

به نام خداوند مهربان



دانشکده‌ی فیزیک
گروه فیزیک

دستور کار آزمایشگاه فیزیک حالت جامد پیشرفته

نگارش

دکتر مرتضی مظفری

نیم‌سال اول ۰۰-۹۹

فهرست

- آزمایش شماره ۱: ابرسانی ۳
- آزمایش شماره ۲: پاسخ مواد پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس به یک میدان مغناطیس ساکن
نایکناخت ۱۳
- آزمایش شماره ۳: رسم چرخه‌ی پسماند یک هسته‌ی آهنی ۲۰
- آزمایش شماره ۴: اندازه‌گیری مغناطوتنگش با تداخل سنج مایکلسون ۲۷
- آزمایش شماره ۵: باتری خورشیدی ۳۴
- آزمایش شماره ۶: ویژگی‌های مکانیکی جامدها: کش‌سانی فلزها ۳۹
- آزمایش شماره ۷: ویژگی‌های مکانیکی مواد؛ سختی‌سنجی ۴۵
- آزمایش شماره ۸: فیزیک نیم‌رساناها: بررسی وابستگی منحنی جریان-ولتاژ (V-I) یک فوتومقاومت به طول
موج ۵۵
- آزمایش شماره ۹: آشنایی با برخی از پدیده‌های برق‌گرمایی (Thermoelectric) ۶۲
- آزمایش شماره ۱۰: بررسی ساختار بلورین تنگستن با میکروسکوپ گسیل میدانی ۶۸
- آزمایش شماره ۱۱: تشدید اسپینی الکترون ۷۴

آزمایش شماره ۱

ابرسانایی

زمینه نظری آزمایش:

ابرسانایی پدیده‌ای است که در دماهای پایین در برخی از مواد رخ می‌دهد. در حالت ابرسانایی مقاومت الکتریکی ماده صفر می‌شود و ماده ویژگی دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند. یعنی نمونه خطوط القایی مغناطیسی را به درون خود راه نمی‌دهد و این تنها تفاوت اصلی یک ماده‌ی ابرسانا با یک رسانای کامل است. زیرا در یک رسانای کامل در دمای صفر خطوط القایی مغناطیسی می‌تواند به درون آن راه یابد.

در مواد ابرسانا، پدیده‌ی ابرسانایی زمانی پدیدار می‌شود که دمای ماده، T از یک دمای بحرانی، T_c کم‌تر شود. دمای بحرانی بستگی به جنس ماده دارد و از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر تغییر می‌کند. دمای بحرانی عناصری که ابرسانا می‌شوند، کوچک‌تر از ۲۰ کلوین است. اما ترکیب‌های دیگری وجود دارند که می‌توانند دمای بحرانی‌ای به بزرگی ۱۶۰ کلوین داشته باشند. برای نمونه ترکیب $(La.Ba)_2CuO_4$ ابرسانایی با دمای بحرانی ۳۰ کلوین است که برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ مولر و بدنورز کشف کردند. به این ابرساناها، ابرساناهای دما بالا (HTSC) می‌گویند. همچنین ابرساناهای دمای بالای دیگری بر پایه‌ی جیوه کشف شده‌اند که دمای بحرانی آنها نزدیک به ۱۶۰ کلوین است. نظریه‌های موجود ابرسانایی نمی‌توانند ابرسانایی دمای بالا را، که با نام ابرساناهای نوع ۲ (Type II) شناخته می‌شوند، توضیح دهند. در کاربرد ابرساناهای دمای بالا پرکاربردترند، زیرا در دماهایی ابرسانا می‌شوند که ساده‌تر می‌توان ایجاد کرد. پژوهش برای یافتن موادی که دمای بحرانی آنها باز هم بیشتر باشد و همچنین برای یافتن نظریه‌ای برای توضیح ابرسانایی دمای بالا همچنان ادامه دارد.

ویژگی ابرساناها

در حالت ابرسانایی، ابرسانا ویژگی‌های ویژه‌ای پیدا می‌کند. ناپدید شدن مقاومت الکتریکی، دیامغناطیس کامل شدن (اثر مایسنر)، تغییر بزرگ در ویژگی‌های گرمایی و پدیده‌های دیگر از جمله این ویژگی‌هاست. ابرساناها می‌توانند جریان را بدون نیاز به هیچ ولتاژی برای زمان‌های طولانی در یک حلقه نگه دارند. این ویژگی در آهن‌رباهای ابرسانایی، مانند آنچه در دستگاه‌های MRI هست، به کار می‌رود. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که یک جریان می‌تواند در پیچ‌های ابرسانایی بی‌هیچ اتلافی، سال‌ها بماند.

اثر مایسنر

رانده شدن خطوط القای مغناطیسی و شناور شدن یک ابرسانا بر روی یک آهن‌ربا، یا آهن‌ربا بر روی یک ابرسانا، به نام اثر مایسنر شناخته می‌شود. اگر ابرسانا را در یک میدان مغناطیسی بیرونی ضعیف H قرار دهیم، میدان تا عمق کم (λ) در ابرسانا پیشروی می‌کند که عمق نفوذ لندن نامیده می‌شود. پس از این مسافت، میدان به سرعت به صفر میل می‌کند. برای بیشتر ابرساناها عمق نفوذ لندن نزدیک به ۱۰۰ نانومتر است. اثر مایسنر را نباید با اثر دیامغناطیس که در برخی از رساناها وجود دارد اشتباه گرفته می‌شود: طبق قانون القای فارادی اگر

یک میدان مغناطیسی متغیر به یک رسانا اعمال شود، جریانی در آن چنان به وجود می‌آید که میدان حاصل از آن، با تغییر شار مغناطیسی مخالفت کند. در یک رسانای کامل، این جریان می‌تواند بسیار بزرگ باشد، و در نتیجه میدان مغناطیسی را در درون رسانای کامل کاملاً خنثی کند. این حالت همانند رویدادی است که در ابررسانا رخ می‌دهد. ابررسانا هرگونه خطوط القای مغناطیسی را به درون خود راه نمی‌دهد چه میدان متغیر و چه ساکن باشد. فرض کنید ابررسانایی داریم که درونش یک میدان مغناطیسی وجود دارد. اگر آن را تا زیر دمای بحرانی‌اش سرد کنیم، خواهیم دید که خطوط القای مغناطیسی درونش ناگهان از میان می‌رود. این پدیده با قانون لنز پیش‌بینی شدنی نیست.

ابررسانایی نوع ۱ و ۲ اگر میدان مغناطیسی کاربرتی بسیار بزرگ باشد، اثر مایسنر از میان می‌رود. همین پدیده ابررساناها را در دو دسته می‌گذارد: ابررساناهای نوع ۱ (Type I) و ابررساناهای نوع ۲ (Type II). در ابررساناهای نوع ۱ اگر میدان مغناطیسی از یک حد آستانه (H_c) بزرگ‌تر شود، ابررسانایی ناگهان از میان می‌رود. اما در ابررساناهای نوع ۲ بسته به شکل هندسی نمونه، ممکن است حالت‌های میانی‌ای هم ایجاد شوند که در آن ناحیه‌های عادی (که در آن‌ها خطوط القای مغناطیسی به نمونه وارد می‌شود) و ناحیه‌های ابررسانا (که خطوط القای مغناطیسی درون‌شان وارد نمی‌شود) هم‌زمان وجود دارند. در این‌گونه ابررسانا برای میدان‌های کوچک (کم‌تر از میدان بحرانی اول H_{c1}) خطوط القا مانند ابررساناهای نوع ۱ به‌طور کامل به ابررسانا راه نمی‌یابد. ولی برای میدان‌های بزرگ‌تر (البته کم‌تر از میدان بحرانی دوم H_{c2}) حالت آمیخته ایجاد می‌شود که در آن شار مغناطیسی رو به افزایشی از ماده می‌گذرد، ولی هم‌چنان مقاومت الکتریکی ماده صفر می‌ماند. با این وجود با افزایش میدان کاربرتی و بزرگ‌تر شدن آن از H_{c2} ، ابررسانایی از میان می‌رود. بیشتر عنصرها (به جز نیوبیوم، تکنوتیوم، ایندیوم و نانو لوله‌های کربنی) ابررساناهای نوع ۱ و تقریباً همه ابررساناهای ناخالص و ترکیبی نوع ۲ هستند.

نظریه‌های ابررسانایی

هنوز هیچ نظریه‌ی یکتایی که بتواند همه‌ی پدیده‌های ابررسانایی را یک‌جا توصیف کند، وجود ندارد. اصول پایه‌ای ابررسانایی در سال ۱۹۵۷ توسط سه فیزیکدان آمریکایی (جان باردین، لئون کوپر و رابرت شریف) توضیح داده شد و این نظریه به افتخار این سه فیزیکدان نظریه BCS نام گرفت.

تاریخچه ابررسانایی

پدیده‌ی ابررسانایی را نخستین بار در سال ۱۹۱۱ هایک کامرلینگ اونز هلندی در دانشگاه لیدن دید. وی مقاومت الکتریکی جیوه‌ی خالص را در دماهای پایین بررسی می‌کرد و برای نخستین بار تا دمای هلیوم مایع که سه سال پیش‌تر از آن خود تهیه کرده بود، مقاومت را اندازه‌گیری کرد. او دید که در دمای $2/4$ کلوین مقاومت ناگهانی به صفر می‌رسد. او جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۱۳ را به همین خاطر دریافت کرد.

هدف: بررسی تغییرات مقاومت الکتریکی یک ابررسانا با دما و اندازه‌گیری دمای گذار آن

ابزار آزمایش:

در شکل ۱ ابزارها و دستگاه‌های انجام آزمایش دیده می‌شوند.

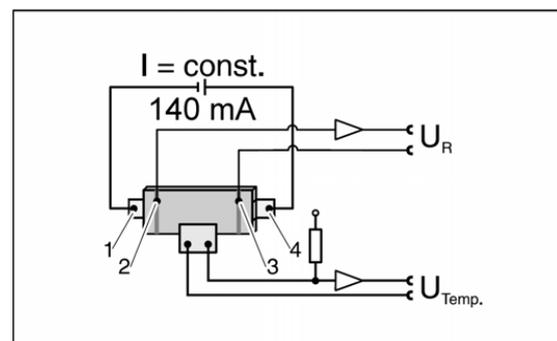


شکل ۱: ابزارها و دستگاه‌های بررسی مقاومت یک ابرسانا در دماهای بالاتر از دمای نیتروژن مایع

شکل ۲ عکسی از نمونه و سیم بندی درون آن را نشان می‌دهد. این مجموعه شامل ابرسانا و یک مقاومت گرمایی پلاتینیومی است که به صورتی که در شکل نمایش داده می‌شود روی یک برد الکتریکی قرار می‌گیرد. این مجموعه درون یک محفظه‌ی آلومینیومی قرار داده شده و سپس در نیتروژن مایع شناور می‌شود.



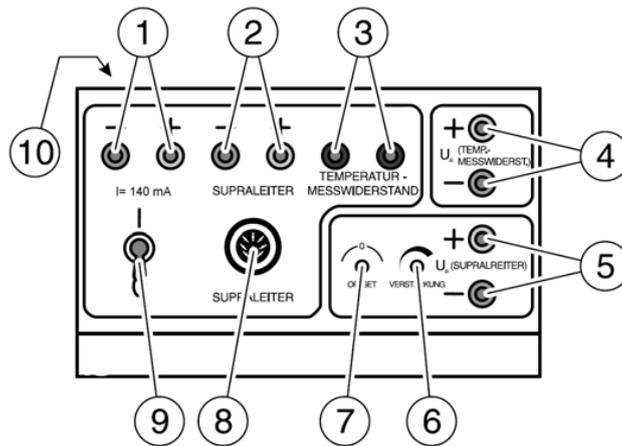
(ب)



(الف)

شکل ۲: الف) عکس نمونه‌ی ابرسانایی، ب) چگونگی سیم بندی نمونه

یک منبع جریان یک جریان ۱۴۰ میلی آمپری را میان نقاط ۱ و ۴ برقرار کرده و افت ولتاژ میان نقاط ۲ و ۳ اندازه‌گیری می‌شود. ترکیب ابرسانای به کار رفته $YBa_2Cu_3O_7$ است که به آن ابرسانای YBCO یا ابرسانای ۱۲۳ (یک-دو-سه) گفته می‌شود. مقاومت الکتریکی مقاومت پلاتینیوم - ایریدیومی در دمای صفر درجه‌ی سانتی گراد ۱۰۰ اهم است. ویژگی مهم این مقاومت آن است که مقاومتش با دما به صورت خطی تغییر می‌کند. شش اتصال یاد شده با یک کابل ۶ رشته‌ای به یک فیش DIN متصل شده که این فیش یک‌جا به آداپتور وصل می‌شود. شکل زیر آداپتور آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۳: آداپتور ۱- منبع جریان ۱۴۰ میلی آمپری، ۲- ورودی اندازه گیری ولتاژ، ۳- ورودی دماسنج، ۴- خروجی اندازه گیری دما، ۵- خروجی اندازه گیری ولتاژ (U_T)، ۶- عامل بهره، ۷- تنظیم صفر (offset)، ۸- ورودی فیش DIN، ۹- کلید روشن و خاموش آداپتور و ۱۰- سوکت اتصال به منبع تغذیه (پشت دستگاه)

این آداپتور برای اندازه گیری دما و ولتاژ و مانند یک منبع جریان کار می کند. ولتاژ اندازه گیری شده ی دو سر مقاومت گرمایی پلاتینیوم - ایریدیومی (U_{Temp}) را می توان از خروجی (۴) آداپتور نیز گرفت. این ولتاژ در بازه ی دمایی آزمایش، رابطه ی خطی با دما دارد. ولتاژ دو سر قطعه ی ابررسانا (U_R) نیز از خروجی (۵) آداپتور گرفته می شود.

۳- مبدل CASSY

این دستگاه، شکل ۴، ولتاژهای آنالوگ اندازه گیری شده از دو سر نمونه و دو سر مقاومت گرمایی را به سیگنال های رقمی (دیجیتال) تبدیل می کند تا برای نرم افزار CASSY Lab مفهوم باشد. بدین ترتیب می توانیم نمودار تغییرات ولتاژ دو سر ابررسانا را بر حسب دما رسم و دمای گذار ابررسانا را تعیین کنیم.

آزمایش اول:

۱- فیش DIN نمونه را به آداپتور وصل کنید.

۲- مبدل CASSY را به کامپیوتر وصل کنید.

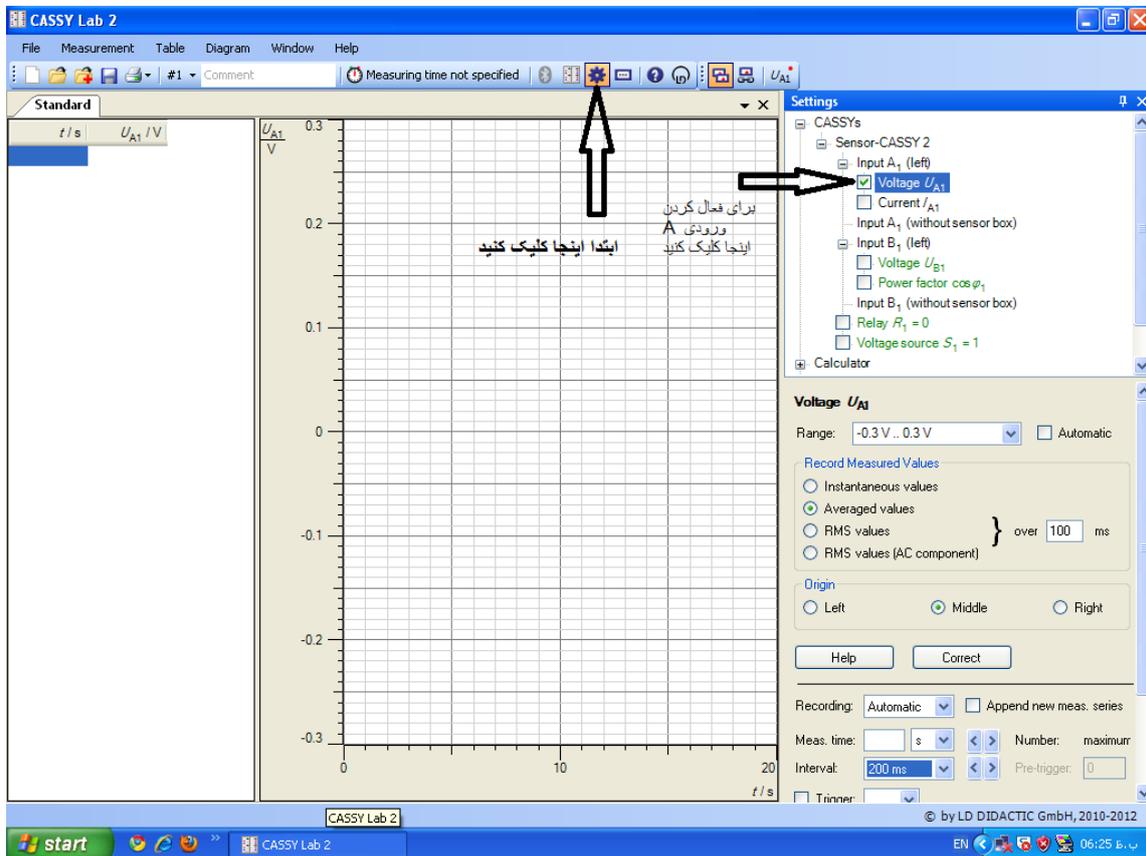
۳- ولتاژ خروجی مقاومت گرمایی را از آداپتور (سوکت ۴) به ورودی A مبدل CASSY و خروجی ولتاژ ابررسانا (سوکت ۵) را به ورودی B مبدل CASSY وصل کنید.

۴- نمونه را درون ظرف پلاستیکی پلی اورتان قرار دهید. سپس با فلاسک و با احتیاط مقداری نیتروژن مایع درون آن بریزید به گونه ای که نمونه را به طور کامل در بر بگیرد. صبر کنید تا نمونه با نیتروژن مایع هم دما شود.



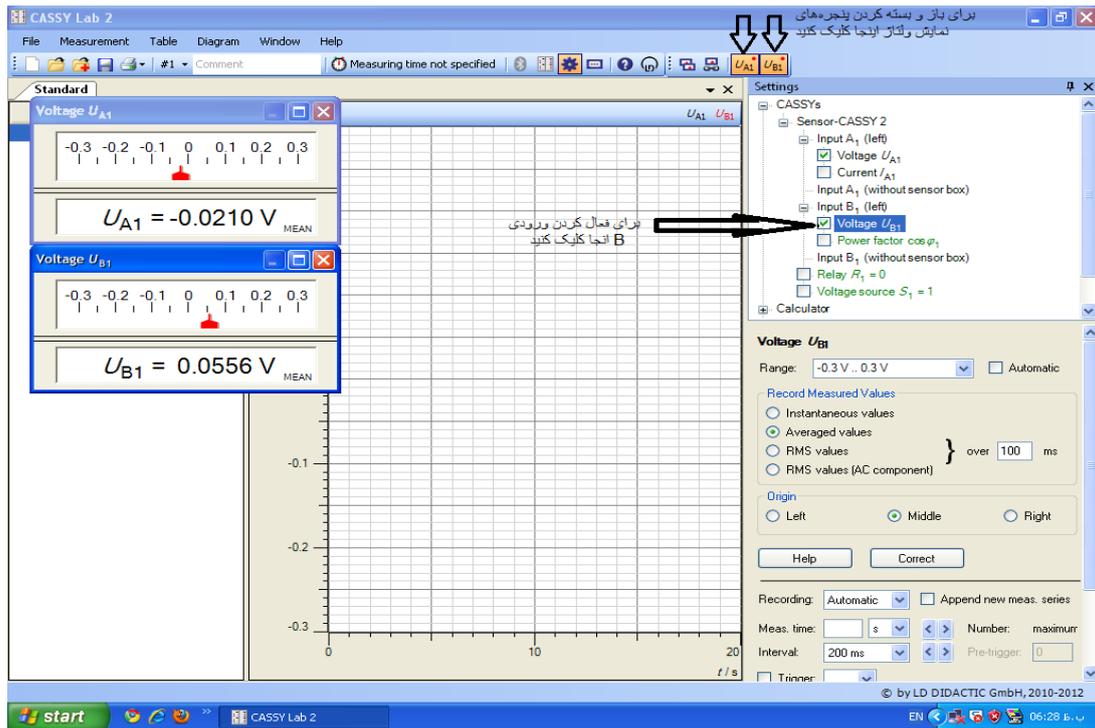
شکل ۴: مبدل CASSY

۵- کامپیوتر را روشن و برنامه‌ی CASSYLab را اجرا کنید. بر روی صفحه‌ی اصلی بر روی گزینه‌ی تنظیمات (⚙️) کلیک کنید. ورودی‌های A و B را با کلیک کردن بر روی آن‌ها فعال کنید. برای هر دوی آن‌ها بازه ۰/۳- تا ۰/۳ ولت و "Averaged values" را انتخاب کنید. بازه‌ی اندازه‌گیری ("measurement interval") را روی ۲۰۰ میلی ثانیه تنظیم کنید.

