

Materiali Superconduttori

Giovanni Giunchi

(Giovanni.giunchi@gmail.com)

12 Lezioni per il XXXVII Corso di Dottorato DISCA dell'Università INSUBRIA , Como

TITOLO DELLE LEZIONI E CALENDARIO

- Cenni storici	10 Marzo 2023
- I principi della Superconduttività	"
- Le proprietà superconduttive	"
- I materiali superconduttori a bassa temperatura (LTS)	17 Marzo 2023
- I materiali superconduttori ad alta temperatura (HTS)	"
- MgB ₂ (Ia parte)	"
- MgB ₂ (IIa parte)	24 Marzo 2023
- MgB ₂ (IIIa parte)	"
- Applicazioni superconduttive commerciali	"
- Future applicazioni elettrotecniche	31 Marzo 2023
- Future applicazioni elettroniche	"
- Criogenia per I nuovi materiali superconduttori	"

TESTI CONSIGLIATI

M.Wilson «Superconducting Magnets» (Oxford Science Publications, 1983)

M. Tinkham «Introduction to Superconductivity» (II ed. Mc Graw-Hill,1996)

C. Krabbes et al. « High Temperature Superconductor Bulk Materials» (Wiley-VCH,2006)

Y. Iwasa «Case Studies in Superconducting Magnets» (II ed. Springer Science , 2009)

R. Flukiger «MgB₂ superconducting wires: Basics and Applications» (World Scientific, 2016)

INTRODUZIONE ALLE LEZIONI

Giovanni Giunchi

Importanza dello sviluppo dei materiali per applicare la Superconduttività

La Superconduttività iniziò nel 1911, all' Università di Leiden (Nederland), ad opera del professore Kamerlingh Onnes, subito dopo la liquefazione del gas He da lui ottenuta alla temperatura criogenica di 4.2K (R.T. = 296 K). Dopo i primi esperimenti sulla scomparsa della resistività per alcuni metalli alla temperatura di liquefazione dell'He, egli presto scoprì che questo comportamento era limitato a basse densità di corrente ed a bassi campi magnetici.

L'applicazione della superconduttività iniziò dopo più di 50 anni, dopo la scoperta di materiali superconduttori che potevano lavorare in alti campi magnetici. Il primo materiale usato per la costruzione di un magnete superconduttore ad alto campo (circa 2.5 Tesla) fu una lega di Nb (Nb_3Sn), avente Temperatura Critica $T_c=18$ K. Dopo questo risultato, altre leghe metalliche furono testate e la scelta preferenziale cadde sul NbTi ($T_c=9$ K). Questa lega evitava la fragilità del Nb_3Sn , anche se possedeva una minore T_c e minori caratteristiche in campo magnetico.

NbTi e Nb_3Sn sono ancora oggi i principali materiali per le applicazioni superconduttive. I loro cavi sono usati per costruire magneti per gli esperimenti di fisica (Acceleratore LHC), magneti per l'analisi medica (Immagini di Risonanza Magnetica) e nei laboratori chimici, magneti ad altissimo campo per le analisi di Risonanza Magnetica Nucleare.

Tutte le applicazioni elettrotecniche sperimentate con questi materiali di bassa temperatura critica (LTS) (treno superconduttore a levitazione, cavi per la trasmissione di alte correnti, motori superconduttori, limitatori di correnti di guasto, trasformatori etc.) non hanno avuto risultati sia dal punto di vista pratico che tecnico, per la necessità di usare una criogenia basata sull'elio liquido.

Iniziando dal 1986 furono scoperte nuove classi di materiali superconduttori (basati sugli ossidi di Cu: i cuprati) con temperature critiche fino a 100K ed oltre. Dal 2001 molte altre classi di materiali mostrarono T_c intermedie (MgB_2 con $T_c=39$ K, materiali a base Fe ($T_c=20$ K ÷ 58K), materiali organici (T_c fino a 33K). Tutti questi materiali aprono la speranza di evitare la criogenia dell'elio liquido, in particolare i cuprati, aventi una T_c superiore al punto di liquefazione dell' N_2 (77K).

