درجه حرارت کرایوجنیک
و
مـــوارد اســـتعمال آن

ترجمه : محمدرضا اسلامی

تکنولوژی درجات حـرارت پائین که تاچندی پیش فقط محدود به مایع کردن وتصفیه نمودن گازها بود بسرعت به رشته های کامل ومختلفی بسط داده شد، استفاده در ساختمان ماشین های الکترونیکی وآمپلی فایرهای میکروموج ذخیره کـردن رادیکالـهای آزاد وهمچنین تهیـه میدانهای مغناطیس قـوی برای راکتور هـای Thermonuclear نمونه هائی ازاین مورد است.

تعداد لابراتوارهای متعدد اعم ازتحقیقاتی و یا صنعتی که ازخواص درجه حرارتهای پائین استفاده میکنند در ده ساله اخیرسریعاً زیـاد شده وتکنیک های جدیدی بطورمداوم درحال توسعه میباشد.

بعنوان تاریخچه: درسال ۱۹۵۰ ازموسسهٔ National Bureau of Standards N.B.S خواسته شده که به موسسهٔ Los Alamos - Scientific Laboratory (که بوسیله دانشگاه کالیفرنیا برای کمیسیون انرژی اتمی آمریکا کار میکرد) در مورد یك پروژه تحقیقاتی بـــزرگ که مربوط به موارد استعمال تکنیك درجـــه حرارت پائین بوده کمك کند.

به این دلیل لابراتوارکرایوجنیك N.B.S در Bulder واقع در Colorado تاسیس شده وعملیات واقعی در بهار سال ۱۹۵۲ شروع گردیده است. این لابراتوار تامدت زیادی بزرگترین لابراتواری بود که برای تحقیق درمهندسی کـرایوجنیك طرح شده بود.

بطورکلی قدری مشکل است که یك درجه حرارت معین رابعنوان حدی بین مهندسی تبـرید و مهنـــدسی کـرایوجنیك تعیین نمود ولی شاید بتوان گفت که مهندسی کرایوجنیك بطور کلی مربوط میشود به درجه حرارتهائی کمتر از -150^{oC} ویا 123^{oK} دراین درجات حرارتـــهای پائین تغییرخواص فیزیکی مصالح بشرح زیرمیباشد

A ــ بعضی ازمصالح مهندسی دردرجات حرارتی پائین خیلی شکننده میشوند. ایـــن مسئله درمورد فولادکربن داروچند جسـم دیگر صـادق است که شکستگی مصالح مهندســی درنقاط خیلی سرد بدین سبب میباشد. البته مصالح بغیرازآهن وآلیاژهای آهـــن مثـــل آلومینیم ــ مس و نیـــکل در رنـــج (rang) کرایوجنیك بخوبی رفتارمیکند.

B ــ حرارت تبخیرمایعاتی که در درجات حرارت پائین میجوشند کاملا کوچك میباشد ۰ وبنابراین چنین مایعاتی رامیتوان فقط در ظرفی که خیلی خوب عایق بندی شده باشد نگاهداشت ۰

C ــ مقاومت الکتریکی فلزات خالص در درجات حرارتی پائین بی نهایت کم میباشد ۰ بعضی فلزات درکمتراز درجات حرارتی معینی دارای مقاومت الکتریکی صفرمیشوند ۰ این فنومن باسم سوپرکندکتیویته (Superconductivity) نامیده میشود وبنظرمیرسدکه شاید این پدیده قابل توجه و شگرف بعدها موارد استعمال مهمی درصنعت پیدا کند ۰

D ــ هدایت حرارتی بیشترفلزات خالص و جامدات تك کریستالی ((Monocrystalline در درجات حرارتی پائین خیلی زیاد میشود وماکزیمم مقدار راپیدا میکندکه ممکنست مقدارش چندین برابرمقدارآن در درجه حرارت عادی باشد ۰

E ــ حرارت مخصوص غالب مایعات وجامدات دراثرنقصان درجهٔ حرارت کم میشود ودر درجه حرارت خیلی کم بینهایت کوچك میگردد ۰

● موارد استعمال صنعتی کرایوجنیك :