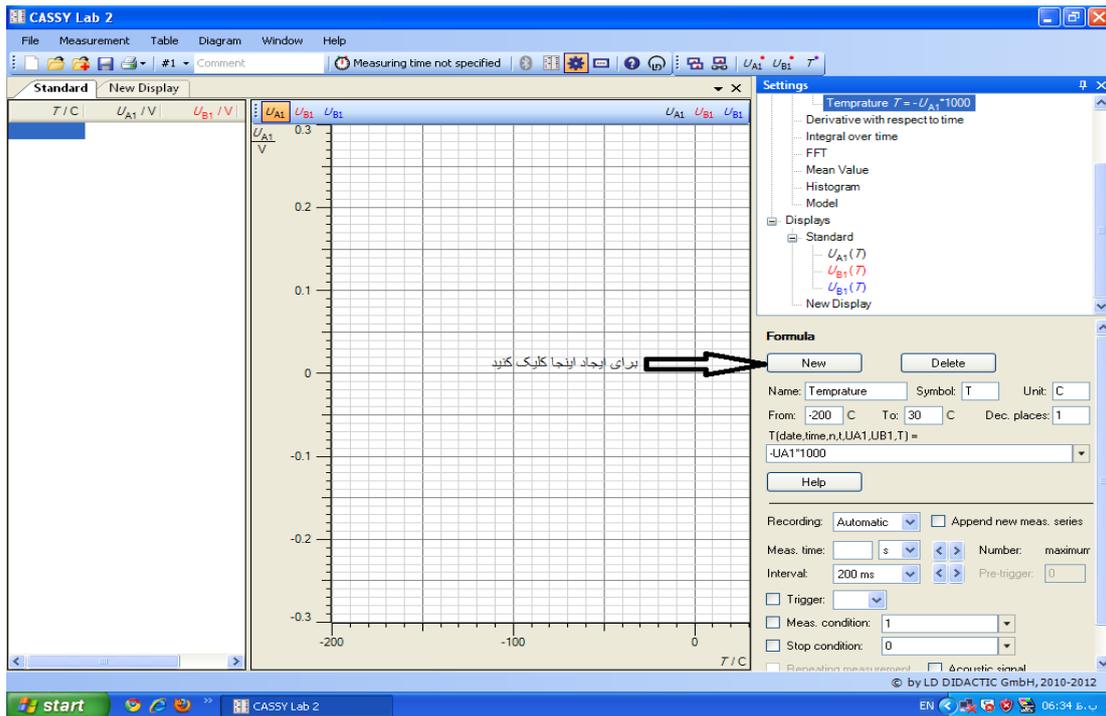


شکل ۵

۶- برای نمایش دادن دما بر حسب درجه‌ی سانتی گراد یک "new quantity" از قسمت formula ایجاد کنید. پس از معرفی دما بر حسب سانتی گراد فرمول " $-U_{A1} * 1000$ " را وارد کرده و بازه‌ی تغییرات آن را از ۲۰۰- تا ۳۰ درجه‌ی سانتی گراد تنظیم کنید.

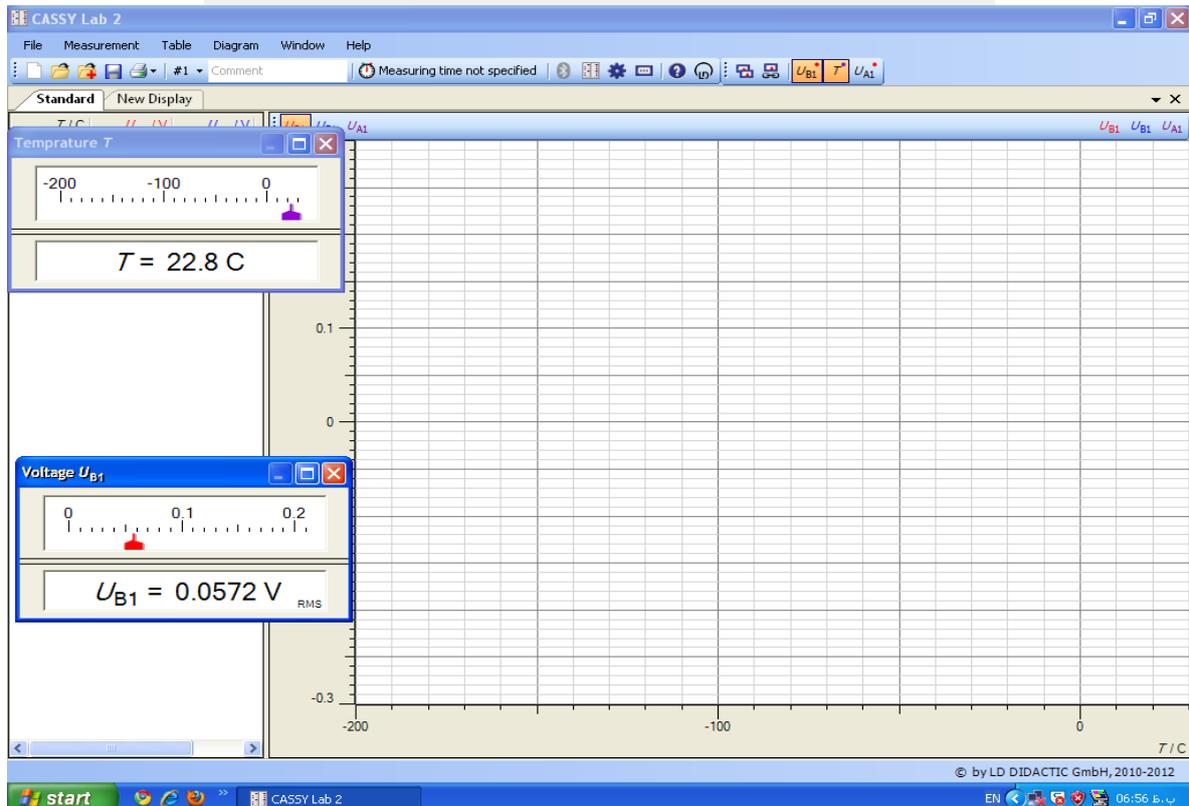
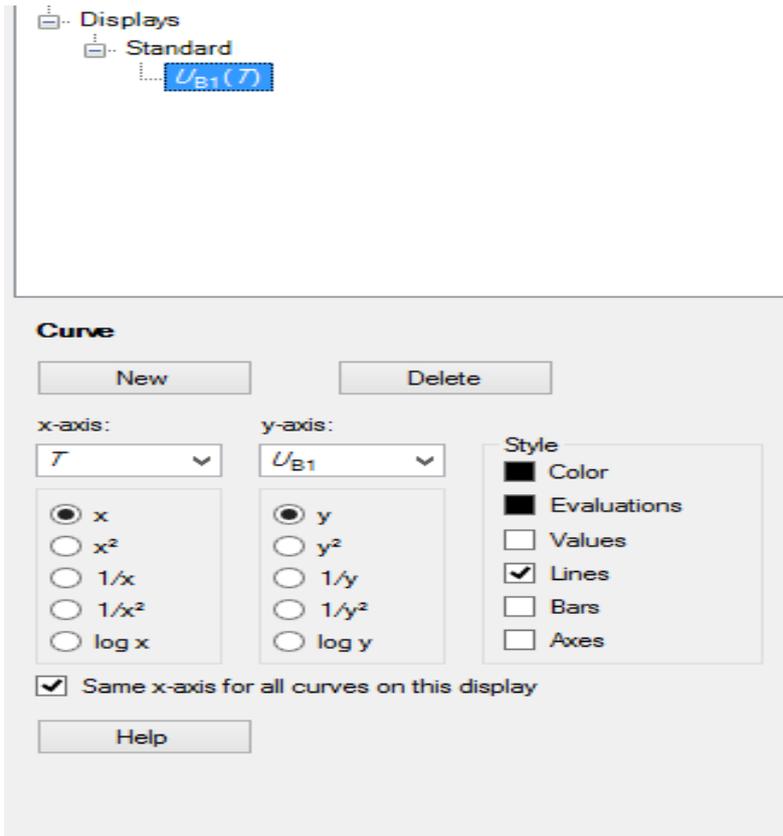


شکل ۶



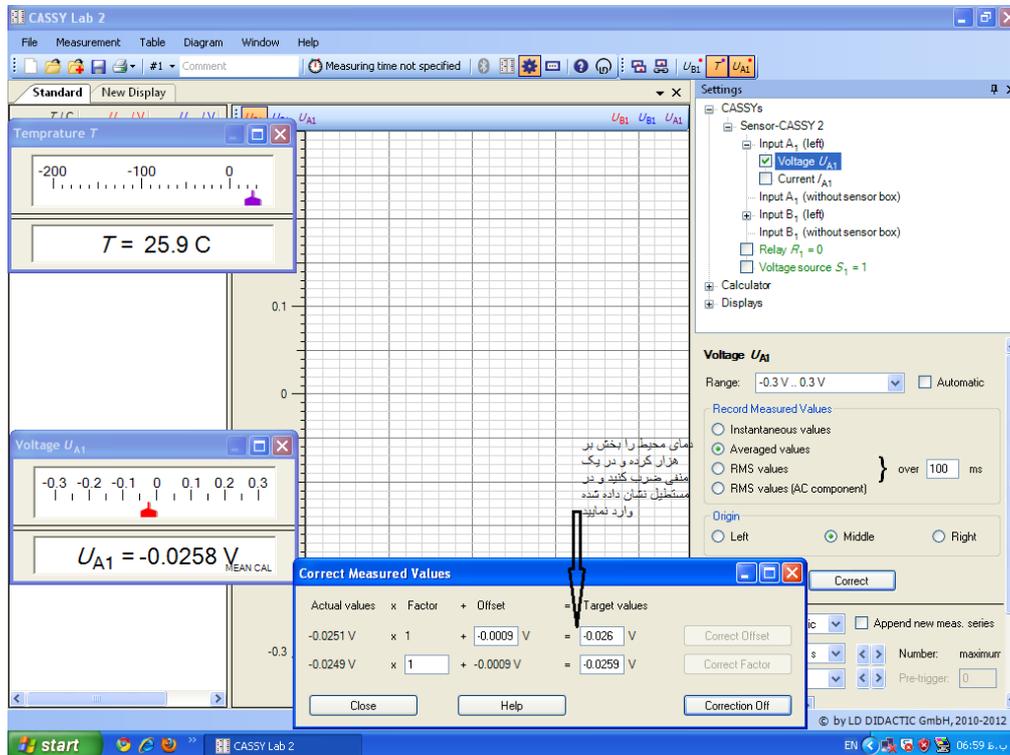
شکل ۷

۷- یک "new display" با دما به عنوان محور افقی و ولتاژ UB1 به عنوان محور عمودی ایجاد کنید.



شكل ٨

۸- برای تنظیم offset دما، گزینه ی correct ی مربوط به UA را فعال کنید. سپس مقدار دمای نمونه ی ابرسانا را که با دمای اتاق هم دما شده است بخش بر هزار کرده و در یک منفی ضرب کنید و در مستطیل نشان داده شده در شکل زیر وارد نمایید. بر روی گزینه ی "Correct Offset" کلیک کنید.

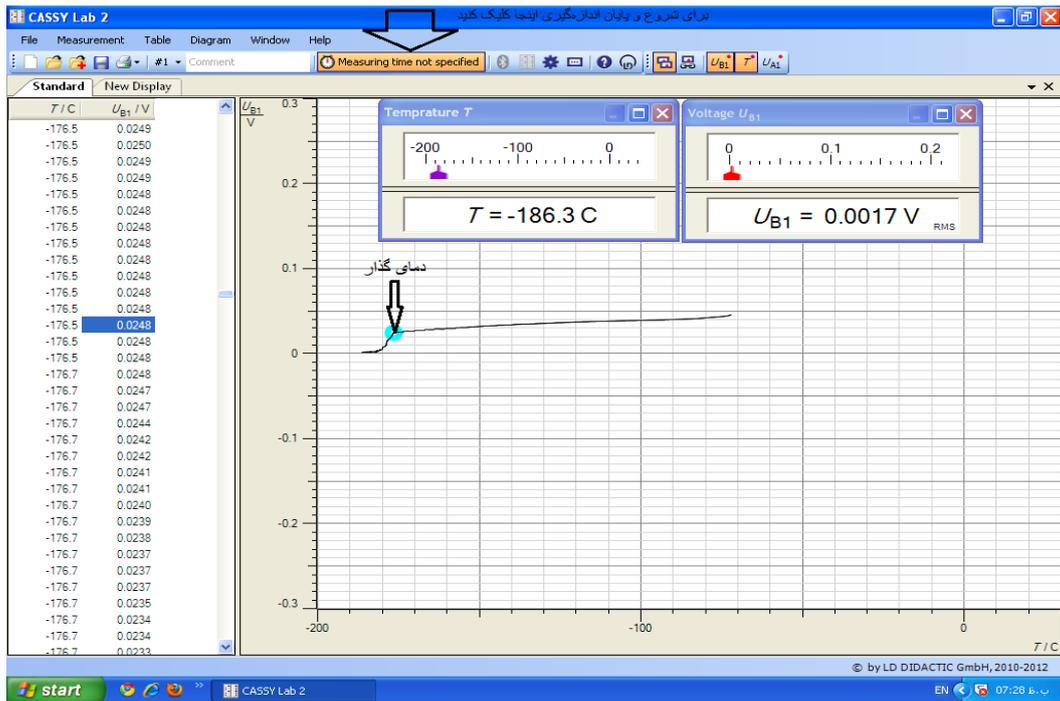


شکل ۹

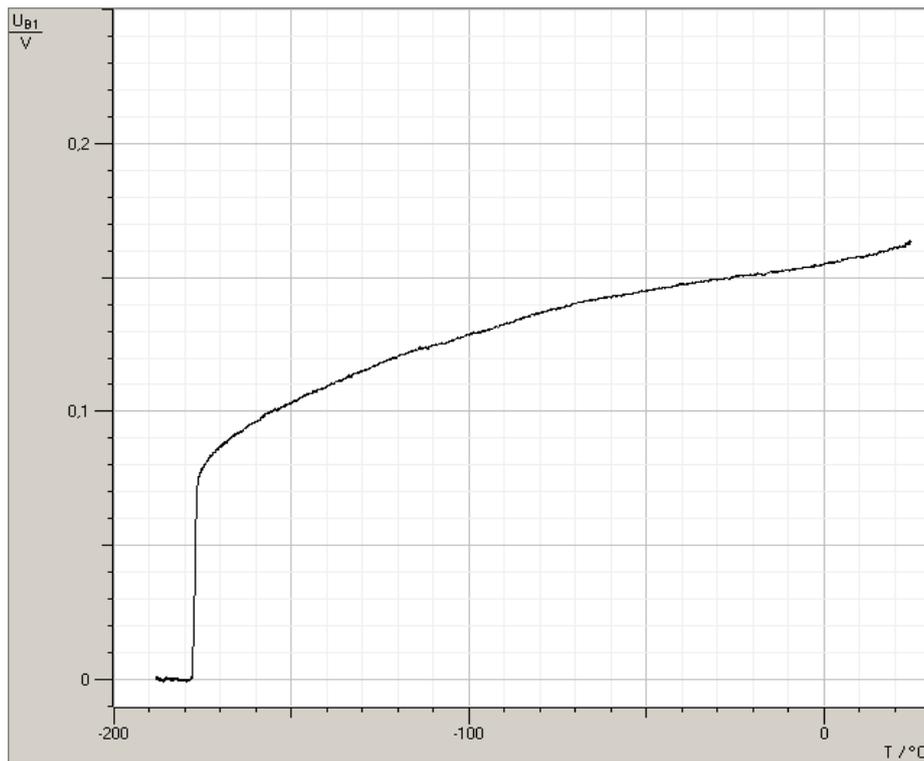
۹- برای شروع اندازه گیری بر روی گزینه ی "Measuring time not specified" کلیک کنید.

نتیجه های آزمایش

شکل زیر نشان می دهد تغییرات ولتاژ به عنوان تابعی از دما وقتی که به دمای گذار ابرسانا می رسد به یکباره به مقدار صفر کاهش می یابد. پس از اینکه به مقدار صفر رسید با کلیک کردن بر روی گزینه ی نشان داده شده در شکل زیر اندازه گیری را متوقف کنید.

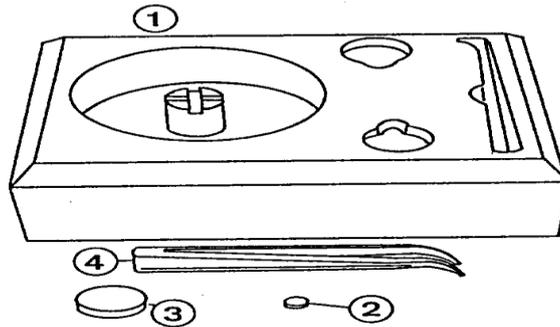


شکل ۱۰



شکل ۱۱: نمودار ولتاژ-دما. دمای گذار تقریباً ۱۷۷- درجه‌ی سلسیوس است.

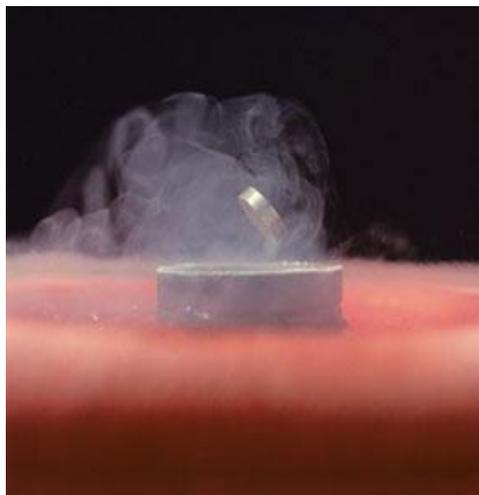
آزمایش ۲: دیدن اثر مایسنر
 شکل زیر ابزارهای انجام آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: ابزارهای انجام آزمایش: ۱- ظرف نیتروژن مایع ۲- آهن ربا به قطر ۸mm ۳- قرص ابرسانا به قطر 26mm و ۴- انبرک پلاستیکی به طول 145mm

اثر مایسنر از این واقعیت برآمده می شود که شار میدان مغناطیسی نمی تواند به داخل یک ابرسانا نفوذ کند. در نتیجه یک مغناطیس دائمی و یک ابرسانا یکدیگر را دفع می کنند. اگر یک ماده ی مغناطیس دائمی دارای وزن به اندازه ی کافی کم باشد را بالای یک ابرسانا قرار دهید در اثر نیروی دافعه آن ماده ی مغناطیسی بر روی فضای بالای ابرسانا شناور می شود.

نخست ابرسانا را در جای ویژه ی خود قرار دهید و به اندازه ای نیتروژن مایع درون ظرف بریزید که پیرامون ابرسانا را بگیرد. پس از سرد شدن ابرسانا نمونه ی آهن ربا را در بالای ابرسانا قرار داده و رها کنید.



شکل ۱۳: اثر مایسنر

پرسش ها

- ۱- عامل اصلی پدیده ی ابرسانایی در برخی از مواد چیست؟
- ۲- تفاوت یک ابرسانا با ماده ای با مقاومت صفر چیست؟
- ۳- مقاومت گرمایی به کار گرفته شده در آزمایش اول چه ویژگی ویژه ای می بایست داشته باشد؟

آزمایش شماره ۲

پاسخ مواد پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس به یک میدان مغناطیس ساکن نایکنواخت

هدف: آشنایی با ویژگی‌های مغناطیسی سه دسته‌ی اصلی مواد یعنی پارامغناطیس‌ها، دیامغناطیس‌ها و فرومغناطیس‌ها

زمینه‌ی نظری آزمایش:

ویژگی مغناطیسی، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مواد است که برای شناسایی و اندازه‌گیری آن‌ها به ابزارها و دستگاه‌های پیشرفته نیاز است. با این وجود آشکارسازی این ویژگی‌ها می‌تواند با ابزارهای ساده انجام شود.

شدت میدان مغناطیسی: پیرامون هر آهن‌ربای همیشگی، یک بار الکتریکی متحرک و/یا یک سیم جریان‌دار یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که این میدان می‌تواند تکه‌ها یا براده‌های آهن یا سیم جریان‌دار دیگری را به سوی خود بکشد یا از خود براند و با \mathbf{H} نمایش داده می‌شود.

گشتاور دوقطبی مغناطیسی: اگرچه نظریه‌ای بر پایه‌ی مکانیک کوانتومی، وجود تک‌قطبی مغناطیسی را پیش‌بینی کرده‌اند، اما هنوز در طبیعت تک‌قطبی مغناطیسی آشکار نشده‌است. بدین ترتیب پایین‌ترین مرتبه‌ی چندقطبی مغناطیسی، دوقطبی است که از یک جفت قطب شمال (N) یا مثبت و قطب جنوب (S) یا منفی تشکیل شده‌است. گشتاور دوقطبی مغناطیسی در همانندی با گشتاور دوقطبی الکتریکی به صورت $(\boldsymbol{\mu} = m\mathbf{d})$ تعریف می‌شود که در آن m قدرمطلق قدرت قطب مغناطیسی (هم‌ارز با q) و \mathbf{d} فاصله میان آن‌هاست. گشتاور دوقطبی مغناطیسی همانند \mathbf{d} ، یک بردار است که سوگیری آن‌ها (بردارهای \mathbf{d} و $\boldsymbol{\mu}$) از قطب منفی به مثبت است.

مغناطش: برای هر ماده می‌توان یک چگالی گشتاور دوقطبی مغناطیسی برآیند، به نام مغناطش تعریف کرد. بر

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} (1/\Delta v) \sum \boldsymbol{\mu}_i$$

پایه‌ی این تعریف می‌توان نوشت:

پذیرفتاری مغناطیسی: پاسخ یک ماده به یک میدان مغناطیسی بیرونی با کمیتی به نام پذیرفتاری مغناطیسی (χ) بیان می‌شود که رابطه‌ای میان \mathbf{M} و \mathbf{H} برقرار می‌کند: $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$. در دستگاه یکاهای SI پذیرفتاری مغناطیسی (χ) یک ضریب تناسب بی‌بعد است که میزان مغناطیدگی یک ماده در پاسخ به یک میدان مغناطیسی بیرونی را نشان می‌دهد.

القای مغناطیسی: معمولاً به جای شدت میدان مغناطیسی \mathbf{H} ، بیشتر بردار القای مغناطیسی $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu \mathbf{H}$ به کار گرفته می‌شود که نیروی مغناطیسی وارد بر یکای بار متحرک است. در آن رابطه μ تراوایی مغناطیسی است.

تراوایی مغناطیسی: تراوایی مغناطیسی ویژگی هر ماده‌ای است و نشان می‌دهد که آن ماده تا چه اندازه خطوط القای مغناطیسی را به خود راه می‌دهد. به سخن دیگر آن ماده تا چه اندازه در برابر گذر خطوط القای مغناطیسی تراواست.