Queste nuove classi di superconduttori hanno una consistenza ceramica e richiedono tecniche sofisticate di formatura, come ad esempio la deposizione multipla di film sottili per realizzare utili nastri non fragili oppure trattamenti termici prolungati in atmosfera controllata dell'ordine dei giorni. Nel corso delle mie lezioni descriverò le caratteristiche chimico-fisiche principali di questi materiali e presenterò le ricerche in corso per superare le principali difficoltà per la loro applicazione.

Dal punto di vista teorico e modellistico farò un accenno ai diversi modelli interpretativi della superconduttività dei metalli, iniziando dalle descrizioni semiclassiche alla teoria completa quanto-meccanica.

La mia scelta preferita tra i materiali superconduttori: Magnesio diboruro

Il magnesio diboruro è oggi il materiale superconduttore potenzialmente più economico ed ambientalmente valido tra i superconduttori a media o alta temperatura critica ($T_c > 20$ K). La sua sintesi e densificazione può beneficiare di una nuova e facile tecnica preparativa, ideata nei laboratori Edison in Italia nel 2001 e basata sulla Infiltrazione Liquida Reattiva (RLI) di Mg in preforme di polvere di boro. Con questa tecnica è possibile ottenere manufatti di alta densità, aventi proprietà superconduttive e meccaniche ottimali. Nelle mie lezioni presenterò gli aspetti peculiari della tecnologia di infiltrazione ed esempi di corpi massivi di grandi dimensioni, che sono unici nel panorama dei superconduttori di alta temperatura. Le fibre cave e relativi cavi ottenuti

col processo RLI sono oggi oggetto di ricerca per ridurre lo spessore dei filamenti sotto i 10 micron, per permettere il loro avvolgimento nello stato reagito superconduttivo. Queste ricerche apriranno la strada alle applicazioni superconduttive di tipo elettrotecnico, su scala mondiale.

Descrizione delle applicazioni presenti e future della superconduttività

Lista degli odierni materiali superconduttori commerciali che sono usati nelle applicazioni a bassa temperatura.

Present commercial main applications

- **Long magnets for physics** (Large Hadron Collider), working @ 1.8K and 8 Tesla , using NbTi cables
- **High bore magnets for human body MRI** (Magnetic Resonant Imaging), working @4.2K and 3T-5 T , using NbTi cables
- **High field magnets for NMR chemical analysis** , working @4.2 K and 8T-11T, using Nb₃Sn cables
- **Radiofrequency Cavities for accelerating charged particles**, working @ 1.8K- 4.2K , using Nb bottle-like thick systems
- **Magnetic sensors** (SQUID=Superconducting Quantum Interference Device), working @ 4.2K, by using Nb or other LTS thin film

Di seguito è riportata una lista delle future applicazioni, originate dalla ricerca dei materiali ad alta temperatura

The electromechanical future applications

- Superconducting motors/generators
- Levitating transportation
- Fault Current Limiters
- Mechanical and Electrical Energy Storage
- High bore magnets for Intermediate field (< 5 Tesla)
- High Direct Current transportation
- Low frequency Magnetic field shielding

Problematiche criogeniche per le applicazioni superconduttive alle temperature intermedie

Il modo più efficiente per mantenere freddo un corpo è inserirlo in un bagno refrigerato. Ma la scelta di un liquido criogenico a temperature utili per i superconduttori attuali è limitata (H₂ a T≈18K, Ne ≈27K, N₂≈77K) e, in molti casi, presenta problemi economici e di sicurezza. Pertanto, la criogenia più pratica per i nuovi superconduttori si basa sui sistemi termo-meccanici, i criorefrigeratori, che agiscono non per immersione in un bagno freddo, ma per conduzione attraverso il contatto con una testa refrigerata, mantenuta a temperatura costante. Anche se molti criorefrigeratori sono stati sviluppati e sono commerciali, il loro potere refrigerante è generalmente limitato a piccoli volumi. Inoltre, nelle applicazioni superconduttive, deve essere garantito un ottimo contatto termico tra testa fredda e superconduttore, per evitare le sue instabilità termiche. In alcune applicazioni anche le vibrazioni del criorefrigeratore possono essere dannose. Verrà presentata una rassegna degli sviluppi più recenti della criogenia e dei relativi sistemi criogenici, utili per le applicazioni superconduttive.

Como, 19/10/2022