
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

SRF – SUPRACONDUCTIVITE EN REGIME RADIOFREQUENCE

Auteur principal

Nom : Longuevergne

Affiliation : IPNO

Email et coordonnées : longuevergn@ipno.in2p3.fr

Co-auteurs

(liste des noms et affiliations)

- Fouaidy Mohammed : IPNO
- Martinet Guillaume : IPNO

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR
avant le **1^{er} novembre 2019**

1. Informations générales

Titre : Supraconductivité en régime radiofréquence

Acronyme : (optionnel) SRF

Résumé (max. 600 caractères espaces compris)

Le projet SRF a pour but l'amélioration des performances des cavités accélératrices supraconductrices en termes de gradient accélérateur, dissipations thermiques selon trois orientations principales. La première concerne les traitements thermiques des cavités en Niobium massif pour la réduction des dissipations au gradient nominal (dopage, infusion azote, ...). La deuxième, concerne la R&D sur des dépôts de couches minces pour l'amélioration des caractéristiques fonctionnelles du Niobium massif. Finalement, il s'agira d'étudier l'effet d'assemblage en multicouche de matériaux nano-composites.

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées*
- **Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)**
- *Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux*
- *Technologies RF innovantes (structures haut gradients, alimentations RF...)*
- *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*
- *Développement durable de la discipline (infrastructures technologiques, efficacité énergétique, fiabilité...)*
- *Autre R&D spécifique : (préciser)*

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- **Accélérateurs pour la physique nucléaire**
- **Accélérateurs pour la physique des particules**
- **Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons**
- **Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)**
- *Autre : (préciser)*

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

(2 pages max incl. figures)

La technologie des cavités Radio-Fréquence (RF) supraconductrices en Niobium massif, permet l'obtention, pour les cavités $\beta=v/c=1$ type ILC, d'un gradient accélérateur de 52.3 MV/m, proche de la valeur limite théorique (52.8 MV/m). Cette limite est toutefois loin d'être atteinte pour les cavités dites «medium ou bas β » (i.e. $\beta < 0.5$) telles que les résonateurs quart d'onde (QWR) ou Spoke qui sont utilisés pour SPIRAL2, ESS, MYRRHA et PIP-II. L'amélioration des performances intrinsèques et fonctionnelles des cavités RF, de la fiabilité, conjointement à la réduction des coûts de fabrication/exploitation des accélérateurs constituent les objectifs majeurs en terme de R&D de la communauté internationale. Le projet SRF a pour but l'amélioration des performances des cavités accélératrices supraconductrices en termes de gradient accélérateur, dissipations thermiques (pertes RF dynamiques) selon trois orientations principales :

- *La première concerne l'amélioration des performances intrinsèques du Niobium massif qui est de nos jours l'une des seules technologies matures pour la construction de grands accélérateurs supraconducteurs (SNS, XFEL, LCLS2, FRIB, ESS, ...). Bien que la limite intrinsèque (i.e champ magnétique critique) en terme de gradient accélérateur soit quasiment atteinte pour le Niobium massif dans le cas des cavités elliptiques, il est encore possible d'améliorer la résistance de surface (de réduire les dissipations thermiques) par l'application de traitements thermiques innovants (Dopage N2, infusion N2, ...) [1] conduisant à une réduction d'au moins un facteur deux des pertes RF dynamiques aux gradient d'accélération nominal. La compréhension des mécanismes physiques mis en jeu ainsi que la maîtrise des conditions optimales de traitement sont encore à comprendre, à affiner et à améliorer. Ceci est d'autant plus vrai pour les structures type « bas beta » (autres que les cavités elliptiques 1.3 GHz) pour lesquelles des améliorations substantielles sont encore attendues en termes de gradient accélérateur et dissipation au champ accélérateur nominal.*
- *La deuxième axe vise à améliorer les caractéristiques fonctionnelles du Niobium massif par l'application d'une couche mince d'un matériau diélectrique ou dopant par ALD (Atomic Layer Deposition) [2]. Il peut s'agir d'un matériau isolant type AlN ou MgO permettant d'influer significativement sur les propriétés de surface du Niobium tels que le coefficient d'émission secondaire (influant le phénomène de multipacting) et le travail de sortie électronique (influant sur l'émission électronique). Il peut également s'agir du dépôt d'une couche mince d'un matériau dopant, dont la diffusion à l'intérieur du Niobium permettrait d'améliorer les propriétés supraconductrices d'une manière potentiellement plus contrôlée que le procédé actuellement utilisé par injection d'azote gaz pendant le traitement thermique.*
- *La troisième axe d'étude proposé vise à obtenir des performances encore plus élevées, en se tournant vers des méta-matériaux, c'est-à-dire des matériaux composites alliant les propriétés du niobium et celles de couches ultraminces (quelques dizaines de nm)*

dont les performances seront différentes de celles de chaque composant isolé. Il s'agit d'empilements de films supraconducteurs d'épaisseur nanométrique séparés par une couche diélectrique qui sert à découpler les couches successives, le tout déposé sur du niobium massif [1]. Le fait de disposer de couches nanométriques supraconductrices permet d'augmenter artificiellement (effet de taille dû à une épaisseur plus faible que la profondeur de London du matériau) le champ magnétique de transition du supraconducteur (et donc d'appliquer un champ accélérateur plus élevé). L'utilisation de supraconducteur à plus haute température de transition que le niobium, devrait également permettre de réduire sensiblement les pertes RF donc la charge thermique cryogénique.