دسته‌بندی اتم‌ها، یون‌ها و مولکول‌ها از دیدگاه ویژگی مغناطیسی

اتم‌ها، یون‌ها و مولکول‌ها تنها و تنها بسته به این که الکترون جفت‌نشده داشته یا نداشته باشند به ترتیب پارامغناطیس یا دیامغناطیس‌اند. برای نمونه اتم لیتیوم با آرایش الکترونی ($Li: 1s^2 2s^1$) یک الکترون جفت‌نشده در لایه $2s$ دارد پس یک اتم پارامغناطیس است. در حالی که یون آن با آرایش الکترونی ($Li^+: 1s^2$) الکترون جفت‌نشده ندارد، پس دیامغناطیس است. بدین ترتیب چیزی به نام اتم، یون یا مولکول فرومغناطیس، پادفرومغناطیس یا فری مغناطیس بی‌معنا است. هر الکترون یک گشتاور دوقطبی مغناطیسی دارد که اندازه‌ی آن یک مگنتون بوهر ($1\mu_B = 9/27 \times 10^{-21} \text{ J/T}$) است. پس اتم آهن با آرایش الکترونی ($^4d^5 \dots$) سه الکترون تکی (جفت‌نشده) و $3\mu_B$ گشتاور دوقطبی مغناطیسی دارد. در حالی که یون آهن Fe^{3+} با آرایش الکترونی ($^3d^5 \dots$) پنج الکترون تکی (جفت‌نشده) و $5\mu_B$ گشتاور دوقطبی مغناطیسی دارد.

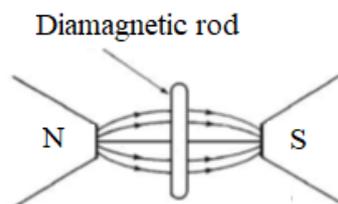
دسته‌بندی مواد از دیدگاه ویژگی‌های مغناطیسی

مواد از دیدگاه ویژگی‌های مغناطیسی دست‌کم به پنج دسته‌ی دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری مغناطیس دسته‌بندی می‌شوند، که به‌دنبال برخی از ویژگی‌های آن‌ها را بررسی می‌کنیم. این ویژگی‌ها، ویژگی‌های گروهی است و به سامانه‌های بس‌ذره‌ای مربوط می‌شود. مواد از اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌ها ساخته شده‌اند و این اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌ها یا دیامغناطیس یا پارامغناطیس‌اند و ویژگی‌های مغناطیسی مواد هم از همین ویژگی‌ها سرچشمه می‌گیرد.

از سوی دیگر در دسته‌بندی دیگری می‌توان مواد را در دو دسته‌ی مواد مغناطیسی **بانظم و بی‌نظم** قرار داد. در مواد مغناطیسی بانظم (شامل فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری مغناطیس) میان گشتاورهای مغناطیسی برهم‌کنشی به نام "**برهم‌کنش تبادلی**" وجود دارد که باعث می‌شود هر ماده بانظم مغناطیسی به بخش‌های کوچکی بخش‌بندی و در آن بخش‌ها گشتاورهای مغناطیسی با هم دیگر موازی شود. این بخش‌ها "**حوزه‌های مغناطیسی**" نامیده می‌شوند. اندازه‌ی این حوزه‌ها در مواد گوناگون، گوناگون است اما در هر صورت ابعادی از مرتبه‌ی میکرونی یا زیرمیکرونی دارند که شامل میلیاردها میلیارد گشتاور مغناطیسی می‌شوند. به سخن دیگر، اگر چه از دید مقیاس معمول، این حوزه‌های مغناطیسی بسیار کوچک‌اند، اما در مقیاس اتمی شمار بسیاری گشتاور می‌توان یافت که با هم جفت شده‌اند (برهم‌کنش دارند) و یک رفتار گروهی از خود نشان می‌دهند. وجود این برهم‌کنش باعث به وجود آمدن یک دمای گذار از بانظم به بی‌نظم می‌شود که به آن دمای کوری (Tc) می‌گویند. در یک ماده بانظم مغناطیسی "**میدان ندیده**"، جهت گشتاورها در این حوزه‌ها کاتوره‌ای و مغناطش کل نمونه صفر است. در مواد **بی‌نظم مغناطیسی**، برهم‌کنش تبادلی وجود ندارد.

مواد دیامغناطیس: این مواد تنها و تنها می‌توانند از اتم‌ها، یون‌ها و/یا مولکول‌های دیامغناطیس ساخته شده باشند که گشتاور دوقطبی مغناطیسی ندارند. بدین ترتیب این مواد در نبود یک میدان مغناطیسی، هیچ ویژگی مغناطیسی از خود نشان نمی‌دهند. هنگامی که یک ماده دیامغناطیس در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، با

تغییر شار مغناطیسی یک نیروی محرکه‌ی القایی در تکانه‌ی مدارهای الکترون‌هایش ایجاد می‌شود، که بر پایه‌ی قانون لنز با عامل به وجود آورنده‌ی آن مخالفت می‌کند. بدین ترتیب یک مغناطش منفی (مخالف میدان کاربستی) در آن القا می‌شود شکل ۱ به گونه‌ای که این مغناطش با برداشتن میدان، از میان می‌رود. به خاطر همین مغناطش منفی، یک ماده دیامغناطیس از میدان‌های قوی رانده و به سوی میدان‌های ضعیف کشیده می‌شود. اگر یک میله‌ی دیامغناطیس همانند شکل ۱ در یک میدان مغناطیسی نایکنواخت قرار گیرد، به گونه‌ای سوگیری می‌کند که عمود بر راستای اصلی میدان نایکنواخت به ایستد. موادی مانند طلا، نقره، بیسموت، جیوه، آب، الکل، هیدروژن جزو مواد دیامغناطیس هستند.



شکل ۱: چگونگی سوگیری یک میله‌ی دیامغناطیسی در یک میدان مغناطیسی نایکنواخت

برخی از ویژگی‌های مواد دیامغناطیس:

- ۱- پذیرفتاری مغناطیسی ($\chi = M/H$) این مواد منفی و کوچک است (در دستگاه SI از مرتبه‌ی 10^{-5} -) است (جدول ۱)، به جز برای ابررساناها که یک دیامغناطیس کامل با پذیرفتاری منفی یک است.
- ۲- پذیرفتاری مغناطیسی این مواد به میدان مغناطیسی و دما وابسته نیست.

مواد پارامغناطیس: این مواد دست کم یک اتم، یون یا مولکول پارامغناطیسی دارند، اما دوقطبی‌های مغناطیسی این مواد سوگیری مشخص و منظمی ندارند و در جهت‌های کاتوره‌ای قرار می‌گیرند. در نتیجه این مواد مغناطش برآیندی ندارند شکل ۲. اگر نمونه‌ی پارامغناطیس که گشتاور دوقطبی مغناطیسی هر یک از اتم‌های آن μ است در یک میدان مغناطیسی قرار گیرد دو قطبی‌های مغناطیسی اتم‌ها می‌کوشند با میدان مغناطیسی کاربستی هم‌سو شوند و بدین ترتیب یک مغناطش ناصفر (مثبت) در نمونه ایجاد می‌شود و هر چه میدان بیرونی بزرگ‌تر باشد، دو قطبی‌های بیشتری با میدان کاربستی هم‌سو شده و مغناطش افزایش می‌یابد. با این وجود در دمای اتاق با کاهش میدان کاربستی، هم‌سوایی دوقطبی‌ها با میدان کاهش یافته و سرانجام با صفر شدن میدان مغناطش نمونه صفر می‌شود. موادی مانند آلومینیوم، پلاتین، اکسیژن و شیشه پارامغناطیس‌اند.

برخی ویژگی‌های مواد پارامغناطیس:

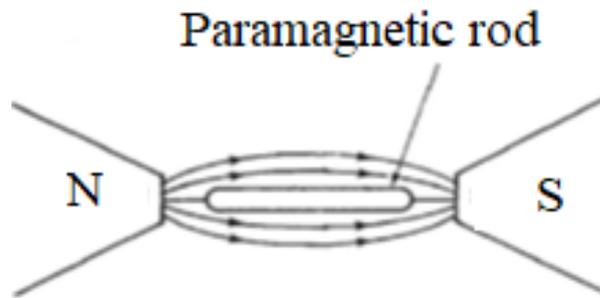
- ۱- پذیرفتاری مغناطیسی این مواد مثبت و کوچک از مرتبه‌ی 10^{-4} است.
- ۲- در دماهای نه‌چندان پایین و میدان‌های نه‌چندان بزرگ، به گونه‌ای که نسبت H/T بی‌نهایت نشود پذیرفتاری این مواد تابع دماست و از قانون کوری ($\chi = C/T$) پیروی می‌کند. در H/T ‌های بسیار بزرگ، مغناطش (M) به سوی مقدار بیشینه‌ی $M_{Sat} = \mu N/V$ که هم‌ارز با هم‌سوایی کامل همه‌ی دو قطبی‌ها در حجم V نمونه است،

می‌گراید. به سخن دیگر مغناطش نمونه اشباع می‌شود.

توجه: از آن‌جا که این آزمایش در دمای ثابت (دمای اتاق) انجام می‌شود، هدف از انجام آن تنها آشکار کردن اثر میدان بر یک ماده پارامغناطیس است. و اشباع کردن آن نیازمند میدان‌های بسیار بزرگ و دماهای پایین (پیرامون کلوین یا زیر کلوین) است. به‌طور کلی اگر یک دو قطبی مغناطیسی μ در یک میدان مغناطیسی کاربستی H قرار گیرد و با میدان زاویه‌ی θ بسازد، گشتاور نیروی وارد بر آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$T = \mu \times H \quad \tau = \mu H \sin\theta \quad (1)$$

بدین ترتیب دو قطبی‌های مغناطیسی اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌های ماده‌ی پارامغناطیس در میدان شروع به چرخش می‌کند تا زاویه‌ی آن با میدان و در نتیجه گشتاور وارد بر آن صفر شود. اگر یک میله پارامغناطیس در یک میدان مغناطیسی نایکخواخت قرار گیرد، به آرامی می‌چرخد، چنان‌که در راستای اصلی میدان قرار گیرد.



شکل ۳: چگونگی قرارگیری یک میله‌ی پارامغناطیس را در یک میدان مغناطیسی نایکخواخت

جدول ۱:

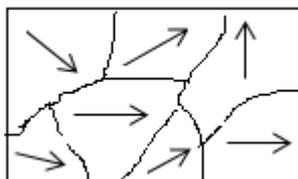
Room-temperature magnetic susceptibility for diamagnetic

Material	Susceptibility χ_m (volum)SI unit
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}
Gold	-3.44×10^{-5}
Mercury	-2.85×10^{-5}
Silicon	-0.41×10^{-5}
Silver	-2.38×10^{-5}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}
Zinc	-1.56×10^{-5}

Room-temperature magnetic susceptibility for paramagnetic

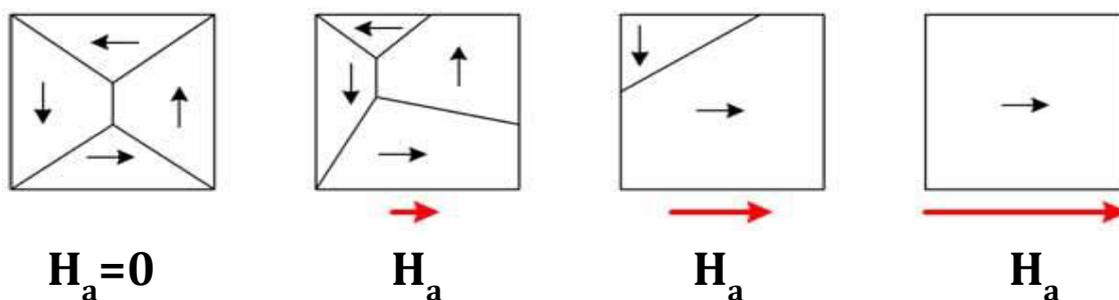
Material	Susceptibility χ_m (volum)SI unit
Aluminum	2.07×10^{-5}
Chromium	3.13×10^{-4}
Chromiumchloride	1.51×10^{-3}
Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Molybdenum	1.19×10^{-4}
Sodium	8.48×10^{-6}
Titanium	1.81×10^{-4}
Zirconium	1.09×10^{-4}

مواد فرومغناطیس: این مواد نیز دست کم یک اتم، یون یا مولکول پارامغناطیس دارند. اما در این مواد "برهمکنش تبدالی" میان گشتاورهای مغناطیسی وجود دارد. در یک فرومغناطیس "میدان ندیده"، جهت گشتاور حوزه‌ها توزیع کاتوره‌ای دارد و مغناطش کل نمونه صفر است، شکل ۴. در هر یک از این حوزه‌ها جهت گشتاورهای اتمی، یونی یا مولکولی با پیکان کشیده شده در شکل هم‌سو هستند.



شکل ۴: نگاره‌ای از توزیع گشاورهای مغناطیسی در یک نمونه‌ی فرومغناطیس. جهت گشاورها در هر حوزه با یک پیکان نمایش داده شده است.

هنگامی که این ماده در یک میدان مغناطیسی بیرونی قرار می‌گیرد، مغناطیده شده و معمولاً مغناطش آن بزرگ است. فرآیند مغناطش شامل حرکت دیواره (بازگشت‌پذیر و بزرگ‌ناپذیر) و در میدان‌های بزرگ‌تر چرخش حوزه است. با کار بست میدان نخست در میدان‌های کوچک دیواره‌های حوزه‌ها به گونه‌ای حرکت می‌کنند که حوزه‌های هم‌سوتر (زاویه‌ای کمتر از 90°) با میدان افزایش حجم و حوزه‌های دیگر کاهش حجم پیدا کنند. سرانجام با افزایش میدان کاربستی، گشاورهای حوزه‌ها به سوی میدان چرخیده و کل نمونه به یک حوزه تبدیل می‌شود شکل ۵. آهن، کبالت، نیکل و گادولونیوم در جدول دوره‌ای عنصرها، فرومغناطیس‌اند.



شکل ۵: نگاره‌ی چگونگی تغییر ساختار حوزه‌ای یک ماده‌ی فرومغناطیسی با کار بست یک میدان افقی به سوی راست.

پادفرومغناطیس: این مواد نیز دست کم یک اتم، یون یا مولکول پارامغناطیس دارند. همانند فرومغناطیس‌ها به بخش‌های کوچکی بخش‌بندی می‌شود (حوزه‌های مغناطیسی) با این تفاوت که در هر بخش گشاورهای مغناطیسی با هم دیگر پادموازی‌اند و یکدیگر را خنثی می‌کنند. در نتیجه در یک ساختار منظم پادفرومغناطیس مغناطش کل نمونه در نبود یک میدان مغناطیسی کاربستی همواره صفر است (شکل ۶).



شکل ۶: نگاره‌ای از توزیع گشاورهای مغناطیسی در یک نمونه‌ی پادفرومغناطیس. جهت گشاورها در هر حوزه با یک جفت پیکان نمایش داده شده است.

فرومغناطیس: این مواد نیز دست کم یک اتم، یون یا مولکول پارامغناطیس دارند. همانند مواد پادفرومغناطیس به بخش‌های کوچکی بخش‌بندی می‌شوند (حوزه‌های مغناطیسی) با این تفاوت که در هر بخش گشاورهای مغناطیسی با هم دیگر نابرابراند و گشاور یکدیگر را همانند پادفرومغناطیس‌ها خنثی نمی‌کنند پس هر حوزه یک

گشتاور مغناطیسی برآیند خنثا نشده دارد. در یک فری مغناطیس "میدان ندیده"، جهت این حوزه‌ها کاتوره-ای توزیع شده و مغناطش کل نمونه صفر است.



شکل ۷: نگاره‌ای از توزیع گشتاورهای مغناطیسی در یک نمونه‌ی فری مغناطیس. راستای گشتاورها در هر حوزه با یک جفت پیکان نمایش داده شده است.

برخی از ویژگی‌های مواد فرومغناطیس:

- ۱- پذیرفتاری فرومغناطیس‌ها مثبت و بسیار بزرگ است ($\chi \gg 1$). آهن بسیار بسیار خالص می‌تواند پذیرفتاری تا 10^5 داشته باشد.
- ۲- با افزایش دما مغناطش کاهش می‌یابد و در دمای کوری (T_c) به سرعت صفر و ماده پارامغناطیس می‌شود.
- ۳- پس از برداشتن میدان کاربستی، مغناطش در فرومغناطیس‌ها باقی می‌ماند که به آن پسماند مغناطیسی می‌گویند.

نخ پرولن: نخ تک رشته‌ای از جنس پلی‌پروپیلن

که دارای سطحی صاف و صیقلی است. (نخ بخیه یا ماهی‌گیری)

۸- سه تکه میله کوچک به طول تقریبی ۱cm و قطر تقریباً ۱mm فرومغناطیس (فولاد یا آهن)، پارامغناطیس (آلومینیوم خالص) و دیامغناطیس (یک ماده ابررسانا ۲۲۲۳ پایه بیسموتی)

۹- مقداری نیتروژن مایع و تشتک ویژه نگهداری آن

توجه: نمونه‌های دیگری را می‌توان با توجه به پذیرفتاری مغناطیسی مواد که در جدول شماره یک آمده برگزید.

وسایل آزمایش:

- ۱- آهنربای الکتریکی با یک جفت فک نوک تیز
- ۲- منبع تغذیه با ولتاژ پایین
- ۳- سیم‌های رابط
- ۴- آمپرسنج
- ۵- پایه V شکل با میله عمودی نیم متری، گیره و میله افقی
- ۶- قلاب S شکل برای اتصال به میله افقی و انتهای نخ متصل به نمونه‌ها
- ۷- چند تکه نخ پرولن حدود نیم متری (بهتر است نخ تک رشته‌ای باشد تا هنگام آویزان شدن در میدان نوسان زیادی نداشته باشد).

روش آزمایش:

- ۱- فاصله فک‌ها را حدود ۱/۵ سانتی‌متر تنظیم کرده و بست آن‌ها را محکم کنید.

- ۲- میله افقی را به میله عمودی پایه V شکل به گونه‌ای ببندید که میله افقی در ارتفاعی حدود ۴۰ سانتی‌متر از قطب‌ها قرار گیرد. (توجه: این فاصله برای پیشگیری از کشیده شدن میله افقی توسط آهنربای الکتریکی لازم است). گام‌های زیر را برای هریک از نمونه‌های موجود انجام دهید و نتیجه را یادداشت کنید:
- ۱- نمونه را چنان به نخ ببندید که نخ دقیقا در میانه‌ی میله بسته شود (شکل ۸).
 - ۲- قلاب S شکل را به سر دیگر نخ بسته و نمونه را در میدان آویزان کنید.
 - ۳- کمی صبر کنید تا نوسان‌های نمونه میرا شده و نوسانی نداشته باشد. پایه را کمی جابه‌جا کنید تا مانند شکل نمونه با راستای اصلی میدان زاویه ۴۵ درجه بسازد. دوباره صبر کنید تا نخ و نمونه از حرکت بازایستند.
 - ۵- آمپر سنج را روشن کرده و دامنه‌ی ۲۰ آمپری را برگزینید.
 - ۶- با چرخاندن پیچ تنظیم ولتاژ جریان پیچه‌ها را افزایش دهید. و با دقت ببینید که نمونه در چه جهتی می‌چرخد. **توجه:** برای نمونه‌ی دیا مغناطیس (ابرسانا) نخست رفتار نمونه را پیش از قرار گرفتن در نیتروژن مایع در میدان مغناطیسی بررسی کنید، دوباره ولتاژ را صفر کنید. نمونه را در نیتروژن مایع قرار داده کمی صبر کنید تا با نیتروژن هم‌دم شود، سپس آن را در میدان رها کنید و ولتاژ را افزایش دهید چه روی می‌دهد؟ دقت کنید این مراحل بایستی به تندی انجام شود تا دمای ماده از دمای بحرانی آن بالاتر نرود.



نکات ایمنی:

- ۱- هرگز به سر بی‌روکش سیم‌های رابط یا نوک فیش‌ها دست نزنید (خطر برق‌گرفتگی).
- ۲- از تماس پوست بدن با نیتروژن مایع و ماده ابرسانایی که در آن قرار گرفته پرهیزید.