یکی ازبزرگترین موارد استعمال صنعتی کرایوجنیك مجزاکردن گازها ازیکدیگرمیباشد ۰ برای مثال سالهاست که کارخانجاتی بامقیاس وسیع هوارامایع کرده وسپس بوسیله تقطیراجزاء متشکه آنرامجزامیکند ۰ بدین ترتیب باتحولاتی که تاکنون انجام شده تعداد زیادی ازگازهای کمیاب که درهوا موجود بودند شناخته واسم گذاری شده اندکه عبارتند از :

نئون ــ آرگون ــ کریپتون ــ ویا گازهلیوم خالص ازگازطبیعی helium-bearing

● کرایوجنیك درپرتاب موشك

بوسیله مهندسی کرایوجنیك اولین پروازطویل المدت وموفقیت آمیز موشك ها انجام شد ۰ یعنی برای بیشترازپانزده سال اکسیژن مایع بعنوان اکسیدانت درسوخت موشك استفاده شد ۰ البته درآینده ممکن است ازمایعات کرایوجنیك دیگری برای سوخت موشك استفاده نمود ۰

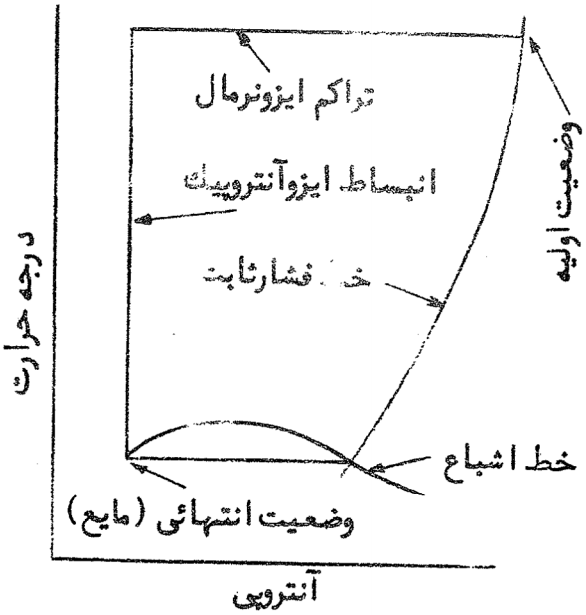
● قسمت اول

● موارد استعمال درجه حرارت کرایوجنیك

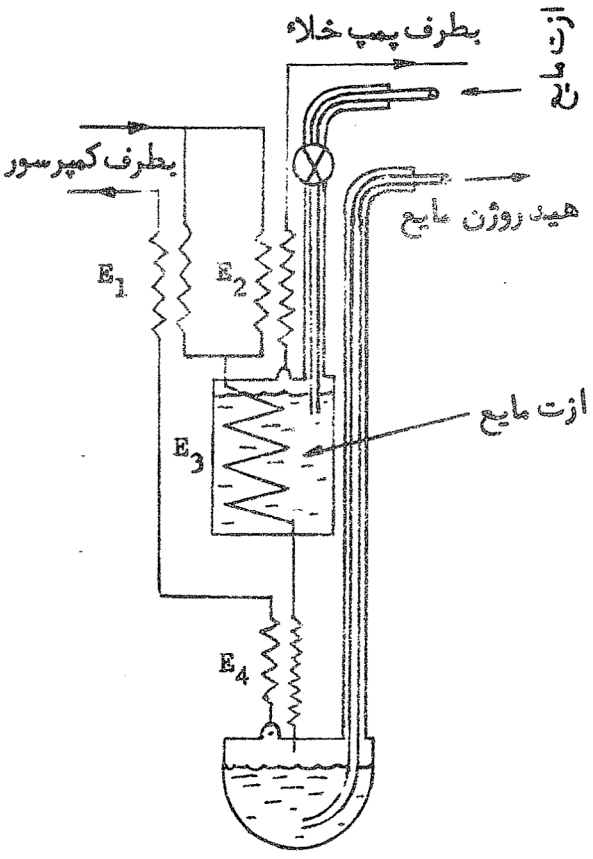
۱۰۱ مایع کردن گازها ــ تبرید که یك تحول سرمازاست برای مایع کردن گازها مناسب است منوط برآنکه باهزینه وانرژی کم وچون میعان گازها باید بوسیله قوانین تبرید انجام گیرد ماگزیمم راندمان تئوری درشرایط یك تحول رورسیبل ترمومتامیکی است (شکل ۱) صرفنظر ازاینکه عملاً تراکم ایزوترم وانبساط ایزوآتروپیك کامل میسرنخواهد بود ۰