Les publications des différents laboratoires contribuant fortement à la R&D et aux projets basés sur la technologie supraconductrice montrent un lien étroit et une corrélation entre d'une part les propriétés supraconductrices, mécaniques, thermiques du niobium ainsi que les traitements et les performances fonctionnelles de cavités supraconductrices d'autre part. Par conséquent le développement de banc de caractérisation aux températures cryogéniques, l'acquisition de moyens de caractérisation et un soutien technique en personnel technique qualifié auront un fort impact sur la réussite de ce projet. De plus, l'emploi de couches minces demande de disposer d'outils de caractérisations de pointes dédiés et d'une expertise matériau qui sont en cours de développement et de regroupement dans le cadre de collaborations franciliennes très actives (PANAMA, AXE SRF) entre les trois laboratoires « accélérateurs » LAL, IPNO et IRFU mais bien plus largement avec l'ensemble des grands laboratoires accélérateurs tels que le CERN, DESY, HZB, FNAL, JLAB et KEK à travers les groupes de travail dédiés « TTC- HighQ-HighG » récemment mis en place et les workshops TTC meeting.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs (1 page max. incl. figures)

Les activités liées aux traitements thermiques innovants sont aujourd'hui bien avancées. Le four sous-vide installé à l'IPNO et dédié au traitement des cavités accélératrices en Niobium a déjà prouvé à plusieurs reprises sa qualité pour ce qui est des traitements dits standards pour le dégazage hydrogène. Les premiers résultats probants en ce qui concerne les traitements innovants type infusion azote sont attendus courant 2020 pour ce qui est de la reproduction de l'état de l'art (infusion sur cavité elliptique 1.3 GHz en collaboration avec l'IRFU). Des tests d'infusion sur des structures accélératrices « bas beta » type Spoke (fréquence inférieure à 500 MHz) seront effectués en pionnier dès confirmation de l'état de l'art. Il est envisageable que ces traitements innovants pourraient être appliqués aux futurs projets déjà en phase de prototypage (PIP-II, MYRRHA). Cette R&D ne nécessite plus d'investissement important mais requiert un soutien humain (post-doctorant) et financier récurrent d'environ 25k€ par an afin de traiter et qualifier à froid les cavités traitées dans les cryostats de test à l'IPNO (Supratech).

Le développement et l'acquisition des moyens d'élaboration de couche minces par ALD et de caractérisation sont déjà en cours. Un banc d'ALD adapté aux développements et optimisations du procédé ALD sur échantillon est déjà fonctionnel sur le site du CEA-IRFU. La mutualisation des équipements de caractérisation de matériaux et surface déjà existants tels qu'un XRD (diffractomètre à Rayon X), SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer) et microscope confocal est déjà effective dans le cadre du projet de Plateforme d'ANalyse et de cAractérisation de Matériaux pour les Accélérateurs (PANAMA). L'acquisition d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé des techniques d'analyses chimique (EDS) et cristallographique (EBSD) ainsi que l'amélioration des capacités d'analyses de certains équipements déjà existants sont en cours dans le cadre du projet AXE SRF financé conjointement par la région Ile de France (SESAME) et les instituts IN2P3 (CNRS) et IRFU (CEA). Ce programme de développement des moyens d'analyse, ayant débuté en 2015 et devant se finir fin 2021, est indispensable pour conduire une activité R&D de premier plan au niveau international et en collaboration avec les laboratoires partenaires membres de la collaboration TTC. La R&D conjointe CNRS/CEA des couches minces diélectriques et supraconductrices sur cavité sera effective d'ici deux ans. Les premiers résultats sur cavités sont attendus 2021-2022. Le transfert du procédé ALD sur échantillon (opérationnel aujourd'hui) vers des géométries simples type elliptique est attendu en 2021. Le transfert vers des géométries plus grandes et plus complexes (type Spoke) nécessitera des investissements plus importants pas encore chiffrés.

4. Impact **(0.5 page max.)**

Plusieurs programmes accélérateurs internationaux tels que FCC, ILC souffrent de coûts de construction et de fonctionnement élevés ce qui freine considérablement leur développement. Il est donc encore temps de développer un effort R&D qui permettra d'apporter des solutions innovantes et pertinentes pour une réduction significative des coûts de fonctionnement et de construction des cavités SRF pour les futurs grands projets accélérateurs. Les approches synergiques proposées : multicouches et dopage à base d'ALD, permettraient de franchir un cap technologique et d'aller au-delà des résultats obtenus aujourd'hui.

Références

- [1]: "Nitrogen and Argon doping of Niobium for superconducting radiofrequency cavities: a pathway highly efficient accelerating structures", A. Grasselino et al., Supercond. Sci. Technol. 26, p102001, 2013.
- [2]: "Improvement and protection of Niobium superconductivity by atomic layer deposition and heat treatment", T. Proslie et al., Appl. Phys. Lett., 93, 192504, 2008.
- [3]: "Enhancement of RF breakdown field of superconductors by multilayer coating", A. Gurevich, Appl. Phys. Lett., 88, 012511, 2006.