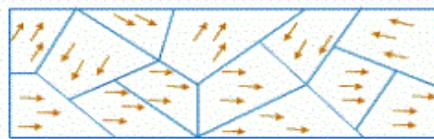
آزمایش شماره ۳

رسم چرخه‌ی پسماند یک هسته‌ی آهنی (فرومغناطیس)

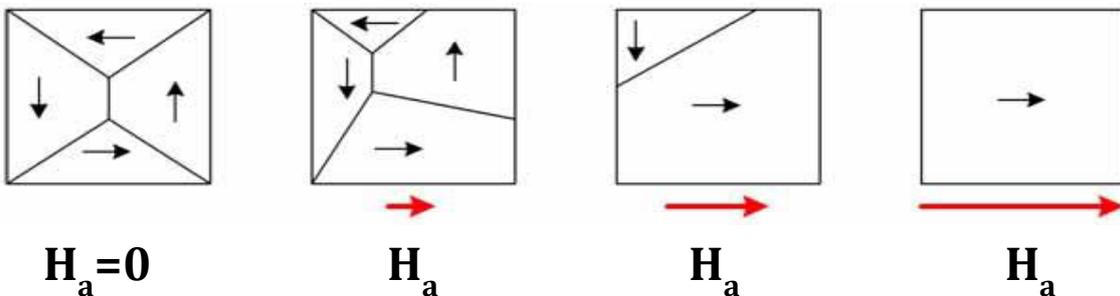
زمینه‌ی نظری آزمایش

الف- حوزه‌های مغناطیسی

مواد بر پایه‌ی چگونگی پاسخ‌شان به یک میدان مغناطیسی کاربستی به پنج دسته‌ی دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری‌مغناطیس دسته‌بندی می‌شوند. فرومغناطیس‌ها دسته‌ای از مواد مغناطیسی هستند که از شمار بسیاری حوزه‌ی مغناطیسی تشکیل شده‌اند (شکل ۱-الف). یک حوزه‌ی مغناطیسی ناحیه‌ای از ماده است که در آن همه‌ی گشتاورهای مغناطیسی با هم هم‌سو هستند. در یک نمونه‌ی میدان **ندیده**، اگرچه گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزه هم‌سو است، ولی جهت گشتاورهای یک حوزه با حوزه‌های همسایه‌اش یکسان نیست و در نتیجه مغناطش کل نمونه صفر است. با کاربست یک میدان مغناطیسی بیرونی به یک ماده‌ی فرومغناطیس، نخست حرکت دیواره‌ی حوزه‌ها (که خود بر دو گونه‌ی بازگشت‌پذیر و بازگشت‌ناپذیر است) و سپس چرخش حوزه‌ها روی می‌دهد. در این فرایند نخست در میدان‌های کوچک دیواره‌ی حوزه‌هایی که گشتاور آن‌ها با میدان کاربستی تقریباً هم‌سو است به گونه‌ای حرکت می‌کند که حجم آن حوزه‌ها افزایش یابد و حجم حوزه‌های دیگر که جهت‌شان در خلاف جهت میدان کاربستی است کاهش می‌یابد. با افزایش شدت میدان کاربستی دیواره‌های حوزه‌ها از حرکت باز می‌ایستند و چرخش حوزه روی می‌دهد. بدین ترتیب در یک میدان به اندازه‌ی کافی بزرگ، همه‌ی حجم نمونه به یک حوزه‌ی مغناطیسی تبدیل می‌شود. به این حالت **"اشباع مغناطیسی"** می‌گوییم. به این ترتیب فرآیند مغناطش شامل حرکت بازگشت‌پذیر دیواره‌های حوزه‌ها، حرکت بازگشت‌ناپذیر دیواره‌های حوزه‌ها و سرانجام چرخش حوزه‌ها می‌شود (شکل ۱-ب).



(الف)

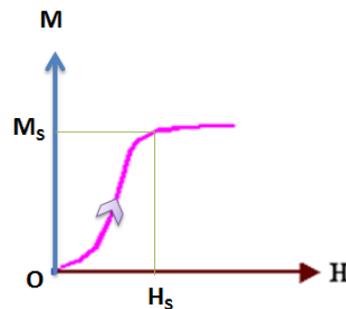


(ب)

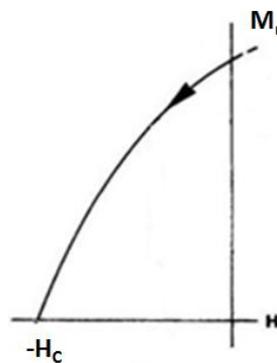
شکل ۱: حوزه‌های مغناطیسی الف) یک نمونه‌ی میدان ندیده در نبود میدان مغناطیسی بیرونی و ب) در یک میدان مغناطیسی بیرونی (H_a) با شدت فزاینده.

ب- سازوکار مغناطش

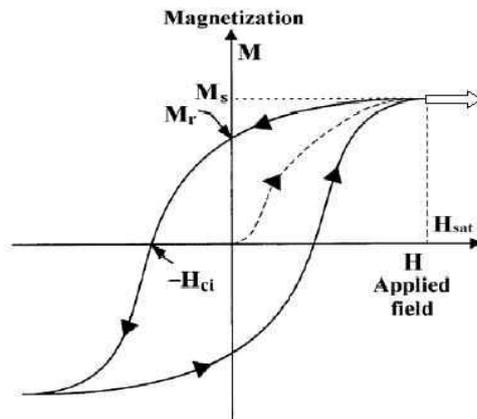
یک ماده‌ی نامغناطیده (میدان ندیده) در نبود یک میدان بیرونی را در نظر بگیرید. در این صورت برآیند گشتاورهای مغناطیسی نمونه صفر است (شکل ۲- نقطه‌ی O). با کار بست یک میدان مغناطیسی بیرونی، مغناطش افزایش می‌یابد و با افزایش میدان تا مقدار H_s ، مغناطش نمونه اشباع می‌شود (M_s). این بخش از منحنی را "**منحنی مغناطش**" می‌نامند (شکل ۲). از این پس افزایش بیشتر میدان منجر به افزایش مغناطش نخواهد شد. با کاهش میدان، منحنی بر روی خودش باز نمی‌گردد. چنین رفتاری **پسماند هیستریزیس** نامیده می‌شود. بدین ترتیب با رسیدن میدان به صفر، مغناطش کل نمونه دیگر صفر نیست و یک مغناطش که "**مغناطش پسماند**" (M_r) نامیده می‌شود در نمونه باقی می‌ماند. برای صفر کردن این پسماند باید میدانی در خلاف جهت میدان اشباع کننده به کار بست. میدانی که مغناطش پسماند را از میان می‌برد، "**میدان وادارنده یا پسماندزدا**" (H_c) نامیده می‌شود. این بخش از منحنی ($-H_c < 0 < H$) را منحنی "**وامغناطش**" می‌نامند (شکل ۳). با کاهش بیشتر میدان، نمونه در جهت وارون اشباع می‌شود ($-M_s$) و با افزایش میدان به ترتیب به $-M_r$ و H_c می‌رسیم و با افزایش بیشتر میدان، نمونه دوباره به اشباع (M_s) می‌رسد، (شکل ۴) و این چرخه، منحنی اصلی هیستریزیس یا چرخه‌ی اصلی پسماند نامیده می‌شود و معمولاً نسبت به مبدأ متقارن است. برای یک ماده‌ی فرومغناطیس رابطه‌ی میان M و B به صورت $B = \mu_0 (H + M)$ است.



شکل ۲: منحنی مغناطش یک ماده‌ی فرومغناطیس یا فری مغناطیس



شکل ۳: منحنی وامغناطش

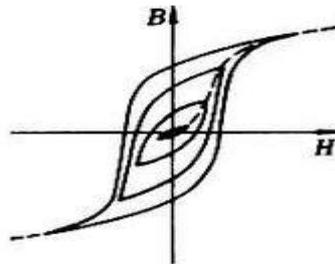


شکل ۴: چرخه‌ی پسماند

کار لازم برای واداشتن ماده به یک بار پیمودن چرخه، برابر سطح درون چرخه، یعنی: $(W = \oint H dM)$ است که خود را به صورت گرما در نمونه نشان می‌دهد. روشن است که اگر میدان f بار در ثانیه تغییر جهت دهد، توان اتلافی در نمونه برابر fW خواهد شد که با افزایش بسامد می‌تواند به آن اندازه بزرگ شود که نمونه را ذوب کند. این پایه‌ی کار کوره‌های القایی ذوب فلزها است.

پ- حلقه‌های فرعی:

افزون بر حلقه‌ی اصلی، حلقه‌های فرعی نیز می‌توانند وجود داشته باشند. این حلقه‌ها هنگامی به وجود می‌آیند که میدان کاربستی را پیش از به اشباع رسیدن ماده، کاهش دهیم. حلقه‌های فرعی از حلقه اصلی کوچک‌تر و بی‌شمارند (شکل ۵)، در حالی که حلقه‌ی اصلی یکتاست.

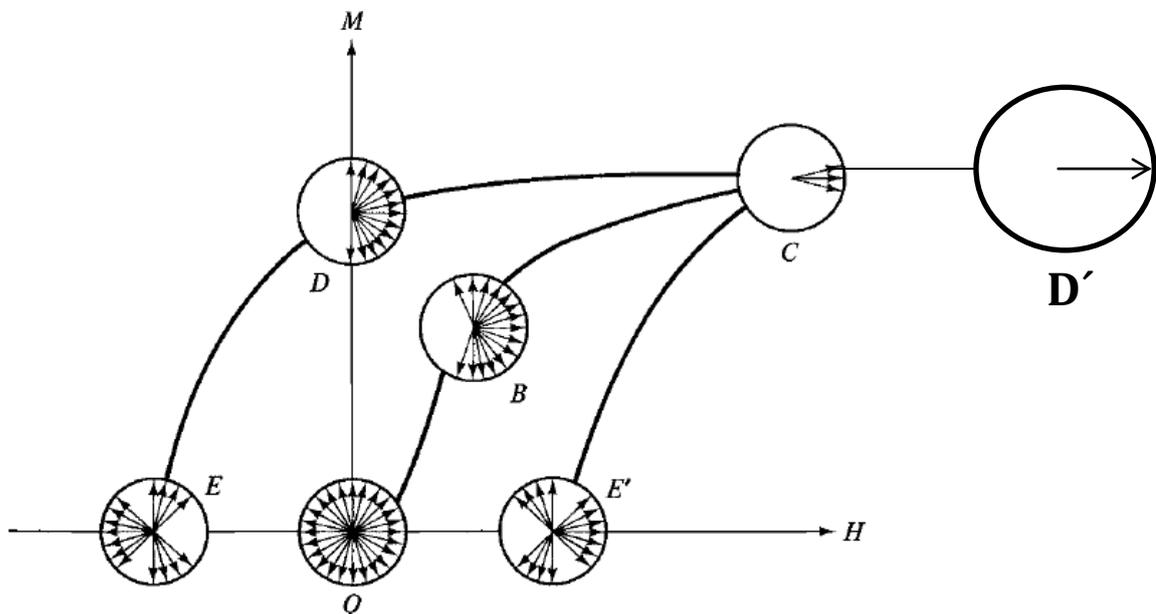


شکل ۵: چرخه‌های فرعی و اصلی پسماند

ت- چگونگی توزیع گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به هنگام مغناطش و وامغناطش:

یک ماده با ناهمسانگردی تک‌محوری (مانند کبالت) را در نظر می‌گیریم که در آن گشتاورهای مغناطیسی هر حوزه یک جهت قرار دارد. این جهت را جهت آسان می‌نامند و جهتی است که در نبود یک میدان بیرونی، گشتاورهای هر حوزه در آن جهت قرار می‌گیرند. پیش از کاربست یک میدان بیرونی گشتاور حوزه‌ها در یک نمونه به‌طور کاتوره‌ای جهت‌گیری کرده و برآیندشان صفر است. با یک مدل دو بعدی می‌توان چه‌گونگی توزیع گشتاورها در یک نمونه را به هنگام فرایندهای مغناطش و وامغناطش مدل‌سازی کرد. در (شکل ۶) هر بردار نشانگر برآیند گشتاور مغناطیسی یک حوزه است. نقطه O حالت نامغناطیده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که

انتظار می‌رود برآیند گشتاورها صفر است. اگر یک میدان در جهت راست به کار بسته شود حوزه‌هایی که جهت گشتاورشان در خلاف جهت میدان است کم می‌شوند (نقطه‌ی B). افزایش بیشتر میدان باعث چرخش حوزه‌ها در جهت میدان می‌شود (نقطه‌ی D') و نمونه به اشباع می‌رسد. با حذف میدان، گشتاورهای هر حوزه می‌خواهند که در جهت محور آسان خودشان قرار گیرند. اما برای هر محور آسان دو جهت وجود دارد، یعنی اگر برای نمونه سمت بالا محور آسان باشد، سمت پایین نیز محور آسان است. بدین ترتیب پس از حذف میدان، گشتاورها ترجیح می‌دهند در جهت محور آسانی قرار بگیرند که با زاویه‌ی چرخش کمتری به آن می‌رسند. پس همان گونه که دیده می‌شود در نقطه‌ی D نیمی از جهت‌ها خالی می‌مانند و این دلیل به وجود آمدن پسماند است.



شکل ۶

بخش دوم:

تغییرات مغناطش اشباع می‌تواند متأثر از عوامل گوناگونی باشد که یکی از این عوامل دماست. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با کاهش دما مغناطش افزایش می‌یابد که به علت کم شدن بی‌نظمی‌های افت و خیزهای گرمایی است. رابطه‌ی زیر که به قانون وایس معروف است، ارتباط میان مغناطش و دما را برای یک ماده‌ی فرومغناطیس نشان می‌دهد. $M(0)$ مغناطش در صفر مطلق، T دمای مطلق و A_{exp} ثابتی است که به صورت تجربی به دست می‌آید:

$$M(T) = M(0) (1 - A_{exp} T^{3/2})$$

میدان وادارنده یا وادارندگی (H_c) نیز مانند مغناطش با افزایش دما کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش دما بی‌نظمی افزایش یافته و مغناطش کاهش می‌یابد، پس میدان کمتری برای صفر کردن مغناطش پسماند لازم است

ابزارهای آزمایش: نوسان‌نما، منبع تغذیه، چنبره‌ی آهنی سیم‌پیچی شده، مدار، آمپرسنج، کوره، دماسنج

انجام آزمایش:

الف: رسم چرخه‌ی اصلی

نخست هسته‌ای با مشخصات (شکل ۷) را که یک سوی آن با $N_1=100$ دور (سیم پیچ اولیه) و سوی دیگر آن با $N_2=200$ دور (سیم پیچ ثانویه) سیم پیچیده شده، در مدار با مشخصات (شکل ۸) قرار می‌دهیم. با عبور جریان متناوب i از سیم پیچ اولیه یک شدت میدان مغناطیسی در آن ایجاد می‌شود که از رابطه‌ی $(H=iN_1/l)$ به دست می‌آید و در آن l میانگین محیط حلقه است. برای نشان دادن شدت میدان مغناطیسی بر روی محور افقی نوسان-نما، مقاومتی با مدار اولیه سری کرده و دو سر آن را به نوسان نما وصل می‌کنیم.

این میدان مغناطیسی متناوب یک القای مغناطیسی متناوب $B(t)$ در سیم پیچ ثانویه القا می‌کند. پس بر پایه‌ی قانون القای فارادی یک ولتاژ القایی $(V_2=N_2AdB/dt)$ در دو سر سیم پیچ ثانویه خواهیم داشت که با انتگرال گیری آن نسبت به زمان داریم:

$$\int_0^{RC} V_2 dt = N_2 A \int_0^B dB \rightarrow V_2 = BAN_2/RC$$

که در آن A مساحت سطح مقطع هسته، R مقاومت و C ظرفیت خازن در مدار ثانویه است. این ولتاژ را به کانال ۲ نوسان نما وصل می‌کنیم. بر روی نوسان نما بهره‌ی تقویت کننده‌های افقی و عمودی را تغییر می‌دهیم تا چرخه‌ی پسماند بر روی صفحه‌ی نوسان نما دیده شود. ولتاژ ورودی را کم کم افزایش می‌دهیم تا ماده به حالت اشباع برسد. توجه کنید که اگر ولتاژ سیم پیچ اولیه را بیش از حد افزایش دهید، این پیچه به شدت گرم شده و ممکن است بسوزد. اگر با افزایش ولتاژ، نقطه‌ای که منحنی محور عمودی را قطع کرده جابه‌جا نشود هسته به اشباع رسیده است و دیگر لازم نیست که ولتاژ را افزایش دهید. در این جا چند نقطه از منحنی، به ویژه نقاطی که منحنی پسماند محورهای عمودی و افقی را قطع کرده است، برگزیده و مختصات آن‌ها را از روی نوسان نما یادداشت می‌کنیم. هم چنین جریان مدار اولیه را از روی آمپرسنج خوانده و می‌نویسیم. این جریان، جریان موثر و رابطه‌ی آن با جریان بیشینه به صورت $I_{max}=\sqrt{2}I_{eff}$ است. فاصله‌ی افقی نوک تا نوک چرخه پسماند بر روی محور افقی برابر $2I_{max}$ است. در نتیجه جریان هر خانه‌ی افقی با تقسیم $2I_{max}$ بر تعداد خانه‌ها به دست می‌آید. H را به ازای i های گوناگون از رابطه‌ی $H=iN_1/l$ و B را از رابطه‌ی $B=V_2RC/N_2A$ به ازای ولتاژهای گوناگون حساب می‌کنیم و سرانجام منحنی B بر حسب H را رسم می‌کنیم.

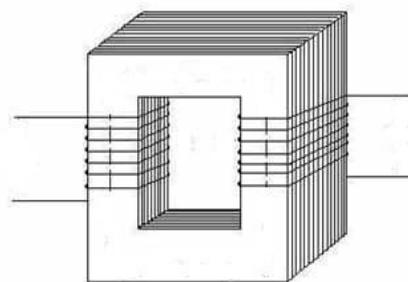
$$N_1=100, N_2=200,$$

$$\bar{l}=14.6 \text{ cm}$$

$$A=0.56 \text{ cm}^2$$

$$C=1.25\mu\text{F}$$

(شکل ۷)



- ۳- اتلاف انرژی پسماند در واحد حجم را در یک دوره از روی سطح حلقه‌ی پسماند محاسبه کنید.
- ۴- خطاهای اندازه‌گیری را به دست آورید.

پرسش‌ها:

- ۱- تفاوت مواد مغناطیسی نرم و سخت چیست؟
- ۲- چرا با کاهش دما منحنی هیستریزیس فشرده‌تر می‌شود؟
- ۳- خطاهای آزمایش را نام برده و راه‌های کاهش این خطاها را بنویسید.

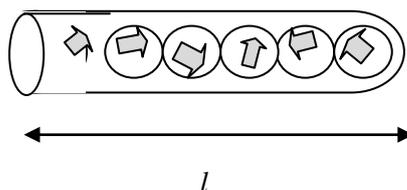
آزمایش ۴

اندازه‌گیری مغناطوتنگش با تداخل سنج مایکلسون

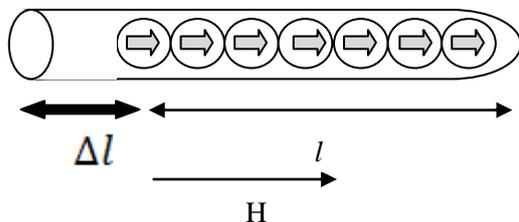
هدف: بررسی اثر کاربست یک میدان مغناطیسی بر ابعاد یک نمونه

زمینه‌ی نظری آزمایش: دیدگاه ماکروسکوپی پدیده مغناطوتنگش

مغناطوتنگش پدیده‌ای است که در مواد مغناطیسی دیده می‌شود. در این پدیده شکل نمونه به هنگام فرآیند مغناطش تغییر می‌یابد. این پدیده اولین بار در سال ۱۸۶۵ کشف شد که به اثر ویلاری مشهور است. این پدیده در ساخت ابزارهایی مانند حسگرها، ربات‌ها، ابزارهای مخبراتی، شتاب‌سنج‌ها و ... کاربرد دارد. دو گونه مغناطوتنگش وجود دارد: یکی مغناطوتنگش ذاتی که از مرتب شدن گشتاورهای مغناطیسی درون حوزه‌ها در دمای کوری ایجاد می‌شود و دیگری که برآمده از کاربست یک میدان مغناطیسی بیرونی است. مغناطوتنگش ذاتی درون حوزه‌ها هنگامی ایجاد می‌شود که ماده فرومغناطیسی از دماهای بالاتر از دمای کوری سرد شده و حوزه‌های تازه‌ای در آن ایجاد می‌شود. مغناطوتنگش برآمده از میدان مغناطیسی بیرونی هنگامی به وجود می‌آید که حوزه‌های دارای مغناطوتنگش ذاتی در میدان مغناطیسی بیرونی بازتوزیع شوند که در بیشتر موارد این تغییر بسیار کوچک است. این پدیده را در اجسام فرومغناطیس و فری مغناطیس می‌توان آشکار کرد. تغییر طول نسبی در جهت میدان مغناطیسی بیرونی $\lambda = \pm \frac{\Delta l}{l}$ برآمده از مغناطوتنگش می‌تواند مثبت (افزایش طول یا کشیدگی) یا منفی (کاهش طول یا جمع شدگی) باشد ولی بسیار کوچک و در حدود 10^{-5} تا 10^{-3} است (شکل ۱). تغییر طول را نباید با تغییر طول‌های دیگری که برآمده از فشار یا دما هستند، اشتباه کرد. این تغییر طول را می‌توان با روش‌های اپتیکی، مکانیکی و الکتریکی اندازه‌گیری کرد. برای تک‌بلورها از پیمانه‌ی کرنشی و برای اجسام بزرگ و بس‌بلورین از روش‌های تداخل‌سنجی بهره گرفته می‌شود.



زمانی که $H=0$ است، جهت گشتاورهای مغناطیسی کاتوره‌ای اند.



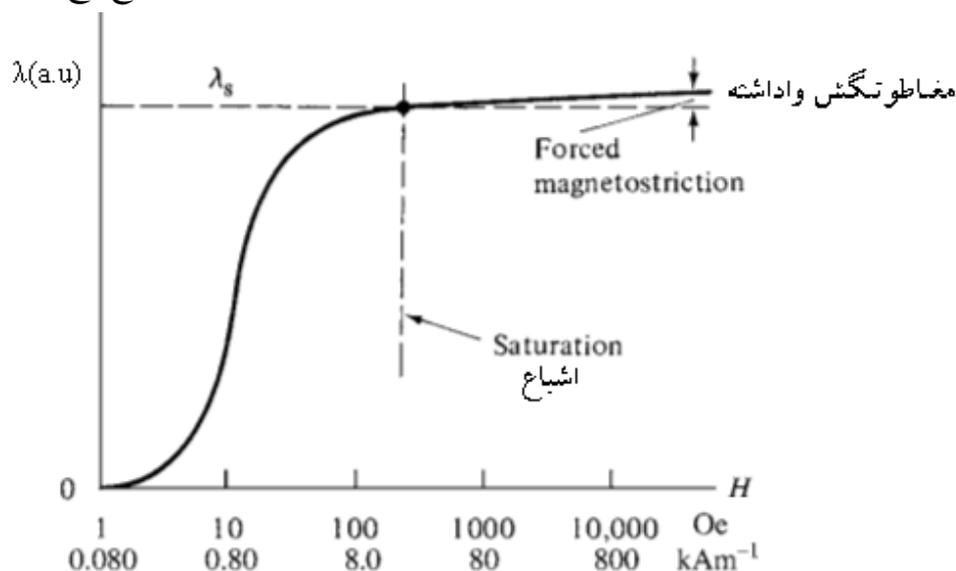
با کاربست میدان $H \neq 0$ گشتاورهای مغناطیسی در یک جهت قرار می‌گیرند و تغییر طول Δl ایجاد می‌شود.