دیاگرامی ازمدار ــ هلیوم مایع ژول ــ تومسون درشکل (۲) نشان داده شده ۰ برای ماده بیشتربه Ref.2 مراجعه شود ۰

درآمریکابرای سوخت بیشترموشك ها ازهیدروژن واکسیژن مایع استفاده میشود واین سیستم مرتبا درحال توسعه وگسترش است ۰ البته چون تانك



شکل ۱



شکل ۲ــ دیاگرام تهیه هیدروژن مایع

تحت فشارمحتوی این مایعات کرایوجنیک اغلب درصد قابل ملاحظه ای ازوزن موشك را تشکیل میدهد تخمین وزن آن درموقع ساخت راکت با مشکلاتی مواجه میشود ۰

یك متد تجربی بوسیله شخصی بنام T.C.Shupert که درکمپانی Martin کارمیکرد برای تعیین دانسیته مایع کرایوجانیك بدست امده وبرای تعیین وزن یك حجم معلوم ازمایع دریك شرایط تعادل بکارمیرود ۰

● ۲ــ۱ کرایوجنیك درمسائل فضائی شکست هائی که درامورفضائی برای پرتاب قمرهای مصنوعی وراکت ها بعلت نشناختن تاثیر فضا بوقوع پیوسته مقدارزیادی ازنیروی انسانی راتلف کرده است وهمین تجربیات بوده که باعث شده است دوباره تمام سیستم های فوق رابرای به‌می نیم رساندن شکست درآزمایشها درروی زمین ودرمحیطی شبیه به محیط فضا آزمایش کنند ۰ عوامل شکست بطورکلی دوچیز بود یکی قلت دانسیته فضای خارج نتیجتاً انتقال حرارت فقط بطریق تشعشع ودیگری درجه حرارت بسیارکم محیط فضا که اینها دو تواماً باعث میشد اشکالات زیردرخصوص موشکها یا اقمارمصنوعی پیش آید :

اول اینکه چون درجه حرارت خیلی کم است عایق هائی که درمدارهای الکترونیکی موشکها یا قمرهای مصنوعی وجود دارد ترد وشکننده شود ودرنتیجه ریخته شده باعث اتصال کوتاه در مدارالکتریکی گردد ۰

دوم ــ این است که اصولاً وقتی یك دستگاه الکتریکی کارمیکند بعلت وجود مقاومتهای داخلی قسمتهای مختلف آن گرم میشود درصورتیکه

وسیله الکتریکی در فضائی شبیه بفضای زمین باشد گرمای حاصله را ازسه طریق هدایت کنوکسیون وتشعشع ازخود دورکرده وبه یک حالت تعادل بافضای مجاورمیرسد ولی چنانچه وسیله الکتریکی خود قسمتی ازیک موشک یاماه مصنوعی باشد بعلت اینکه درفضا فقط بطریق تشعشع میتواند انتقال حرارت دهد لحظه به لحظه گرمترشده بحدیکه گرمای حاصله پس ازمدتی یاباعث ذوب شدن قسمتی ازمدار ویاآتش گرفتن آن میشود .

سومین اشکالی که پیش میآید گرم شدن بیش از حد قسمتی ازموشک یاقمرمصنوعی است که در معرض تابش اشعه خورشید قرارمیگیرد .و بعلت ناتوانی درانتقال حرارت مرتباً درجه حرارت آن بالا میرود تابه درجه حرارت قرمزمیرسد درست طرف مقابل موشک که درسایه قرارداد بعلت اینکه درجه حرارت فضاخیلی پائین است مرتباً سرد شده نتیجتاً دردوطرف موشک یاقمر اختلاف درجه حرارت خیلی زیادی بوجود می اید وباعث تحریک آن میشود .

مهندسی کرایوجنیک درنمود فضائی دو مورد استعمال اصلی داردیکی ایجاد محیطی از نظرسرما شبیه به محیط فضادیگری ایجاد محیط ملکولی شبیه به محیط فضا (چون حرکت ملکولی درمحیط کرایوجنیک فرق میکند) .

