In the surface condition of Langmuir Probe in reactive plasma" E. Stamate et K.Ohe, Appl. Phys. Lett, 78 (2001) 153
- [6] "Complex ion-focusing effect by the sheath above the wafer in plasma immersion ion implantation" E. Stamate, N. Holtzer and H. Sugai, Appl. Phys. Lett. Vol.86, 261501, (2005)
- [7] "Preparation of ramp-edge Josephson junctions with natural barriers" A.Fujimaki; K Kawai, N Hayashi, M Horibe, M Maruyama, H Hayakawa, IEEE Trans. on Appl. Superconductivity 1999

Remerciements

Je souhaiterais vivement remercier le professeur Sugai et le COE Plasma-Nano sans qui je n'aurais pas pu participer à cette étude ainsi que tous les membres du laboratoire Sugai, et plus spécialement les Dr Stamate et Mezerette qui m'ont aidé à m'intégrer au groupe de recherche et à changer de thème malgré toutes les difficultés.

Je souhaiterais aussi remercier ceux qui ont permis l'obtention de la bourse Lavoisier-Japon suite aux résultats obtenus pendant la première année de thèse, et le professeur Fujimaki pour me donner la chance d'appliquer sur les SFQ les technologies de contrôle des trajectoires ioniques développées auparavant.