شکل ۱: تغییر طول نسبی $\frac{\Delta l}{l}$ میله برآمده از کاربست یک میدان مغناطیسی بیرونی

فرآیند مغناطوتنگش با دو سازوکار، یکی حرکت دیواره‌ی حوزه‌ها و دیگری چرخش حوزه‌ها رخ می‌دهد و بیشتر تغییرات طولی مغناطوتنگش از چرخش حوزه‌ها است. تغییرات λ بر حسب میدان بیرونی B برای یک ماده فرو یا فری مغناطیس در (شکل ۲) آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، مقدار λ بی که در حالت اشباع مغناطیسی (میدان‌های مغناطیسی قوی بیرونی) اندازه‌گیری می‌شود، را مغناطوتنگش اشباعی λ_s می‌گویند. دلیل اشباع مغناطوتنگش این است که درون مواد فرومغناطیس، حوزه‌های مغناطیسی با مغناطش خودبه‌خودی وجود دارد که در هر یک از این حوزه‌ها، تمام گشتاورهای مغناطیسی موازی یکدیگر هستند. در نبود میدان مغناطیسی بیرونی، گشتاورهای حوزه‌های گوناگون به گونه‌ی کاتوره‌ای در جهت‌های گوناگون قرار گرفته‌اند و گشتاور مغناطیسی کل نمونه صفر است. با کار بست یک میدان مغناطیسی بیرونی شبکه بلور هر حوزه در جهت گشتاور آن حوزه تغییر شکل می‌یابد و در اثر آن محورهای کشیدگی همراه با چرخش گشتاور مغناطیسی حوزه دوران می‌یابد و شکل کلی جسم تغییر می‌یابد. میان حالت وامغناطیده و حالت اشباع، حجم ماده با تقریب خوبی ثابت می‌ماند. این بدان معنی است که مغناطوتنگش عرضی که تقریباً برابر با نصف مغناطوتنگش طولی است، با علامت مخالف وجود دارد:

$$\lambda_t = -\frac{\lambda}{2}$$

در هر دما هنگامی که ماده به حالت اشباع می‌رسد، حوزه‌ها با میدان هم‌سو شده و کل نمونه به یک تک حوزه مغناطیسی تبدیل می‌شود. اینک اگر میدان کاربستی افزایش یابد، تغییرات اندکی در λ ایجاد می‌شود که آن را **"مغناطوتنگش واداشته"** می‌نامند. این مغناطوتنگش با مغناطوتنگش ذاتی تفاوت دارد. مغناطوتنگش واداشته با افزایش میزان نظم اسپینی که می‌تواند در میدان‌های بسیار بزرگ رخ دهد، انجام می‌گیرد. مغناطوتنگش واداشته یک تغییر کوچک در حجم به وجود می‌آورد که به آن **"مغناطوتنگش حجمی"** گویند و این مغناطوتنگش از مرتبه‌ی 10^{-10} به ازای هر اورستد است و در میدان‌های بالاتر از میدان اشباع رخ می‌دهد.



شکل ۲: وابستگی مغناطوتنگش به میدان مغناطیسی بیرونی (نموده کنید که مقیاس محور افقی لگاریتمی است).

دیدگاه میکروسکوپی پدیده مغناطوتنگش:

گشتاور مغناطیسی یک اتم آزاد با گشتاورهای مداری و اسپینی الکترون در زیر پوسته‌های ناکامل (خالی) ساختار الکترونی اتم ارتباط دارد. در مورد یک ماده‌ی فرومغناطیس که از حوزه‌های مغناطیسی گوناگون تشکیل شده است، نیروهای تبادلی میان اسپین‌ها باعث یک نظم موازی یا پادموازی گشتاورهای مغناطیسی با جهت آسان حوزه‌ها می‌شود. محورهای اسپینی برخلاف محورهای مداری به شبکه بلور مقید نیستند. در هر حال یک جفت-شدگی میان اسپین و مدار وجود دارد که باعث می‌شود جفت‌شدگی ناچیزی میان اسپین‌ها و شبکه بلور به وجود آید. این جفت‌شدگی همان جفت‌شدگی اسپین-مدار است که باعث می‌شود حوزه‌ها از ویژگی‌های مغناطیسی جهت‌دار برخوردار شده و ناهمسانگردی مغناطیسی را به وجود می‌آورد. انرژی مربوط به این جفت‌شدگی برای آهن هنگامی کمینه است که محورهای اسپینی در جهت‌های [100] باشند، در حالی که برای نیکل این محورها در جهت‌های [111] است. این جهت‌ها را جهت‌های "آسان مغناطش" می‌گویند. در یون‌ها یا اتم آزاد شکل اوربیتال را برهم‌کنش‌های درون اتم و m_l تعیین می‌کند. وقتی به بررسی شبکه بلور پردازیم، نوعی برهم-کنش دیگر هم وجود دارد که به آن میدان بلور می‌گویند. به عنوان نمونه در شبکه bcc اتم میانی هشت همسایه دارد و هر کدام از همسایه‌ها هسته و الکترون دارد، بنابراین با اعمال میدان بیرونی شکل ابر الکترونی عوض می‌شود. مثلاً اگر لایه آخر p (دمبلی شکل) است، شکل دمبل تغییر می‌کند. بنابراین m_l تعیین‌کننده شکل اوربیتال نیست، بلکه شبکه تعیین‌کننده آن است. بدین ترتیب جفت‌شدگی اسپین-مدار به جفت‌شدگی اسپین-شبکه می‌انجامد. اگر در یک حوزه‌ی فرومغناطیس، محورهای مداری با کاربست یک میدان مغناطیسی بیرونی بچرخند، آنگاه ابعاد شبکه تغییر می‌کند که به آن مغناطوتنگش می‌گویند.

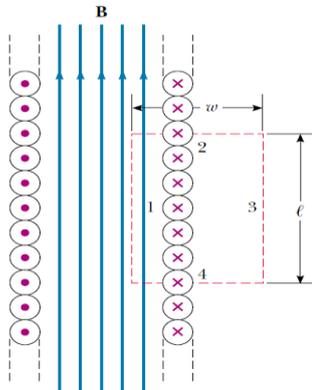
ابزارهای آزمایش:

- ۱- تداخل سنج مایکلسون (دو عدد آینه تخت، یک آینه نیم بازتابنده، یک عدسی واگرا ساز و یک عدسی همگرا ساز)
- ۲- چهار نمونه‌ی میله‌ای شکل از فولاد، مس، آلومینیوم و برنج
- ۳- چشمه‌ی لیزری
- ۴- منبع تغذیه‌ی مستقیم با آمپرسنج
- ۵- سیم‌های رابط

شرح آزمایش:

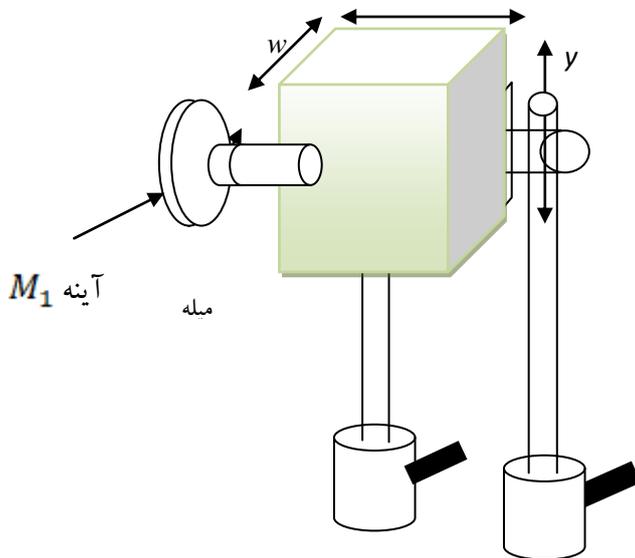
نخست نمونه‌ی میله‌ای شکل را درون سیم‌پیچ قرار دهید به گونه‌ای که هیچ‌گونه تماس فیزیکی با دیواره‌های درونی سیم‌پیچ نداشته باشد. هم‌چنین دقت کنید که در حد امکان میله بر روی محور مرکزی سیم‌پیچ قرار گیرد. یک سر میله را در گیره ثابت کنید و سپس آینه M_1 را در سر دیگر میله قرار دهید (مانند شکل ۳). بدین ترتیب، افزایش طول میله به جابه‌جایی آینه M_1 منجر می‌شود. از آنجا که بیشترین شدت میدان مغناطیسی در میانه‌ی سیم‌پیچ با طول l است، بخش‌هایی از میله که در بیرون سیم‌پیچ قرار می‌گیرد، میدان مغناطیسی ضعیف‌تر و در نتیجه مغناطوتنگش کمتری خواهند داشت. مطابق (شکل ۴) برای بررسی میدان مغناطیسی بیرونی ۳ ناحیه داریم. ناحیه ۱ که با فرض بی‌نهایت بودن طول سیم‌پیچ، بیشینه میدان مغناطیسی را خواهد داشت. ناحیه ۲ که

مربوط به لبه‌های سیم‌پیچ است و میدان مغناطیسی ضعیف‌تری خواهد داشت و ناحیه ۳ که مربوط به بخش‌هایی از میله نمونه است که خارج سیم‌پیچ قرار گرفته و در این ناحیه $B=0$ است. ناحیه ۳ در محاسبه میدان B تأثیری ندارد و کاهش میدان بخش ۲ توسط بخش ۱ جبران می‌گردد.

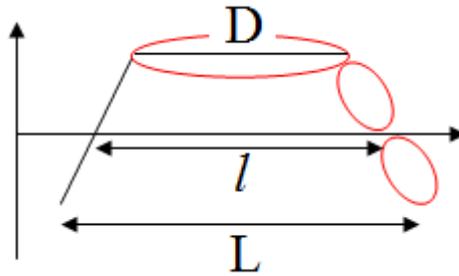


شکل ۴: بخش‌های مختلف میدان مغناطیسی سیم‌پیچ

مطابق قانون آمپر (شکل ۵) انتگرال بر روی مسیرهای ۲، ۳، ۴ برابر صفر است و طول l که نشان دهنده انتگرال روی مسیر ۱ است، در محاسبات وارد می‌شود. بنابراین میدان مغناطیسی سیم‌پیچ از رابطه $B = \mu_0 n I = \frac{\mu_0 N I}{l}$ به دست می‌آید که در این رابطه $n = N/l$ شمار دورها بر یکای طول است. (برای کاربرد این رابطه باید توجه کرد که $l \gg y$ باشد) اگر طول کل میله (نمونه) L و بخشی از طول میله که درون سیم‌پیچ قرار می‌گیرد را با l نمایش دهیم، در محاسبات باید l را وارد کرد که دقیقاً برابر با طول سیم‌پیچ است چون عرض w در محاسبه میدان مغناطیسی داخلی تأثیری ندارد. در شکل ۳ چگونگی قرارگیری نمونه که در انتهای آن آینه مسطحی قرار گرفته است، در داخل سیم‌پیچ نشان داده شده است.

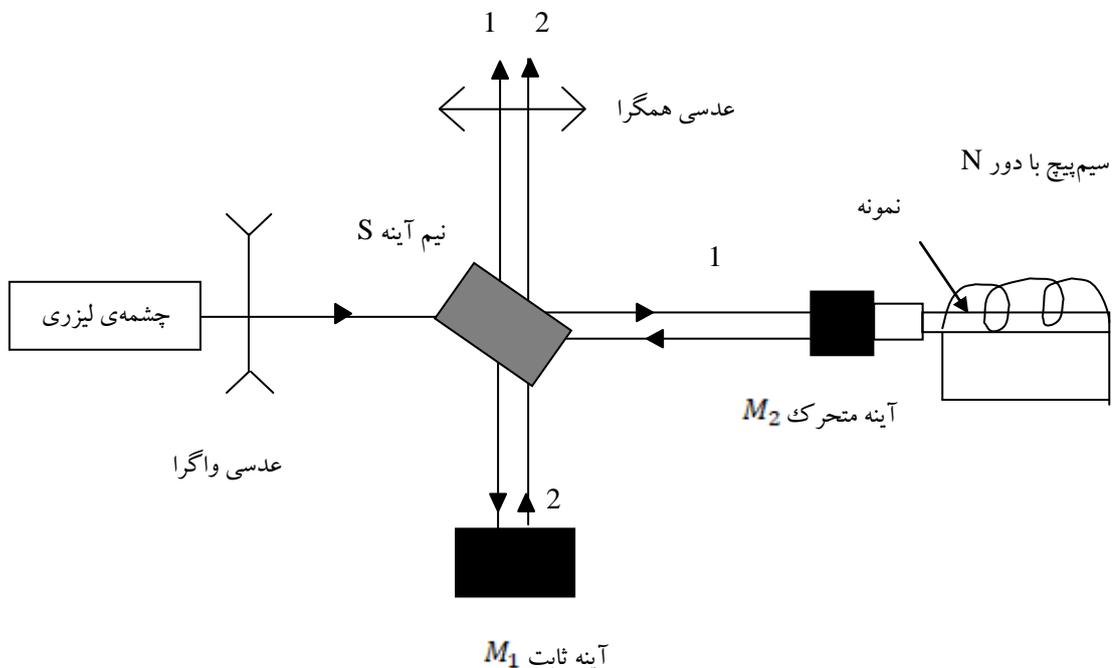


شکل ۴: نحوه قرارگیری نمونه که در انتهای آن آینه مسطحی قرار



شکل ۵: برای محاسبه میدان مغناطیسی موثر بر میله، برآمده از سیم پیچ، تنها کافی است که l را در رابطه قرار دهیم. L طول کل میله و D ناحیه‌ای است که در آن میدان روی محور سیم‌لوله تقریباً یکنواخت است.

چینش آزمایش را بر پایه (شکل ۶) برپا کنید. چشمه‌ی لیزری را روشن کرده و پرتو لیزر را چنان قرار دهید که بر آینه M_1 عمود باشد. برای اطمینان از عمود بودن پرتو لیزر، لیزر و آینه را آن قدر جابه‌جا کنید تا تصویر پرتو دقیقاً بر روی خود لیزر بازتاب کند. اکنون آینه M_2 و نیم‌آینه را مطابق شکل قرار دهید. پیش از نیم‌آینه در مسیر پرتو ۱ عدسی و اگر ساز را قرار دهید تا نور لیزر تمام سطح نیم‌آینه‌ی S را بپوشاند. حال با جابه‌جایی آینه‌های M_2 و نیم‌آینه‌ی S پرتوهای ۱ و ۲ را روی هم بیندازید تا حلقه‌ها را ببینید. برای اینکه تصویر بر روی پرده راحت‌تر دیده شود، عدسی همگراساز را در مسیر پرتو منطبق شده ۱ و ۲ قرار دهید. با تنظیم دستگاه، حلقه‌هایی روی پرده سفید نمایان می‌شود. حال اگر یک میدان مغناطیسی با برقراری جریان مستقیم در سیم پیچ ایجاد شود، طول نمونه تغییر می‌کند و در نتیجه قطر حلقه‌های تداخلی در اثر تغییر طول تغییر می‌کند (در مرکز به تدریج دایره‌های تازه‌ای به وجود می‌آید و یا دایره‌های پیشین کوچک شده و در مرکز ناپدید می‌شود).



شکل ۶: نگاره‌ی دستگاه مغناطوتنگش. پیچه N دوری که نمونه میله‌ای شکل روی محور آن بسته شده است، یک میدان مغناطیسی با تقریب خوب یکنواخت روی محورش ایجاد می‌کند.

هر گاه طول میله به اندازه $\frac{\lambda}{2}$ زیاد شود، یک حلقه به وجود می آید و هر گاه طول میله به اندازه $\frac{\lambda}{2}$ کم شود، یک حلقه ناپدید می شود (به عنوان مثال اگر مرکز حلقه ها تاریک باشد و آینه متحرک M_2 (طول بازو) به اندازه $\frac{\lambda}{2}$ جابه جا شود، اختلاف راه نوری به اندازه λ تغییر می کند و مرکز دوباره تاریک می شود). اگر تعداد حلقه های به وجود آمده یا ناپدید شده در اثر میدان مغناطیسی معلوم H را با m نمایش دهیم، افزایش طول میله در اثر میدان مغناطیسی H برابر است با:

$$\Delta l = m \frac{\lambda}{2}$$

برای محاسبه میدان بر روی محور سیم پیچ باید توجه نمود که سیم پیچ طول l دارد و چون تمام سیم ها به صورت فشرده و تنگ هم پیچیده شده اند و هر سیم قطر d دارد؛ اگر طول سیم پیچ را تقسیم بر قطر سیم کنید، تعداد دورها در هر ردیف به دست می آید و به این ترتیب اگر تعداد کل دورهای سیم پیچ (N) را تقسیم بر تعداد دور در هر ردیف کنید، تعداد طبقات (N') به دست می آید:

$$\text{تعداد دورها در هر ردیف} = \frac{l}{d}$$

$$\text{تعداد طبقات: } N' = \frac{N}{l/d}$$

سرانجام برای محاسبه میدان مغناطیسی برآمده از سیم پیچ از رابطه زیر استفاده کنید:

$$H = \frac{N}{l/d} \times \frac{l}{d}$$

$$H = nI = N' \frac{l}{d}$$

روش کار:

دستگاه را روشن کنید. هر بار ولتاژ دستگاه را به اندازه ای تغییر دهید که یک حلقه تولید یا نابود شود و مقادیر متناظر برای جریان را از روی دستگاه یادداشت نمایید. (دقت کنید مقدار جریان از ۲ آمپر بالاتر نرود) میدان مغناطیسی را نیز برای هر حلقه محاسبه کنید. سرانجام نمودار $\frac{\Delta l}{l}$ بر حسب H را رسم کنید.

m	I	H	Δl	$\frac{\Delta l}{l}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

پرسش‌ها:

- ۱) موارد ایجاد خطا در آزمایش را نام ببرید.
- ۲) میزان خطای افزایش طول در آزمایش را تعیین کنید.
- ۳) چرا در زیر دستگاه‌های آزمایش از تیوپ استفاده می‌کنیم؟
- ۴) چرا با فوت کردن (تغییر جریان هوا) حلقه‌های تاریک و روشن جابه‌جا می‌شوند؟

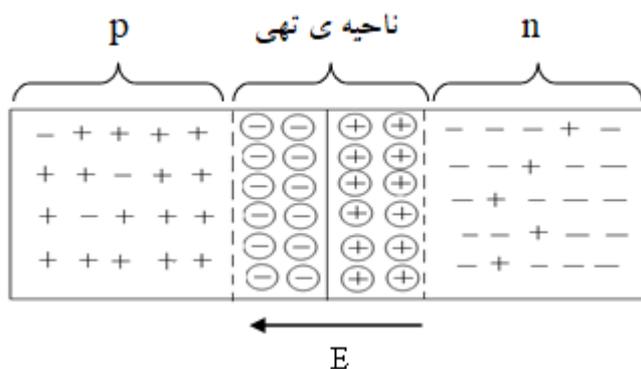
آزمایش ۵

ویژگی‌های نیم‌رساناها: باتری خورشیدی

هدف آزمایش: بررسی تغییرات I_s با شدت نور فرودی، محاسبه ولتاژ مدار باز (V_{oc})، محاسبه سازه‌ی پرشدگی (FF)، بررسی تغییرات I با زاویه‌ی فرود (زاویه‌ی میان خط عمود بر سطح باتری خورشیدی و پرتو فرودی)

نظریه‌ی آزمایش، باتری خورشیدی چیست؟

باتری خورشیدی یک پیوندگاه p-n است که می‌تواند انرژی نورانی خورشید یا چشمه‌های دیگر را به انرژی الکتریکی تبدیل نماید. اگر یک نیم‌رسانای گونه n را روی یک نیم‌رسانای گونه p (یا وارون آن) رشد دهیم، یک پیوند p-n به دست می‌آید و مرز مشترک آن دو را پیوندگاه p-n می‌نامند. دقت کنید که نمی‌توان دو قطعه‌ی جداگانه‌ی نیم‌رساناهای n و p را رشد داد و سپس به هم چسباند یا جوش داد چنین قطعه‌ای ویژگی پیوندگاه p-n را نخواهد داشت. یک نیم‌رسانای گونه n الکترون آزاد و یک نیم‌رسانای گونه p حفره‌ی آزاد دارد. هنگامی که پیوند p-n تشکیل می‌شود، الکترون‌هایی که در ناحیه‌ی n و در نزدیکی پیوندگاه قرار دارند به سوی ناحیه‌ی p و حفره‌هایی که در ناحیه‌ی p قرار دارند به سوی ناحیه‌ی n می‌روند. کوچ این حامل‌ها باعث به‌جا ماندن یون‌های منفی در ناحیه‌ی p و یون‌های مثبت در ناحیه‌ی n (شکل ۱) و در پی آن به ایجاد یک میدان الکتریکی درونی، می‌انجامد. با کوچ بیشتر حامل‌ها در نزدیکی پیوندگاه میدان درونی قوی و قوی‌تر شده تا جایی که از کوچ بیشتر بارها جلوگیری نماید و انتقال خالص بارها صفر شود. جهت این میدان به گونه‌ای است که از رفتن الکترون‌ها از ناحیه‌ی n و حفره‌ها از ناحیه‌ی p به سوی دیگر جلوگیری می‌کند و بدین ترتیب در ناحیه‌ی پیوندگاه شمار حامل‌های بار آزاد بسیار کم است. به همین دلیل این ناحیه را ناحیه‌ی تهی یا فضای بار می‌نامند (شکل ۱).



شکل ۱: نگاره‌ی یک پیوندگاه p-n و چگونگی تشکیل میدان الکتریکی درونی.