● ۳ــ۱ مورد استعمال مجموعه هلیوم مایع و گازی برای تهیه محیطی شبیه فضای واقعی. بعلت کم بودن بی نهایت کوچک دانسیته گاز درفضابین کرات هدایت حرارت فقط ازطریق تشعشع انجام میگیرد (کنوکسیون وهدایت بی نهایت کم انجام میشود) .

مطالعه درباره این فنومن هم اکنون ادامه دارد ولی اینتجربه بطورخیلی ایده آلی باید درشرایطی کاملاً شبیه فضای خارج انجام شود درغیراینصورت ممکنست اشتباهاتی که قبلاً نمیتوان پیش بینی نمود وفقط درمحیط فضای واقعی وجود دارد پیش بیاید . شرایطی کمبرای ایجاد محیطی شبیه فضای واقعی باید بوجود آورد بترتیب زیراست : ۱ــ طیف تشعشعی امواج الکترومغناطیس که ازخورشید ساطع میشود .

۲ــ فشارود انسیته کم فضا (تقریبا 10^{-14} mmHg)

۳ــ تشعشع سیاه که درفضاوجود دارد وازازت خیلی کوچک کمبا سرعت زیاد حرکت میکنند تشکیل شده وبهرجسمی که برخورد نماید سوراخ میکند ودرزمین دردرجه حرارتی حدود $4^{\circ}K$ بوجود میآید . این اشعه ازدونوع ذره درست شده است یکی Midroit که ازذرات بزرگتروسرعت کمترتشکیل شده ودیگری Micomidroit میباشد که ازذرات ریزوبا سرعت زیاد بوجودآمده وازهر جسمی رد میشود) . بمنظورتامین شرایط از یک قوس الکترود کربن استفاده میشود .قوس الکتریکی که بین دوالکترود کربن زده میشود تشعشع عیناً نظیرآنچه که خورشید درفضای خارج اتمسفرد رست میکند بوجود میآوردکه ازطول موج ۳۰۰۰ تا ۳ M میباشد . (٤) این تشعشع ازمیان یک محفظ دوبل کوارتزعبورکرده سپس ازمیان دودیسک محیط کرایوجنیک رد شده

وارد محیط مدل میگردد . این سیستم شدت راباندازه یك واحد تشعشع سالیانه (1 Solar) با 3% تغییرثابت نگهدارد (٤) شرایط ۲و ۳ رادریك زمان بوسیله تهیه دیوارهائی پوشیده ازمایع کرایوجنیك که هلیوم مایع میباشد ایجاد میکنند . این دیوارهای کرایوجنیك دوعمل انجام میدهد . یکی اینکه تولید سرماکرده ومحیط را کرایو جنیکی مینمایندودوم اینکه مانند یك پمپ ایجاد خلاء نسبی ویافشارکم میکنند .

● ٤ـ۱ـ مایعات کرایوجنیك

درصورت نبودن ثقل

درابتدای دوره فضایعنی درسال ۱۹۵۸بوسیله (Mankouski) روی این متدتوجه شدوتحقیق تئوری دراین رشتهبوسیله (Benedict) درسال ۱۹۵۹ انجام شد برای آزمایش ازتجربیات Drop (یعنی رهاکردن یك جسم فقط دریك لحظه)آزمایش پروازهواپیما (یعنی خاموش کردن هواپیمادر حین پروازبرای یك لحظه)وتأثیرمایعه مایع استفاده شد . مایعات کرایوجنیکی مثل اکسیژن مایع،هیدرژن مایع وهلیوم مایعدرحالی که داخل یك ظرف ازفولادزنگ نزن ویا شیشه ریخته شودزاویهٔ اتصالشان (زاویهٔ بین بخار ومایعدرظرف)صفرمیشود درنتیجه تجربیاتی که تاکنون انجام شده رفتارمایع کرایوجنیكدر یك ظرف فولادی تحت الشعاع کشش سطحی (Surface tention) قرارگرفته ودر حالیکه $g=0$ باشد .