اگر نور (خورشید یا هر چشمه‌ی دیگری) به پیوندگاه بتابد، فوتون‌هایی که انرژی آن‌ها از گاف انرژی نیم‌رسانا بیشتر است، زوج الکترون-حفره تولید کرده و زوج‌هایی که در ناحیه‌ی تهی و نزدیک به آن تولید شده‌اند، شانس زیادی دارند که پیش از بازترکیب، با میدان درونی پیوند از هم جدا شوند. جهت این میدان الکتریکی به-

گونه‌ای است که الکترون‌ها را به ناحیه‌ی n و حفره‌ها را به ناحیه‌ی p می‌فرستد، پس انباشتگی بار منفی در ناحیه‌ی n و انباشتگی بار مثبت در ناحیه‌ی p بیشتر می‌شود پیامد این انباشتگی‌ها را می‌توان به صورت ولتاژی در دو سر پیوند آشکار و اندازه‌گیری کرد. اگر دو سر پیوند با یک سیم اتصال کوتاه شود، الکترون‌های آزاد ناحیه- n از راه سیم به ناحیه‌ی p رفته و جریانی (اتصال کوتاه) را به وجود می‌آورند. اگر به جای سیم یک مصرف-کننده قرار داده شود، عبور جریان می‌تواند به آن انرژی منتقل کند. به این ترتیب انرژی فوتون‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. به چنین سامانه‌ای که انرژی نورانی را به ولتاژ یا هم‌ارز آن به جریان الکتریکی تبدیل کند، سامانه‌ی **فوتوولتاییک** گفته می‌شود.

منحنی مشخصه جریان-ولتاژ یک باتری خورشیدی و پارامترهای مهم آن

باتری‌های خورشیدی بیشتر با منحنی جریان-ولتاژ ($I-V$) زیر تابش یک چشمه‌ی نوری که بیناب خورشید را بازسازی می‌کند، شناسایی می‌شوند. چنین دستگاهی را "**شبیه‌ساز خورشیدی**" می‌نامند. کارکرد باتری خورشیدی در بازه‌ی میان شرایط مدار باز و اتصال کوتاه سنجیده می‌شود. در شکل ۲ منحنی مشخصه‌ی ($I-V$) یک باتری خورشیدی به همراه پارامترهای مهم آن، جریان اتصال کوتاه مدار I_{sc} ، ولتاژ مدار باز V_{oc} و جریان و ولتاژ در نقطه‌ی بیشینه توان (V_{mpp} و I_{mpp}) آورده شده است. در زیر به شرح این پارامترها می‌پردازیم.

۱- جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) (Short circuit current):

I_{sc} بیشینه جریانی است که از یک باتری خورشیدی می‌گذرد و هنگامی به دست می‌آید که دو سر آن اتصال کوتاه شود یا هم‌ارز آن I_{sc} جریانی است که هنگامی که هیچ میدان الکتریکی بیرونی وجود ندارد در مدار شارش می‌یابد. در این حالت بارهای آزاد با میدان درونی جابه‌جا می‌شوند.

۲- ولتاژ مدار باز (V_{oc}) (Open circuit voltage):

V_{oc} بیشترین ولتاژ ممکن ایجاد شده در باتری خورشیدی است و هنگامی ایجاد می‌شود که جریان گذرنده از پیوندگاه صفر باشد. به عبارت دیگر هنگامی که مقاومت بیرونی دو سر پیوندگاه بینهایت یعنی مدار باز باشد.

۳- نقطه بیشینه‌ی توان (V_{mpp} و I_{mpp}) (Maximum power point-mpp):

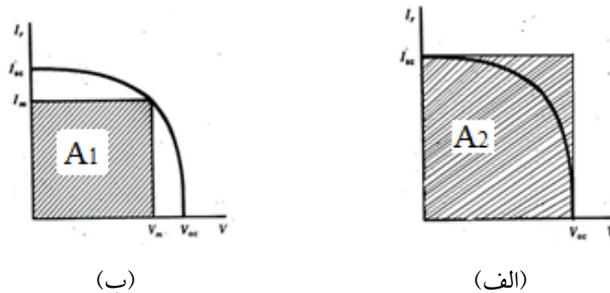
نقطه بیشینه‌ی توان، نقطه‌ای است که در آن حاصل ضرب جریان و ولتاژ بیشینه می‌گردد. جریان و ولتاژ در این نقطه به ترتیب با V_{mpp} و I_{mpp} نمایش داده می‌شود. در کاربردهای باتری خورشیدی مدار را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که باتری پیرامون این نقطه کار کند.

۴- سازه‌ی پرشدگی (FF) (Fill factor-FF):

سازه‌ی پرشدگی باتری خورشیدی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

این سازه، کیفیت باتری خورشیدی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در نمودار $I-V$ (شکل ۲) نسبت مساحت-های دو ناحیه‌ی A_1 و A_2 (A_1/A_2) را سازه‌ی پرشدگی گویند. اندازه مساحت این دو ناحیه به یکدیگر نزدیک‌تر باشد، یعنی FF به یک نزدیک‌تر باشد، باتری خورشیدی کیفیت بهتری دارد.



شکل ۲: منحنی مشخصه $(I-V)$ یک باتری خورشیدی، (الف) مساحت مربوط به $V_{oc} \cdot I_{sc}$ ، (ب) نقطه‌ی کار و بیشینه توان ممکن برای یک باتری خورشیدی.

ابزارهای آزمایش:

باتری خورشیدی، ولت سنج، آمپر سنج، جعبه مقاومت، چراغ (۶ ولتی)، میزچه‌ی مدرج

روش آزمایش:

نور چشمه را بر روی باتری خورشیدی بیندازید.

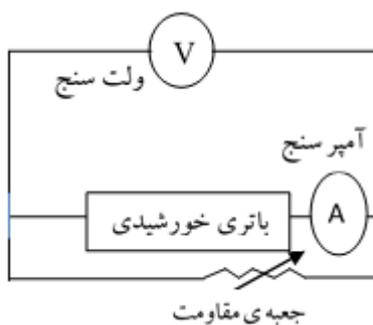
۱- جریان اتصال کوتاه I_{sc} را با اتصال مستقیم آمپرسنج به دو سر باتری خورشیدی بر حسب فاصله‌ی چشمه از آن اندازه بگیرید. و در جدول زیر یادداشت کنید. منحنی جریان اتصال کوتاه I_{sc} بر حسب فاصله‌ی چشمه از باتری خورشیدی را رسم کنید. آیا رابطه خطی است؟ شما انتظار دارید که چه رابطه‌ای میان I_{sc} و فاصله وجود داشته باشد؟ آن را با یک تابع مناسب برازش دهید و معادله‌ی آن را به دست آورید. می‌توانید از یک نرم‌افزار مناسب بهره بگیرید.

نکته: تغییر در فاصله چشمه از باتری خورشیدی برای تغییر در شدت نور تأییده به باتری است.

جدول ۱: تغییرات جریان بر حسب فاصله‌ی چشمه از باتری خورشیدی

\pm فاصله (cm)	$I_{sc} \pm$
۹۰	
۸۵	
۸۰	
۷۵	
۷۰	
۶۵	
۶۰	
۵۵	
۵۰	
۴۵	

۲- مدار آزمایش را مانند شکل زیر ببندید.



شکل ۳: مدار آزمایش

باتری را در فاصله‌ی ثابتی از لامپ (پیرامون ۴۰ سانتی متری) قرار داده و مقاومت جعبه مقاومت را تغییر دهید و جدول ۲ را کامل کنید. مقاومت را تا جایی بالا ببرید که دیگر V تغییر نکند، این V_{oc} است. با محاسبه ستون چهارم جدول ۲ بیشینه $I.V$ را مشخص کنید که همان V_{mpp} و I_{mpp} می‌باشد. ساده‌تر آن است که نخست مقاومت را لگاریتمی (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ...) تغییر دهید و سپس مقاومتی که حاصل ضرب IV بیشینه است را به دست آورید. اینک می‌توانید پیرامون آن مقاومت، I و V را برای چند مقاومت دیگر (کوچک‌تر و بزرگ‌تر) نیز اندازه‌گیری کنید تا جای بیشینه را بهتر پیدا کنید.

جدول ۲: تغییرات جریان و ولتاژ بر حسب تغییر مقاومت جعبه مقاومت

R	I	V	$I \times V$

منحنی $I-V$ را رسم کنید. اگر گستره‌ی عددها بزرگ‌اند، می‌توانید محورها را لگاریتمی کنید.

۳- با توجه به اندازه‌گیری‌های بخش‌های پیشین برای I_{sc} و V_{oc} و I_{mpp} و V_{mpp} سازه‌ی پرشدگی و خطای آن را محاسبه کنید.

۴- با یک میزچه‌ی مدرج تغییرات I را به صورت تابعی از زاویه‌ی فرود در فاصله‌ی ثابتی از لامپ اندازه بگیرید و نمودار تغییرات را رسم کنید.

جدول ۳: تغییرات جریان بر حسب تغییر زاویه ی فرود

$\theta(^{\circ})$	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
I										

پرسش ها:

- ۱- چگونگی تشکیل نیم رسانای گونه ی n و گونه ی p را شرح دهید.
- ۲- مراحل تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی را در یک باتری خورشیدی توضیح دهید.
- ۳- خطاهای موجود در آزمایش را بیان کنید و در صورت امکان راه حلی برای کاهش آن ها بدهید.
- ۴- هم ارزی دو تعریف داده شده برای جریان اتصال کوتاه را نشان کنید.
- ۵- آیا اندازه گیری جریان اتصال کوتاه در بخش اول آزمایش، این جریان را به درستی نشان می دهد؟ دلیل آن را بیان کنید.
- ۶- آیا ولتاژ مدار بازی که به دست می آورید با تعریف نظری آن هم خوانی دارد؟ چرا؟

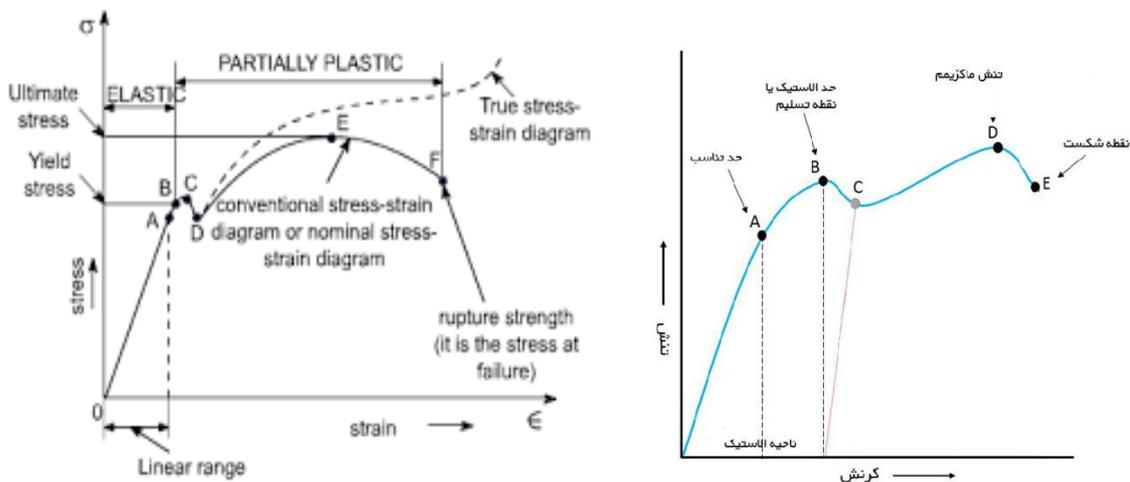
آزمایش شماره ۶

ویژگی های مکانیکی جامدها: کشسانی فلزها

هدف: بررسی نمودار تنش - کرنش چند فلز گوناگون و به دست آوردن حد کشسانی، نقطه تسلیم (یا نقطه سیلان یا شارش یا جاری شدن) و برآورد نقطه گسیختگی آنها

زمینه نظری:

پاسخ یک جامد به یک نیروی کاربستی بیرونی، ویژگی های مکانیکی آن جامد را تعیین می کند. هرگاه نیروی کششی بر جامدی وارد شود، تغییر طولی در آن ایجاد می شود که تغییر نسبی (کرنش) آن بستگی به ویژگی های مکانیکی آن جامد دارد. شکل ۱ نمودار همگانی تنش - کرنش یک جامد را نشان می دهد.



شکل ۱: نمودار همگانی تنش - کرنش یک جامد

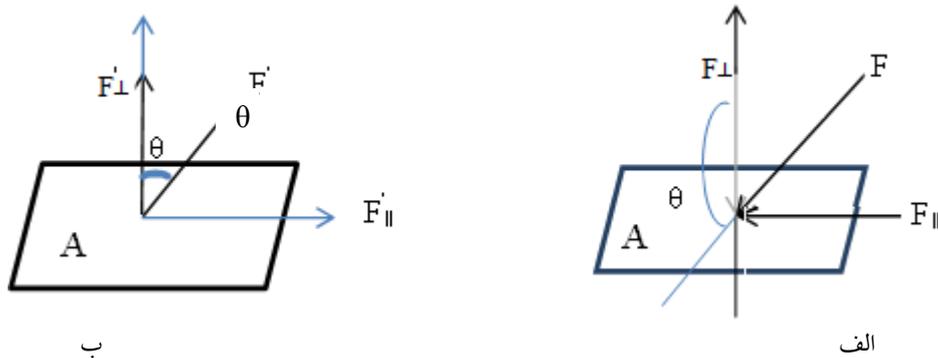
بر پایه ی قانون هوک تغییر درازای یک جامد کش سان، برای تغییر شکل های کوچک، با فشار متناسب است. کرنش، تغییر نسبی طول است. برای یک جسم باریک و بلند (سیم یا میله) از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (1)$$

که در آن ΔL تغییر درازا در راستای کشش و L درازای اولیه ی جسم است. بدین ترتیب می بینیم که کرنش بعد و یکا ندارد. از سوی دیگر، تنش برابر با نیروی وارد بر یکای سطح است. یعنی:

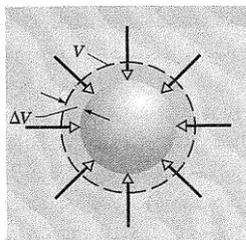
$$\sigma = F/A \quad (2)$$

یکای تنش همانند فشار نیوتن بر متر مربع یا پاسکال (Pa) است. اگر همانند شکل ۲-الف نیروی F با زاویه ی θ نسبت به بردار عمود بر سطح A ، بر سطح وارد شود، آنگاه تنش فشاری با $\sigma_{\perp} = F_{\perp}/A$ و تنش برشی $\sigma_{\parallel} = F_{\parallel}/A$ تعریف می شوند. اگر همانند شکل ۲-ب جهت نیروی F وارونه گردد، آنگاه F'_{\perp}/A تنش کششی نامیده می شود. ولی تنش برشی باز همان F'_{\parallel}/A است. دقت کنید که یکای همه ی تنش ها، همانند و برابر Pa است و تنش فشاری همان کمیتی است که به نام فشار شناخته می شود.



شکل ۲: $\sigma_{\perp} = F_{\perp}/A$ تنش فشاری و $\sigma_{\parallel} = F_{\parallel}/A$ تنش برشی است.

هرگاه مانند شکل ۳ جامد از همه سو با یک فشار هیدرولیکی فشرده شود، تنش هیدرولیکی ایجاد می‌شود و کرنش هیدرولیکی با رابطه $\Delta V/V$ تعریف می‌گردد. این کمیت نیز بی‌بعد و یکااست و فشار وارد بر نمونه همان فشار مایع (معمولاً روغن) پیرامون نمونه است. این آزمایش در دستگاه‌های پرس هم‌فشار^۱ ایجاد می‌شود.



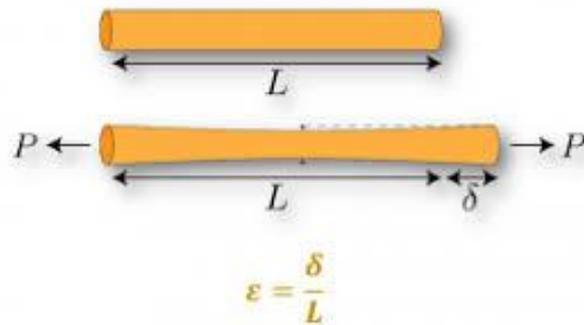
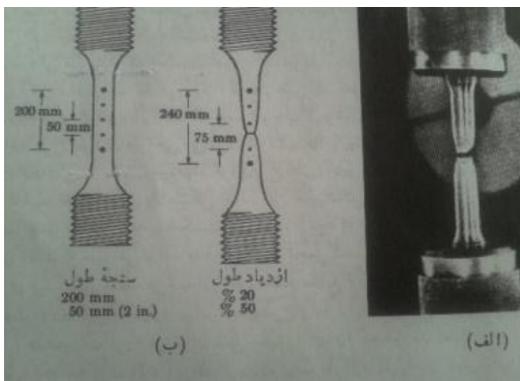
شکل ۳: کره‌ی توپری که حجم آن با تنش هیدرولیکی از طرف شاره، به اندازه‌ی ΔV کم شده است.

رابطه‌ی میان تنش و کرنش برای یک جامد در کرنش‌های کم یا بازه‌ی کش‌سانش با فرمول زیر داده می‌شود که همانند قانون هوک است و در آن ثابت تناسب E ، را مدول کش‌سانی یا مدول یانگ می‌نامند. $\sigma = E\varepsilon$ با کاربست یک تنش عمودی نه‌چندان بزرگ، جامد نخست تغییر طول می‌دهد که با برداشتن آن تنش عمودی، این تغییر طول هم از میان می‌رود و جامد به طول اولیه برمی‌گردد. این بازه روی منحنی تنش-کرنش خطی است. بیشینه‌ی تنش عمودی که جسم می‌تواند بپذیرد و به حالت اولیه برگردد، حد کش‌سانی (الاستیک) نامیده می‌شود. این ناحیه را ناحیه‌ی کش‌سانی جامد می‌گویند (ناحیه‌ی OB شکل ۱). با افزایش بیشتر تنش، جسم تغییر طول همیشگی می‌دهد که با برداشتن تنش به طول اولیه، برنمی‌گردد. این ناحیه را ناحیه‌ی تغییر شکل موم‌سان (پلاستیک) می‌نامند (بازه‌ی BF روی نمودار شکل ۱).

هرگاه طول سیمی با کاربست یک تنش کششی، افزایش یابد و این تنش کوچک‌تر از حد کش‌سانی سیم باشد، با برداشتن تنش، طول سیم به مقدار اولیه‌ی خود برمی‌گردد. در بیشتر جامدها، نمودار تنش-کرنش در حد کش‌سانی، با تقریب بسیار خوب خطی است و در این گستره تنش و کرنش با هم متناسب‌اند و با هر مقدار افزایش تنش، کرنش نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد. شیب این بخش خطی، خط OA در نمودار شکل ۱،

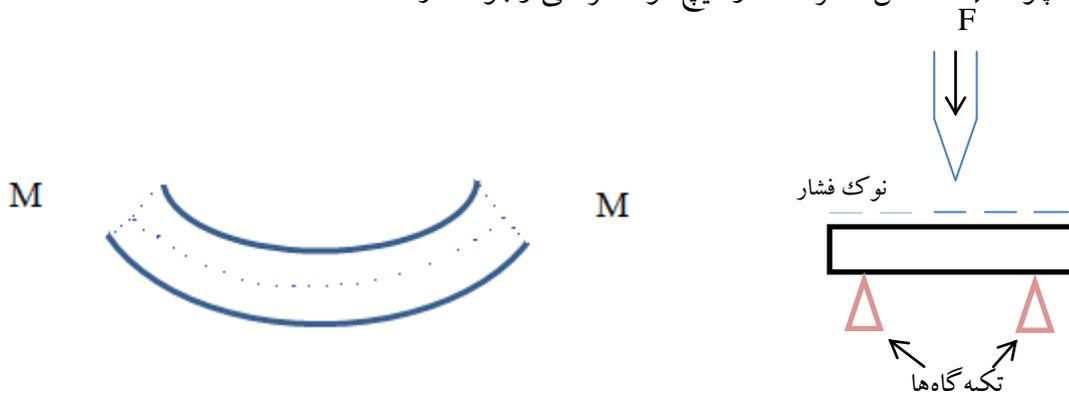
^۱ Isostatic press

مدول کشسانی (E) است. بیشترین تنش در بازه‌ی خطی را حد کشسانی می‌نامند (نقطه‌ی A). اگر تنش از حد کشسانی عبور نماید به محدوده‌ای می‌رسیم که کرنش با تنش رابطه‌ی خطی نداشته و مقدار آن بیش از اندازه‌ی پیش‌بینی شده با قانون هوک خواهد بود. با افزایش تنش (یا نیرو) و گذشتن از حد کشسانی به نقطه‌ی تسلیم می‌رسیم (نقطه‌ی B) که در آن افزایش اندکی در مقدار تنش به کرنش بزرگی می‌انجامد. پس از آن، به ناحیه‌ی موم‌سان (پلاستیکی) می‌رسیم که سیم کرنش همیشگی دارد و تغییر طول بازگشت ناپذیر است. با افزایش بیشتر تنش، مقدار بیشینه‌ی تنش موسوم به تنش نهایی^۲ به دست می‌آید (نقطه‌ی E) که پس از آن، به ناحیه‌ای می‌رسیم که سطح مقطع نقطه‌ای از نمونه در آن کاهش می‌یابد و در نقطه‌ی F که نقطه‌ی شکست نامیده می‌شود، نمونه از آن نقطه گسسته می‌شود. به ناحیه‌ای که سطح مقطع نمونه به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد، ناحیه‌ی گلوئی^۳ می‌گویند که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: الف) آزمایش کشش روی نمونه‌ای فلزی استوانه‌ای (شکل ب) افزایش طول بر حسب سنجه‌ی طول. چون تغییر شکل نهایی در ناحیه‌ی گلوئی متمرکز است، بی‌سنجه‌ی طول، مقدار افزایش طول بی‌معناست. در آزمایش‌های معمول، سنجه‌ی طول ۵۰ میلی‌متری به کار می‌رود.

تنش خمشی نیز گونه‌ای دیگر از تنش‌هاست که با ایجاد خمش در جامد با یک گشتاور نیرو ایجاد می‌شود. این تنش نیز جزو تنش‌های عمودی است. اگر خمش را به شکل زیر در نظر بگیریم، در نیمه‌ی بالایی خط‌چین میانی نمونه، میله فشرده و در نیمه‌ی پایینی میله کشیده شده است. خط‌چین میانی در شکل را لایه یا محور خنثی می‌گویند چون در آن تنش صفر است و هیچ‌گونه کرنشی وجود ندارد.