(یعنی درصورت نبودن ثقل) کشش سطحی بستگی به شکل ظرف زاویه تماس و نسبت حجم مایع به بخار دارد . بعلت تغییرجهت کپسول های یك راکت (برای تغییرجهت راکت یا کپسول ازچندین نوزل که دراطراف کپسول میباشد استفاده میکنند)مایع سوخت تحت تاثیر تلا طمهائی قرارمیگیرد .

تاثیرحرکت های Pitch و yaw و roll بدین ترتیب است که مایع سوخت بطرف بخار سوخت که روی آن قرارگرفته کشیده شده و همچنین بخاربصورت حبابهائی وارد مایع‌سوخت میگردد که البته جهت این حرکت بطرف مرکز دوران میباشد بعلت این حرکت یك نوسان‌از حبابهای خلاءایجاد میشودکه این نوسان از سه نظرروی حبابهااعمال میشود ۱ـ طولی ۲ـ دورانی ۳ـ پهن شدن . این عمل یك سیکل راطی پیماید . پریود نوسان ـ یعنی T ودامنه تغییرات حبابها τ ازرابطه زیر بدست میآید . $T=c_1\sqrt{\rho D^3}$ (۱) $\tau=c_2\varphi D^2$)

که c_1 و c_2 اعداد ثابت بوده و D قطرحباب کره‌ای و $f=\frac{\rho}{a}$ یا $\frac{\text{دانسیته}}{\text{کشش سطحی}}$ و $\varphi=\frac{\rho}{\mu}$ یا $\frac{\text{دانسیته}}{\text{ویسکوزیته}}$ میباشد

● ٥ـ۱ سوپرکند اکتورها

یك جسم سوپرکند اکتورجسمی است که درکمتر ازیك درجه حرارت معین T_c کلیه مقاومت الکتریکی خود راازدست میدهد این فنومن درمورد تقریباً بیست عنصرفلزی وچند صد آلیاژوترکیب دیده شده است برای عناصر فلزی مقدار T_c به کمتراز 9^oK وبرای آلیاژها و

ترکیبات دیگربه $18^{o}K$ محدود میشود (٦) بهرحال جریانهائی‌که دارای تناوب میباشند (جریانهای آلترناتیو) دراثرعبور از سوپر کند اکتورها تلفات پیداخواهند کرد ٠

مقاومت سطحی درسوپرکند اکتورها خیلی کم بوده واصول آن باتئوری دوسیال تشریح میشود.

● ٦ــ١ تاثیرمیدان مغناطیس اتلاف سوپرکند اکتیویتی

درموقعی که میدان مغناطیسی نداشته باشیم سوپرکند اکتورپایداربوده وانرژی‌آزادی دارد $F_s(T)$ ودرصورتیکه میدان مغناطیسی اثرکند انرژی آزاد فازسوپرکند اکتیو به حدآستانه (Threshold) میرسد (این‌حدآستانه حدی است‌که دوبارمقاومت سوپرکند اکتوربوجود میآید ٠) دراین‌نقطه انرژی آزادکلی سوپرکند اکتیومساوی انرژی‌آزاد فازنرمال $F_n(T)$ میشود (یعنی باازدیاد میدان مغناطیسی سوپرکند اکتیویته‌ازبین‌میرود) ودوفازبحال تعادل درمیآیند ٠

درمیدانهای مغناطیسی که بیشترازمقدار آستانه باشد فازنرمال‌پایدارمیماند ٠

یك جسم سوپرکند اکتیود رکمترازدرجه حرارت T_c کاملاً دیامغناطیس‌شده وتاموقعی‌کمیدان مغناطیس به H_c نرسیده باشد جسم خاصیت سوپرکند اکتیویته خود راحفظ خواهد نمود ٠

دربیشترازاین مقدار H_c جسم خاصیت سوپر کند اکتیوی خود راازدست میدهد و درنتیجه دوباره به وضعیت عادی برمیگردد ٠ بستگی H_c ودرجه حرارت درطبیعت بطورتقریبی یك پاراپولیك میباشد ٠

$$H_c=H_o\left(1-\frac{T^2}{T_c^2}\right)$$

که H_o میدان بحرانی درد رجه صفرمطلق است تفاوت انرژی آزاد برحسب واحد Gibbs بین دووضعیت درمیدان مغناطیس‌صفرازرابطه زیربدست میآید ٠ $G_n(o)G_s(o)+\frac{Hc^2}{8\pi}$ که H_c بادرجه حرارت وفشارتاحدودی رابطه دارد ٠ تفاوت درآنتروپی نزدیك صفرمطلق بین وضعیت فازسوپرکند اکتیوی وعادی‌مستقیما به ٢ حرارت مخصوص‌الکترونیك بستگی دارد:

$$(S_s-S_n)_{T\to o}=-\gamma T$$

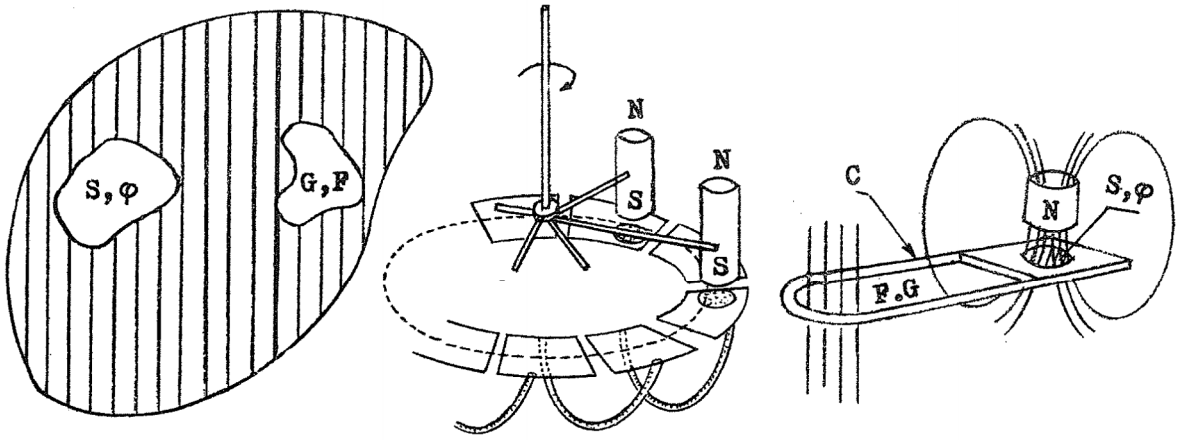
یك نفوذ جزئی ازمرتبه 10^{-6} سانتیمترازیك میدان مغناطیس برای همه مصالح سوپرکند اکتیوپیدا شده که بوسیله عمق نفوذ λ مشخص‌میشود و توسط رابطه نیمه تجربی زیربادرجه حرارت بستگی پیدامیکند ٠

$$\lambda=\lambda_o\left[1-\left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right]^{-\frac{1}{2}}$$

که λ_o عمق نفوذ درصفردرجه مطلق میباشد

● ٧ــ١ جنراتورهای جریان مستقیم

همانطورکه اصول کاراین جنراتورهادرشکل(٣) نشان داده شده یك سوپرکند اکتورد ارای د و سوراخ S و G است‌که بترتیب درهرکدام‌فلوی مغناطیسی φ و α موجود میباشد ٠ درسوپر کند اکتورهاناحیه‌نرمال‌به حفره‌ای که درداخل آن وجود داردگفته میشودومیتوان انهارابوسیله حرارت دادن نقطه مزبوردربالاترازدرجه حرارت بحرانی‌ویابوسیله میدان مغناطیس‌که



شکل (۳) اصول کار جنراتور سوپرکند اکتور

بالا تر از میدان بحرانی باشد در نقطه مزبور ایجاد نمود ۰ البته این حفره ای که بدین ترتیب در داخل سوپرکند اکتور بوجود میآید میتواند در داخل سوپرکند اکتور بحرکت درآید زیرا این حفره منبع حرارتی یا مغناطیسی مولد را تعقیب میکند ۰ بنابراین اگر S حفره‌ای باشد که بدین ترتیب در سوپرکند اکتور بوجود آمده میتوان آنرا بطرف حفره G حرکت داد و در نتیجه از داخل کردن آنها در یکدیگر فلوی مجموعه ای برابر Φ به دست آورد ۰ پس بدین ترتیب میتوان فلوی مغناطیسی را تغییر داد ۰ وچنانچه این تغییر فلود را طراف سیمی باشد جریانی در اطراف آن بوجود خواهد آمد. با استفاده از این خاصیت جنراتورهای جریان مستقیم را باراندمان بیشتر ساخته اند.