شکل ۵- تنش خمشی

^۲Ultimate stress

^۳ Necking

از ویژگی های مکانیکی دیگر مواد، انعطاف پذیری، استحکام، سختی و چقرمگی به شرح زیر است.

الف- انعطاف پذیری، کرنش موم سان (پلاستیکی) لازم برای شکست، را می توان به صورت درصد افزایش نسبی طول بیان کرد. انعطاف پذیری، $\Delta L/L$ نیز مانند کرنش، یکا ندارد. چون تغییر طول معمولاً در ناحیه ی گلوئی نمونه، متمرکز می شود، بنابراین مقدار افزایش طول به سنجی طول بستگی دارد. مقیاس دیگری برای انعطاف-پذیری، کاهش سطح مقطع، $\Delta A/A$ ، در نقطه ی شکست است. سطح مقطع مواد با انعطاف پذیری بالا پیش از شکستن، بسیار کاهش می یابد. افزایش طول، اندازه ی «کشش» پلاستیکی است، در حالی که کاهش سطح مقطع، اندازه ی «انقباض» پلاستیکی است.

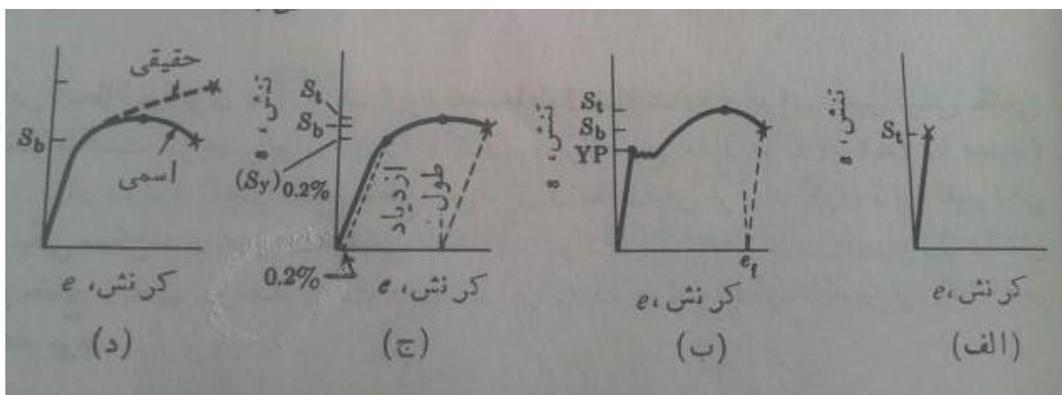
ب- استحکام تسلیم: مقاومت هر ماده را در برابر تغییر شکل پلاستیکی، استحکام تسلیم، S_y ، می نامند که از تقسیم نیرو در لحظه ی شروع تسلیم به سطح مقطع آن به دست می آید. در موادی مانند فولادهای نرم تر، استحکام تسلیم را می توان به صورت نقطه ی تسلیم مشخصی نشان داد.

ج- استحکام کششی، S_t ، از تقسیم بیشینه ی بار به سطح مقطع اولیه ی آن به دست می آید. باید توجه کرد که استحکام کششی بر اساس **سطح مقطع اولیه** محاسبه می شود، این مطلب بسیار مهم است زیرا سطح مقطع ماده ی انعطاف پذیر، زیر بار بیشینه تا اندازه ای کم می شود. بنابراین تنش حقیقی، σ ، از تقسیم نیرو بر سطح واقعی و تنش نامی بر پایه ی سطح اولیه محاسبه می شود. برای مهندسان که باید طراحی های خود را بر پایه ی ابعاد اولیه انجام دهند تنش نامی، اهمیت بیشتری دارد.

د- سختی: مقاومت ماده در برابر فرورفتگی سطح آن را سختی ماده می گویند. پس سختی و استحکام به هم مربوط اند و در آزمایش دیگر بررسی می شود.

ه- چقرمگی: مقدار انرژی لازم برای شکست ماده است. این انرژی متناسب با سطح زیر منحنی تنش-کرنش است. ماده ی انعطاف پذیری که استحکامی برابر یک ماده ی انعطاف ناپذیر دارد، برای شکسته شدن انرژی بیشتری لازم دارد و بنابراین چقرمه تر است.

در (شکل ۶ الف تا د) نمودار تنش-کرنش مواد گوناگون رسم شده است.



شکل ۶- الف) جامد انعطاف ناپذیر بی هیچ کرنش پلاستیکی مانند چدن، ب) جامد انعطاف پذیر با نقطه ی تسلیم مانند فولاد کم کرن، ج) جامد انعطاف پذیر بی نقطه ی تسلیم مانند آلومینیم، د) نمودار تنش-کرنش حقیقی در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نامی.

انجام آزمایش

در این آزمایش سیم‌های آهنی و مسی با آویزان کردن وزنه‌هایی به آن‌ها تنیده و افزایش طول (و کرنش) آن‌ها با یک عقربه اندازه‌گیری می‌شود. اگر پس از گذاشتن و برداشتن باری عقربه به صفر برگردد، سیم در گستره‌ی کشسانی خود قرار دارد. اما اگر با گذاشتن و برداشتن باری بزرگ‌تر، عقربه به صفر باز نگردد، از گستره‌ی کشسانی گذشته و به ناحیه‌ی موم‌سانی (پلاستیک) با تغییر طول همیشگی وارد شده‌ایم. بدین ترتیب سیم شروع به تسلیم شدن می‌کند و سرانجام با بارگذاری بیشتر، سیم بریده خواهد شد.

ابزارهای مورد نیاز:

نمونه‌های استاندارد فلزی گوناگون، دستگاه کشش هیدرولیکی، کولیس، ریزسنج

روش کار: قطر و طول اولیه‌ی نمونه را با ابزار مناسب اندازه‌گیری و یادداشت کنید. به کمک استاد نمونه را در جای آن در دستگاه کشش هیدرولیکی، شکل ۸-الف، ببندید و مهره‌های دو سر آن را سفت کنید. سپس کمی پمپ کنید تا فشارسنج کمی حرکت کند و نشانگر فلزی روی صفحه‌ی بالایی را به گونه‌ای تنظیم کنید که به صفحه برسد. با چرخاندن صفحه‌ی مدرج ریزسنج، شکل ۸-ب، عقربه‌ی آن را بر روی صفر قرار دهید.



ب

الف

شکل ۸: الف) پرس هیدرولیکی با نمونه‌ی کشش ب) ریزسنج ویژه‌ی دستگاه با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر.

اینک با افزایش گام به گام ۰/۵ باری فشار و برگشت به صفر، حد کش‌سانی نمونه را پیدا کنید. این بار با صفر کردن فشارسنج، ریزسنج دستگاه را نیز دوباره صفر کنید و هر بار نیروی وارد شده را با گام مناسب (۱ یا ۲ بار) افزایش دهید و مقدار تغییر طول را با ریزسنج دستگاه اندازه‌گیری و در جدول زیر یادداشت نمایید. منحنی تنش-کرنش را برای هر نمونه رسم کنید.

نکته: دستگاه پرس هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه مجهز به فشارسنجی است که فشار روغن درون سیلندر پرس را نشان می‌دهد و برای به‌دست آوردن نیروی وارد بر نمونه هر بار (bar) را هم‌ارز ۵۰۰ نیوتن ($0.5\text{kN} \approx 1\text{Bar}$) بگیرید. دقت کنید که این رابطه، ویژه‌ی دستگاه آزمایشگاه است و یکاهای فشار و نیرو یکی نیستند.

P (bar)	F (N)	ΔL (mm)

خواسته‌های آزمایش

- ۱- از روی نمودار تنش- کرنش ناحیه‌ی خطی (کش‌سانی)، حدکش‌سانی یا تنش تسلیم را برای هر نمونه تعیین کنید.
- ۲- تنش نهایی و نقطه‌ی شکست را تعیین کنید. استحکام کششی نمونه‌ها حساب کنید.
- ۳- ویژگی‌های کش‌سانی نمونه‌های آزمایش شده را با هم مقایسه و نتیجه را بیان کنید.
- ۴- با محاسبه‌ی سطح زیر منحنی تنش-کرنش انرژی لازم برای شکست ماده را حساب کنید.
- ۵- خطاهای آزمایش را نام برده و روش‌های کاهش خطا را بنویسید.

آزمایش شماره ۷ ویژگی‌های مکانیکی مواد؛ سختی‌سنجی

مقدمه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد، همانند ترکیب، رنگ، چگالی، گرمای ویژه، رسانندگی گرمایی، رسانندگی الکتریکی، ویژگی‌های مکانیکی و ویژگی‌های بسیار دیگرشان از ساختار درونی‌شان سرچشمه می‌گیرد. ساختار درونی مواد شامل گونه‌ی اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌های سازنده و چگونگی پیوند آن‌ها با یکدیگر و نیز ریزساختار^۴ آن‌هاست. یکی از این ویژگی‌ها، ویژگی‌های مکانیکی است که با آزمون‌های گوناگونی سنجیده می‌شود. بیشتر آزمون‌های مکانیکی، ویران‌گر^۵ (DT) اند و نمونه مورد آزمون را نابود می‌کنند یا دست کم از کاربری می‌اندازند. در برابر این آزمون‌ها، آزمون‌های ناویران‌گر^۶ (NDT) اند که در آن‌ها هیچ آسیبی به نمونه‌ی مورد آزمون نمی‌رسد.

مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی مواد: الف) سختی، ب) ویژگی‌های کششی یا فشاری (منحنی‌های تنش- کرنش)، پ) استحکام ضربه‌ای و ت) ویژگی‌های وابسته به زمان یا پویا (دینامیک)، مانند خستگی، خزش، ایستادگی در برابر اکسایش و ایستادگی در برابر خوردگی‌های دیگر است.

سختی

سختی سه گونه است:

۱- سختی خراشی (Scratch Hardness)

۲- سختی ایستایی یا استاتیکی (فرورندگی) (Indentation Hardness)

۳- سختی پویا یا دینامیکی (Dynamic Hardness)

سختی، ایستادگی (مقاومت) سطح در برابر فرورفتگی است. سختی‌سنجی یکی از آزمایش‌های مقایسه‌ای است و پیشرفت آن بیشتر به خاطر وجود روش‌های گوناگون و مناسب برای اندازه‌گیری مقاومت سطح مواد در برابر فرورفتگی است. اگرچه سختی‌سنجی جزو آزمایش‌های ناویران‌گر نیست با این وجود این برتری را دارد که تنها یک فرورفتگی کوچک بر روی سطح نمونه باقی می‌گذارد. بسته به نوع آزمون، سختی با عددی بیان می‌شود که با عمق اثری که نیرو ایجاد می‌کند، نسبت وارون دارد.

پارامتر فیزیکی‌ای که سختی را نمایندگی می‌کند، مدول حجمی (B) است. اگر فشار وارد بر جسمی به حجم V، به اندازه‌ی dp تغییر یابد، حجم مورد نظر به اندازه‌ی dV تغییر می‌کند و مدول حجمی با رابطه‌ی:

$$B = -V \frac{\partial P}{\partial V} \quad (1)$$

⁴ Microstructure

⁵ Districtive test (DT)

⁶ Nondistrictive test (NDT)

تعریف می شود و علامت منفی به خاطر آن است که با افزایش فشار، حجم کاهش می یابد. تراکم پذیری^۷ وارون مدول حجمی است و به صورت تغییر نسبی حجم به ازای یکای فشار تعریف می شود:

$$K = - (1/V) \partial V / \partial P \quad (1)$$

هر چه مدول حجمی جسمی بزرگ تر باشد، آن جسم سخت تر است. اگرچه چنین رابطه‌ی مستقیمی میان مدول حجمی و سختی وجود دارد، اما برای سختی یک پارامتر یکتای فیزیکی وجود ندارد و مهندسان بسته به روش سختی سنجی، عددهای گوناگونی برای سختی یک جسم به دست می دهند. با این وجود، در هر روش سختی-سنجی، عددها به طور مقایسه‌ای (نسبی) برای مواد گوناگون درست اند و جدول‌هایی برای تبدیل سختی‌ها در مقیاس‌های گوناگون وجود دارد، جدول زیر.

استحکام کششی N/mm ²	سختی نوب KHH	سختی شر ShH	سختی ویکرز VH (F = 98N)	سختی راکول						سختی برینل $\frac{F}{D^2} = 30$	
				R45N	R30N	R15N	R _F	R _D	R _C		R _B
1155	367	49	360	39/1	56/4	78/0		52/8	36/6	68/7	342
1190	378	50	370	40/4	57/4	79/2		53/6	37/7	69/2	352
1220	389	51	380	41/7	58/4	79/8		54/4	38/8	69/8	361
1255	400	52	390	42/0	59/3	80/3		55/3	39/8	70/3	371
1290	412	53	400	44/1	60/2	80/8		56/0	40/8	70/8	380
1320	423	54	410	45/3	61/1	81/4		56/8	41/8	71/4	390
1350	435	55	420	46/4	61/9	81/8		57/5	42/7	71/8	399
1385	447	56	430	47/4	62/7	82/3		58/2	43/6	72/3	409
1420	459	57	440	48/4	63/5	82/8		58/8	44/5	72/8	418
1455	471	58	450	49/4	63/3	83/2		59/4	45/3	73/3	428
1485	482	59	460	50/4	64/9	83/6		60/1	46/1	73/6	437
1520	494	60	470	51/3	65/7	83/9		60/7	46/9	74/1	447
1555	505	61	480	52/2	66/4	84/3		61/3	47/7	74/5	(456)
1595	517	62	490	53/1	67/1	84/7		61/6	48/4	74/9	(466)
1630	528	63	500	53/9	67/7	85/0		62/2	49/1	75/3	(475)
1665	539	64	510	54/7	68/3	85/4		62/9	49/8	75/7	(485)
1700	550	65	520	55/6	69/0	85/7		63/5	50/5	76/1	(494)
1740	561	66	530	56/2	69/5	86/0		63/9	51/1	76/4	(504)
1775	572	67	540	57/0	70/0	86/3		64/4	51/7	76/7	(514)
1810	583	68	550	57/8	70/5	86/6		64/8	52/3	77/0	(523)
1845	594	69	560	58/6	71/2	86/9		65/4	53/0	77/4	(532)
1880	604	70	570	59/3	71/7	87/2		65/8	53/6	77/8	(542)
1920	615	71	580	59/9	72/1	87/5		66/2	54/1	78/0	(551)
1955	625	72	590	60/5	72/7	87/8		66/7	54/7	78/4	(561)
1995	632	73	600	61/2	73/2	88/0		67/0	55/2	78/6	(570)

روش‌های سختی سنجی

سختی، ایستادگی (مقاومت) جامدها در برابر فرورفتن چیزهای نوک تیز به سطح آنهاست. ساده‌ترین نوع سختی سنجی، خراشیدن سطح جامد با جامدی دیگر (مانند سوهان) است. مقدار خراش‌های ایجاد شده از دیدگاه چندی و چونی (کمی و کیفی) نشان‌دهنده‌ی سختی نسبی دو جسم (خراشنده و خراشیده) است. میزان ساییدگی جسم، معیاری از **سختی سایشی** و ایستادگی آن در برابر سایش است. مواد و پوشش‌های **ضدخس** یا **ضدسایش** باید از سختی سایشی بالایی برخوردار باشند. آزمون‌های سختی، بر پایه‌ی فرورفتن یک جسم نفوذکننده و/یا فرورونده به درون جامد و یادداشت نیروی لازم برای این کار و/یا اندازه‌گیری مقدار فرورفتگی به ازای یک نیروی معین، استوار است. چنین آزمایشی، **سختی فرورندگی** آن جامد را تعیین می کند. گونه‌ی

⁷ Compressibility

دیگر سختی، **سختی واجهشی** است. چنانچه جرم معینی از بلندی معینی بر روی سطح جامدی (که کشسانی بالایی دارد) انداخته شود، مقدار واجهش آن جرم، معیاری از سختی واجهشی آن جامد است.

پایه‌ی سختی‌سنجی‌ها بر اندازه‌گیری میزان ایستادگی جسم در برابر فرورفتگی است که پایه‌ی روش‌ها و کار دستگاه‌های گوناگون اندازه‌گیری سختی است. ابزار فرورونده، در جسم، در آزمون سختی‌سنجی ممکن است به صورت ساچمه (گرد)، مخروط ناقص، هرم یا سطح تخت باشد که معمولاً از فولادسخت‌شده، کاربیدتنگستن یا الماس ساخته شده و با یک نیروی ایستای (استاتیک) معین روی سطح نمونه‌ی مورد آزمون فشرده می‌شود. سختی فروروندگی را می‌توان به دو راه اندازه گرفت. در یک راه، نیرویی (باری) اندازه‌گیری می‌شود که با کاربست آن، نوک یک فرورفتگی با عمق معین ایجاد نماید. در راه دیگر، گودی ایجاد شده به ازای یک نیروی (بار) مشخص، اندازه‌گیری می‌شود.

در آزمایش واجهش، یک بار افتان یا ضربه‌ای بر روی سطح جامد مورد آزمایش فرود می‌آید. اندازه‌ی واجهش به دست آمده، سختی واجهشی قطعه مورد آزمایش را که یک سختی پویایی است، نشان می‌دهد.

هر چند می‌توان گفت که امروزه بیش‌ترین آزمایش‌های سختی‌سنجی بر روی فلزها، آزمون‌های برینل و راکول است، اما با توجه به افزایش شمار فولادهای سخت و سخت‌تر شدن سطوح آنها، آزمون‌های سختی‌سنجی دیگری همانند سختی‌سنجی شور، ویکرز، مونوترون (آزمایش با گلوله الماس)، راکول سوپرفیشال (سختی سطحی راکول) و سختی‌سنجی هربرت نیز به کار گرفته شده‌اند. هم‌چنین نیاز به تعیین سختی نمونه‌های فلزی بسیار نازک یا نمونه‌های بسیار ریز و نیز تعیین شیب (گرادیان) سختی (افت یا خیز نسبی سختی) در فاصله‌های بسیار کم لایه‌های نازک، به نوآوری در دستگاه‌های ریزسختی⁸ سنج مانند "سختی‌سنج نوپ"⁹ شده است. امروزه روش‌های گوناگون سختی‌سنجی برای اندازه‌گیری میزان سختی فلزها، به ویژه پس از سخت کاری یا تاب کاری، به کار می‌رود. پایه‌ی کار دستگاه‌های سختی‌سنجی شامل ایجاد نقطه اثر روی سطح فلز و بررسی آن است، جدول زیر. مهم‌ترین روش‌های مرسوم سختی‌سنجی که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود روش برینل، روش ویکرز و روش راکول است. در این آزمایش سختی چند جسم به روش **برینل** می‌سنجید که به دنبال آن را به گستردگی بررسی می‌کنیم. اما نخست سختی‌سنجی به روش‌های ویکرز و راکول را مرور می‌کنیم.

⁸ Microhardness

⁹ Knoop hardness

روش آزمایش	نوع فروشونده Indenter	شکل فروشونده‌ها		با محوری	را بطنه برای تعیین سختی
		نمای جنبی	نمای بالایی		
برینل	ساقمه ۱۰mm از فولادیا کاربیدتنگستن			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
ویکرز	هرم الماسی			P	$VHN = 1.72 P/d_1^2$
نوب هرم الماسی راکول	هرم الماسی			P	$KHN = 14.2 P/l^2$
A C D	مخروط الماسی ساقمه فولادی			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ 100 - 500t
B F G	به قطر 1/16"			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ 130 - 500t
E	به قطر 1/8"			100 kg	$R_E =$

روش ویکرز

سختی با تقسیم بار کاربستی به مساحت سطح فرورفتگی با روش‌های گوناگونی (همانند آنچه در روش برینل خواهید دید) سنجیده می‌شود که یکی از آن‌ها سختی‌سنجی به روش **ویکرز** است. در این آزمایش یک دندان الماسه‌ی کوچک، به شکل هرم با کف مربعی به کار می‌رود که زاویه نوک آن ۱۳۶ درجه است. بار کاربستی می‌تواند از ۵ تا ۱۲۰ کیلوگرم با بازه‌های ۵ کیلوگرمی تغییر نماید. برای انجام آزمایش، نمونه روی سندان قرار می‌گیرد و با یک پیچ، سندان به سمت بالا حرکت داده می‌شود تا قطعه دقیقاً مماس بر نوک دندان قرار گیرد. سپس با آزاد کردن اهرم، یک بازوی سنگین که نسبت آن ۲۰ به یک است، رها شده و وزن بازو به آرامی بر روی نمونه فرود می‌آید و سپس بازو به جای نخست باز می‌گردد. بازآماده‌سازی دستگاه با فشردن یک پدال پای انجام می‌شود. پس از آن که سندان به پایین آورده شده یک میکروسکوپ بر روی قطعه قرار گرفته و قطر مربع فرورفتگی با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و میانگین دو قطر محاسبه می‌شود. در این روش می‌توان ساقمه‌هایی به قطر ۱ یا ۲ میلی‌متر، به جای دندانه‌ی الماسه، نیز به کار برد. دستگاه ویکرز بیشتر در کارهای پژوهشی به کار می‌رود و یکی از برتری‌های مهم آن، دقت بالای اندازه‌گیری ابعاد فرورفتگی است. زیرا اندازه‌گیری قطر یک مربع، بسیار ساده‌تر و دقیق‌تر از اندازه‌گیری قطر یک دایره است. روش ویکرز، نسبتاً سریع بوده و با آن می‌توان سختی نمونه‌های نازک با ضخامتی تا ۰/۰۰۶ اینچ را اندازه گرفت. گفته شده است که تا بازه‌ی ۱۳۰۰ درجه سختی (تقریباً هم‌ارز ۱۵۰ درجه سختی برینل) نتایج این روش از دقت بسیار خوبی برخوردار است. به نظر می‌رسد که امکان تخت شدن دندان دستگاه ویکرز کمتر از گوی برینل باشد. از کاستی‌های آزمایش ویکرز، وقت‌گیری به دلیل نیاز به پرداخت سطح نمونه پیش از آزمایش، ویران‌گر بودن و سرعت نه‌چندان آن است که از آزمایش‌های برینل و راکول کمتر است. اگرچه آزمایش ویکرز بسیار دقیق‌تر از

آزمایش‌های راکول و برینل است، اما قیمت دستگاه آن نیز بسیار گران‌تر است. صنایع نتایج آزمایش ویکرز را به گستردگی پذیرفته‌اند. عدد سختی دستگاه ویکرز با دندان الماس هرمی شکل، که به صورت خلاصه، HV نوشته می‌شود، از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1.8544F}{d^2}$$

که در آن HV سختی ویکرز با دندان الماسه هرمی شکل برحسب کیلوگرم بر میلی‌متر مربع، F نیروی (بار) وارده بر حسب کیلوگرم و d قطر مربع فرو رفتگی بر حسب میلی‌متر است.