● ۸ ـ ۱ یکسوکننده های سوپرکند اکتور (۸) تئوری یکسوکننده های سوپرکند اکتور بر روی مقاومت اتصالی یا (Resistance switching) یك وضعیت سوپرکند اکتیوی (مقاومت صفر) و یك وضعیت عادی (مقاوم) وبرعکس گذاشته شده ۰ که بوسیله تغییرات شدت یك میدان مغناطیسی احاطه بر المان سوپرکند اکتور انجام میگیرد ۰

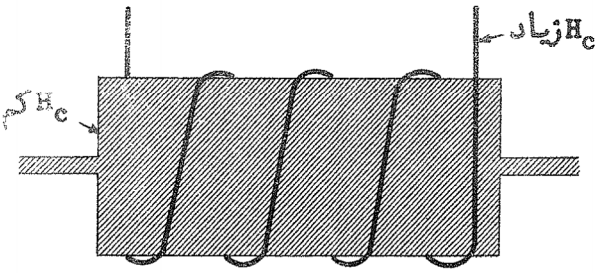
مقاومت المان تا موقعی که میدان مغناطیسی در روی سطح المان به مقدار بحرانی H_c برسد صفر میماند ۰ وقتی که میدان مغناطیسی از این مقدار تجاوز کند مقاومت نرمال ظاهر میشود و المان سوپرکند اکتور (کشته) میشود ۰ این مقاومت دوباره در صورتی که میدان مغناطیسی کمتر از مقدار H_c گردد از بین میرود ۰

کشش المان در اثر میدان بحرانی H_c را بدو طریق میتوان انجام داد ۰ یا اینکه میدان بحرانی به المانی که حامل جریان میباشد تأثیر کند و یا اینکه میدان بحرانی بوسیله جریانی که در خود المان عبور میکند تولید شود ۰ مقدار این جریان که باعث میشود در اثر عبور آن از المان میدان بحرانی تولید شود ۰ جریان بحرانی I_c خوانده میشود ۰ در موقعیکه هم میدان خارجی روی المان تأثیر کند وهم میدان مغناطیسی در اثر عبور جریان از خود المان در اینصورت میدان مغناطیسی منتجه جمع بُرداری د و

میدان خواهد بود . وقتیکه این میدان منتجه به مقداربحرانی H_c برسد المان کشته خواهد شد .

درحالت کلی میتوان المان رابوسیله یك لایه سیم سوپرکند اکتیوکه روی آن بشکل یك سولونوئید پیچیده شده کنترل نمود . جریان مستقیم در سولونوئید پیچیده شد متولید میدان مغناطیسی بحرانی میکند . سیم پیچی کنترل ازجسمی است که یك H_c بیشتری ازالمان داخلی دارد وبنابراین سیم پیچی کنترل دروضعیت سوپرکند اکتیو باقی میماند .

درشکل (٤) اصول کاراین یکسوکننده نشان داده شده است .



شکل (٤)

لیست ریفرنسها :

2. C.J.Gorter,"Progress in Low Temperature Physics",North-H olland Publishing Company,Amsterdam,Volume II.

3. B.D.Henshall,"A Cryogenic Low Density Wind Tunnel", in"Advances in Cryogenic Engineering",Volume7,PP.85.

4. H.Mark & R.D.Sommers,"The Combined Use of Liquid and Gaseous Helium to Provide Near Actual Space Environment",in"Advances in Cryogenic Engineering",Volume 8,PP,93.

6. H.A.Schwettman,P.B.Wilson," The application of Superconductivity to Electron Linear Accelerator",in "Advances in Cryogenic Engineering", Volume 10,PP.88.

7. S.L.Wipf,"A Superconducting Direct-Current Generator",in " Advances in Cryogenic Engineering",Volume9,PP.342.

8. J.R.Purcell & E.G.Payne," Superconducting Rectifiers",in"Advances in Cryogenic Engineering", Volume 6, PP . 149.

دنباله این مقاله در شماره آینده .