روش راکول

راکول برای سختی‌سنجی فلزهای نسبتاً سخت به کار می‌رود که بر سه گونه است. در این روش سختی‌سنجی، نخست نیروی ۱۰ کیلوگرمی که به آن پیش‌نیرو می‌گویند و سپس در راکول‌های A، B و C به ترتیب نیروی‌هایی به کار گرفته می‌شود که نیروی (بار) کل ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم شود. نوک فرورونده در راکول هم به صورت ساچمه‌ای و هم به صورت سوزنی است. پایه‌ی کار بیشتر این دستگاه‌ها ایجاد نقطه اثری روی سطح فلز است. راکول ساچمه‌ای به کمک یک ساچمه کار می‌کند به گونه‌ای که بار کاربستی بر روی فلز با این ساچمه منتقل می‌شود که اندازه‌های گوناگون دارد. اما راکول سوزنی به کمک یک سوزن، این نیرو را روی فلز وارد می‌کند که نقطه اثر آن به صورت یک مخروط ۱۲۰ درجه است. نقطه اثر راکول‌های A و C هر دو به صورت یک مخروط ۱۲۰ درجه است. راکول B، ساچمه ندارد و سوزن هرمی شکل با زاویه‌ی ۱۳۰ درجه دارد که نقطه اثر آن یک چهار گوش است. آزمایش سختی راکول همانند آزمایش برینل است که در آن عدد سختی، نسبتی از بزرگی حفره‌ای است که با یک دندان (عمق نفوذ) و با وارد آوردن یک بار ثابت معین بر روی نمونه به وجود می‌آید. آزمایش راکول با آزمایش برینل متفاوت است، زیرا در آزمایش راکول سه گونه بار و دندان را می‌توان انتخاب نمود. تفاوت آزمایش راکول با آزمایش برینل در کوچک‌تر بودن بار وارد شده و شکل دندان ایجاد کننده فرورفتگی است که فرورفتگی ایجاد شده کوچک‌تر و کم عمق‌تر خواهد بود. پس کاربرد آن گسترده‌تر از آزمایش برینل و انجام آن سریع‌تر است، زیرا می‌توان عدد سختی را مستقیم خواند. دندان‌های فرو رونده یا نفوذ کننده ممکن است یک ساچمه فولادی سخت شده و/یا یک مخروط الماسه با زاویه ۱۲۰ درجه که نوک مخروط آن گرد شده و بریل^{۱۰} نامیده می‌شود، باشد. عدد سختی که روی نشانگر مدرج می‌توان خواند، یک عدد دلخواه قراردادی است که با وارون عمق حفره ایجاد شده، متناسب است. مقیاس به کار رفته برای آزمایش، نشان دهنده‌ی بار وارده و گونه‌ی دندان کاربستی است. برخی از دستگاه‌های آزمایش راکول، ویژه‌ی تعیین سختی سطحی ساخته شده‌اند. این آزمایش برای تعیین سختی سطح قطعاتی طراحی شده است که در آن تنها یک فرورفتگی سطحی و کم عمق، مورد نظر است. دستگاه‌های آزمایش سختی‌سنجی

¹⁰ Brale

سطحی از لحاظ اصول کارکرد، همانند دستگاه‌های معمولی راکول‌اند، اگرچه این دستگاه‌ها، نیروهای کوچک-تری را به کار می‌برند و سامانه‌های دقیق‌تری برای اندازه‌گیری عمق فرورفتگی دارند. در دستگاه‌های آزمایش سختی سنجی سطحی راکول پیش‌بار ۳ کیلوگرم و بارهای اصلی به مقدار ۱۵، ۳۰ یا ۴۵ کیلوگرم را به کار می‌رود. آزمایش راکول، همانند آزمایش برینل برتری‌ها، کاستی‌ها و محدودیت‌هایی دارد. آزمایش راکول یک آزمایش دقیق و حساس است و می‌توان آن را سریع انجام داد و نتیجه را مستقیم از روی دستگاه خواند، بی‌آن‌که به محاسبه نیاز داشته باشد. نتایج این آزمایش، همانند آزمایش برینل در سطح جهانی معتبر و پذیرفتنی است که هر کس می‌تواند آن را انجام داده و نتایج یکسانی برای یک نمونه به دست آورد، به گونه‌ای که بستگی به مهارت کاربر ندارد. سختی سنجی راکول را می‌توان بر روی بسیاری از مواد انجام داد و سختی آن‌ها را به دست آورد. کاستی آزمایش راکول همانند آزمایش برینل است. دستگاه آزمایش نسبتاً گران‌قیمت، سنگین، برای کاربرد در بیرون از آزمایشگاه نامناسب و آزمایشش ویران‌گر است.

روش برینل

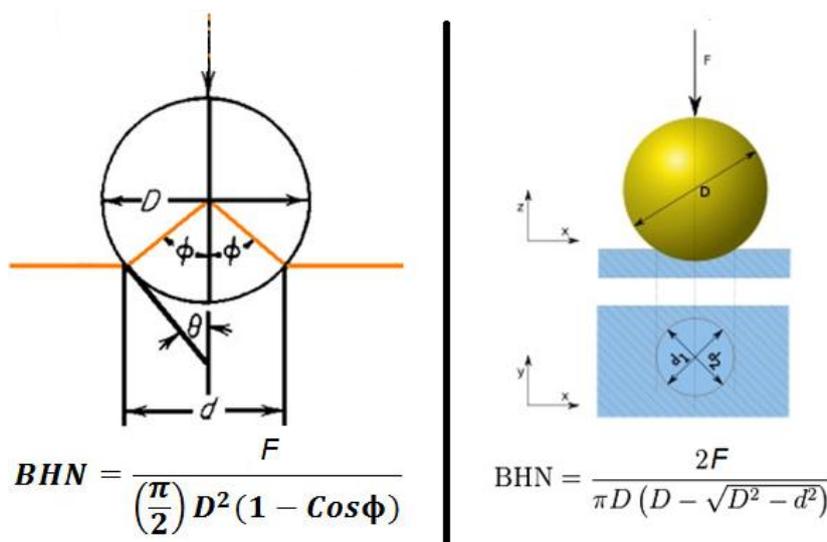
سختی سنجی برینل یکی از کهن‌ترین آزمایش‌ها و اولین آزمون استاندارد پذیرفته شده است که برینل آن را در سال ۱۹۰۰ ارائه کرد. این آزمایش، یک آزمون سختی سنجی ایستاست که با فشردن یک ساچمه فولادی سخت روی سطح نمونه انجام می‌شود. در این آزمون معمولاً یک ساچمه به قطر ۱۰ (یا ۵ یا ۲/۵) میلی‌متری از جنس فولادسخت شده یا کاربیدتنگستن، با کاربست یک نیروی معین روی سطح جامد فشرده می‌شود که برای فلزهای سخت، مقدار بار ۳۰۰۰ کیلوگرم، برای فلزهای نیمه سخت ۱۵۰۰ کیلوگرم و برای فلزهای نرم ۵۰۰ کیلوگرم یا کمتر است. روش برینل برای سختی سنجی فولادهای نرم و فلزهای رنگین (مانند مس، برنج و آلومینیوم) به کار می‌رود. در این روش سختی سنجی باید به مقدار نیروی کاربستی در گزارش‌ها توجه کرد. زیرا تغییر نیرو باعث تغییر سختی خوانده شده می‌شود. در روش برینل، دقت کاربر در خواندن قطر اثر و سرانجام در سختی اندازه‌گیری شده اثرگذار و مهم است.

تفاوت دستگاه‌های گوناگون سختی سنج برینل به شرح زیر است:

- ۱- روش وارد آوردن بار، برای نمونه کاربست نیرو با فشار روغن، چرخ دنده و پیچ یا با اهرم و وزنه،
 - ۲- روش اجرای آزمایش، برای نمونه کاربست نیرو با دست یا ماشین،
 - ۳- روش اندازه‌گیری بار وارده، برای نمونه کاربرد پیستون و وزنه، فشارسنج بوردون، نیروسنج یا اهرم و وزنه و
 - ۴- اندازه دستگاه، برای نمونه دستگاه بزرگ (ثابت) یا دستگاه کوچک (جابه‌جاشدنی)^{۱۱}.
- آزمایش برینل را می‌توان با دستگاه‌های آزمون همگانی (یونیورسال) با افزودن یک مبدل مناسب که ساچمه را نگه‌دارد، انجام داد. آزمایش بر روی برگه‌های فلزی را می‌توان با ابزارهای دستی مانند انبردست و ساچمه و گیره فنی با نیروی ۲۲ پوند ($\approx 10 \text{ kgf}$) انجام داد. برای انجام آزمایش برینل، قطعه نمونه را بر روی سندان قرار

¹¹ Portable

داده و سندان را بالا می برند به گونه ای که با ساچمه تماس شود. پمپ نمودن روغن به سیلندر اصلی، سبب کاربست یک نیروی رو به پایین به پیستون اصلی دستگاه و در نتیجه فشار بر روی ساچمه می شود. این فشار باعث فرو رفتن ساچمه بر روی سطح قطعه مورد آزمایش می گردد. پیستون کاملاً روان، کار می کند، پس تلفات اصطکاک چشم پوشیدنی است. با یک فشار سنج مناسب، مقدار تقریبی بار وارده اندازه گیری می شود. هنگامی که بار وارده، به مقدار مورد نظر برسد، وزنه تعادل بالای دستگاه با یک پیستون کوچک، به بالا کشیده می شود. این کار برای اطمینان از آن است که بار بیشتری بر روی ساچمه وارد نشود. در آزمایش های استاندارد، قطر فرورفتگی ایجاد شده با یک میکروسکوپ میکرومتردار یا یک میکروسکوپ برینل که یک صفحه شفاف مدرج (رتیکول) در میدان دید آن است، اندازه گیری می شود. اگرچه آزمایش برینل روش خوبی برای سختی سنجی است، اما محدودیت هایی دارد. یکی از این محدودیت ها، مناسب نبودن آن برای مواد بسیار سخت است. در این موارد، ساچمه تغییر شکل می دهد. همچنین این روش برای نمونه های بسیار نازک که احتمالاً عمق حفره ایجاد شده بیشتر از ضخامت قطعه باشد، مناسب نیست. یکی دیگر از محدودیت ها، مناسب نبودن آن برای قطعاتی است که سخت کاری سطحی شده باشند. در این موارد ممکن است عمق حفره ایجاد شده از ضخامت لایه سخت شده بیشتر باشد، و در نتیجه نرمی مغز قطعه، نتیجه آزمون را کم اعتبار کند. در آزمایش های استاندارد، بار کامل ۳۰ ثانیه بر روی فلزهای آهنی و ۶۰ ثانیه بر روی فلزها نرم تر وارد می شود. عدد سختی برینل، مقدار نامی نیرو بر یکای سطح حفره ایجاد شده است. اگرچه یکای این سختی، همانند فشار پاسکال و برای بیشتر فلزها از مرتبه ی گیگاپاسکال است، اما در کاربردهای مهندسی معمولاً برحسب کیلوگرم بر میلی متر مربع گفته می شود که با $(1\text{kg(f)}/\text{mm}^2=100\text{kPa}=0.1\text{GPa})$ هم ارز است. این عدد با تقسیم نیروی (بار) کاربستی بر سطح فرورفتگی ایجاد شده که بخشی از یک کره در نظر گرفته می شود، محاسبه می شود. مقدار بار وارده و قطر گودی ایجاد شده در فرمول زیر قرار داده می شود:



$$BHN = \frac{F}{\left(\frac{\pi}{2}\right) D^2 (1 - \cos\phi)}$$

$$BHN = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

شکل ۱: رابطه ی میان پارامترهای گوناگون با سختی برینل

که در این فرمول BHN درجه‌ی سختی برینل (بر حسب کیلوگرم بر میلی‌مترمربع)، F نیروی (بار) کاربستی (کیلوگرم)، D قطر ساچمه (میلی‌متر) و d قطر فرورفتگی ایجاد شده (میانگین d_1 و d_2 در شکل) بر حسب میلی‌متر است. ضخامت نمونه برای آزمایش نبایستی کمتر از ده برابر عمق فرورفتگی ایجاد شده باشد و چنانچه نمونه نازک‌تر باشد، سختی به دست آمده، به‌راستی سختی نمونه نیست و از سختی سندان زیر قطعه مورد آزمایش نیز تاثیر پذیرفته است. محدودیت دیگر آزمایش برینل ویران‌گر بودن آن است. زیرا بر روی نمونه آزمایش، فرورفتگی‌ای بر جا می‌ماند که در بیشتر موارد نمونه را از کاربرد می‌اندازد. از سوی دیگر بیشتر دستگاه‌های آزمایش برینل سنگین (بیشتر از ۱۰۰ کیلوگرم) هستند که جابه‌جایی آن‌ها را مشکل می‌کند. هم‌چنین دستگاه‌های برینل نسبت به دستگاه‌های دیگر گران‌تراند و این آزمایش یک آزمایش نظری است که عواملی مانند مهارت، تجربه و استعداد کاربر در اندازه‌گیری ابعاد فرورفتگی ایجاد شده، ممکن است در نتایج آزمایش اثر داشته باشد. اگرچه این اثرها ناچیزاند، ولی میانگین نتایج گزارشی دو کاربر برای یک نمونه و در یک آزمایش، ممکن است تا ۱۰ درصد افت و خیز داشته باشد. هم‌چنین لزوم محاسبه‌ی عدد برینل (BHN)، به‌جای خواندن مستقیم آن، یک محدودیت و کاستی دیگر است. سختی‌سنجی برینل برتری‌هایی هم دارد. نخست آن‌که با توجه به قدمت زیادش، کاملاً جاافتاده است و بیشتر کاربران با آن آشنایی دارند. عموماً نتایج آزمایش‌ها برینل، در صنایع پذیرفته شده است. این آزمایش را می‌توان زود و معمولاً در کمتر از دو دقیقه انجام داد. با چشم‌پوشی از سرمایه‌گذاری اولیه دستگاه، انجام آزمایش معمولاً ارزان تمام می‌شود.

وسایل مورد نیاز برای این آزمایش:

۱- دستگاه سختی‌سنج (Hydraulic press-Brinell Hardness Test)،

۲- دو نوک فرورنده‌ی ساچمه‌ای به قطرهای $2/5$ میلی‌متر و 5 میلی‌متری،

۳- (اندازه‌گیری طول نهایی) میکروسکوپ چشمی مدرج که تا دهم میلی‌متر درجه‌بندی شده است،

۴- چند نمونه‌ی گوناگون برای سختی‌سنجی

شرایط نمونه آزمایش

پیش از آغاز آزمون می‌بایست نمونه شرایط زیر را داشته باشد تا سختی‌سنجی با دقت زیاد انجام شود:

۱- دو سطح نمونه باید کاملاً تخت و موازی باشند،

۲- سطحی که باید سختی‌سنجی شود باید با سمبادهای نرم صیقلی شود،

۳- ضخامت نمونه‌ی مورد آزمایش نباید کم‌تر از 5 میلی‌متر باشد.

توجه: دقت کنید که نقاطی که برای سختی‌سنجی بر می‌گزینید، زیاد به لبه بیرونی نمونه نزدیک نباشد، و گرنه امکان تغییر شکل آن نقاط وجود دارد، با توجه به آن‌که نوک‌های فرورونده‌ی این آزمایش فولاد سخت شده-اند، سختی نمونه‌ها نباید بزرگ‌تر باشد. زیرا ممکن است که نوک‌ها تغییر شکل دهند. برای سنجش سختی چنین نمونه‌هایی باید نوکی از جنس کاربید تنگستن (WC) به کار برد.



شکل ۲: چشمی، نوک‌های فرورونده ۲/۵۰ و ۵/۰۰ میلی‌متری و پیچ نگهدارنده‌ی آن‌ها.

بر پایه‌ی تعریف برینل، سختی از تقسیم نیروی وارد بر نوک (کره) بر سطح عرق چینی از کره‌ی فرورونده که در نمونه فرو می‌رود به دست می‌آید:

$$HB = 2F / (\pi D) (D - (D^2 - d^2)^{1/2}) \text{ (GPa)} \quad (2)$$

در این رابطه اگر D قطر ساچمه و d قطر فرورفتگی هر دو بر حسب میلی‌متر، HB درجه‌ی سختی برینل (کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع یا مگاپاسکال) است.

شرح دستگاه آزمایش (شکل ۳):

دستگاه آزمایش سختی سنجی، شامل جک هیدرولیک دستی و پمپ آن، فشارسنج، میزچه‌ی نمونه و نوک‌های فرورونده.



شکل ۳: عکس دستگاه پرس هیدرولیک

چگونگی انجام آزمایش

نخست نوک فرورونده‌ی استاندارد به قطر ۲/۵۰ یا ۵/۰۰ میلی‌متری را بر روی جای ویژه‌اش ببندید و نمونه‌ی صیقل داده شده را بر روی میزچه‌ی نمونه‌ی دستگاه قرار دهید. شیر پمپ را ببندید تا روغن به جک برود. با

پمپ کردن روغن فشار روغن جک را به ۱bar برسانید تا نیرویی برابر با ۰/۵kN روی نمونه وارد شود و نیرو را چند ثانیه روی نمونه وارد کنید. پس از چند ثانیه پیچ تخلیه سیلندر اصلی جک را باز کرده تا فشار صفر شود و قطر فرورفتگی را به کمک ذره بین اندازه گیری کنید (نقطه ی شماره ی ۱). نمونه را بچرخانید تا جای سالم دیگری زیر نوک فرورونده قرار گیرد. اینک دوباره مانند بالا فشار را به ۲bar برسانید تا نیروی ۱kN بر نوک وارد شود (نقطه ی شماره ی ۲). این کار را دست کم با گام های یک باری یا ۰/۵ کیلو نیوتنی برای شش نقطه انجام دهید. برای کاهش خطا، آزمایش را برای هر نیرو ۳ بار انجام دهید. قطر هر فرورفتگی (d) را در دو راستای عمود بر هم اندازه بگیرید و میانگین شش قطر را در فرمول سختی سنجی برینل قرار دهید.

نمونه ی شماره ۱

فشار (bar)	نیرو F(kN)	قطر فرورفتگی d	میانگین قطر فرورفتگی با خطا	سختی برینل BHN با خطا
۱				
۲				

نکته ها:

- دستگاه کشش هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه مجهز به فشارسنجی است که فشار روغن درون پرس را نشان می دهد و برای به دست آوردن نیروی وارد بر نمونه رابطه ی تبدیل $1 \text{ Bar} \equiv 0.5 \text{ kN}$ را به کار بگیرید. دقت کنید که این یک رابطه ی همگانی نیست و تنها به این پرس مربوط می شود.
- سطح مورد آزمایش باید صاف، تمیز و خشک باشد. (به طور کلی هر چه سطح صاف تر، تمیز تر و خشک تر باشد، دقت بیشتر است).
- به دلیل اندازه گیری چشمی قطر اثر، احتمال بروز خطا وجود دارد. این خطا را در محاسبات به گونه ی مناسبی بیاورید. در دستگاه های خود کار سختی سنجی این قطر به روش نوری اندازه گیری می شود.
- به دلیل تغییر فرم احتمالی فرورونده (به ویژه در روش برینل)، احتمال بروز خطا وجود دارد.
- سختی برینل دقیق تر تنها اگر قطر فرورفتگی (d) در بازه ی ۲۵ تا ۵۰ درصد قطر گوی (0.25D تا 0.5D) باشد به دست می آید پس روش برینل برای مواد با سختی بالا مناسب نیست. با نزدیک شدن سختی نمونه به سختی گوی فرورونده، احتمال تغییر شکل فرورونده می رود.

آزمایش شماره ۸

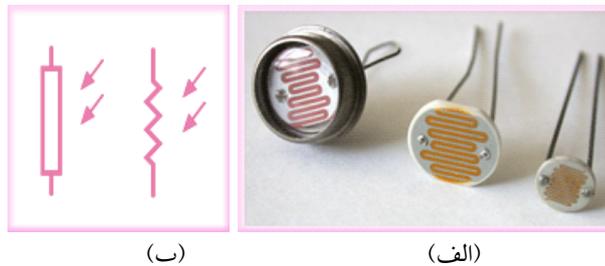
فیزیک نیم رساناها: بررسی وابستگی منحنی جریان-ولتاژ (V-I) فوتومقاومت به طول موج

در این آزمایش به بررسی تاثیر طول موج نور فرودی بر فوتوجریان می پردازیم.

نظریه ی آزمایش:

مقاومت ها را می توان از دیدگاه های گوناگون دسته بندی کرد. از یک دیدگاه مقاومت ها به دو دسته ی: ۱- مقاومت های ثابت (کربنی، لایه ای و سیمی) و ۲- مقاومت های کوک شدنی (Tunable) دسته بندی می شوند. دسته ی نخست مقاومت ثابتی دارند، اما مقاومت دسته ی دوم را می توان از بیرون با سازه ای کوک کرد. مقاومت های کوک شدنی عبارت اند از: الف) وابسته به دما^{۱۲} ب) وابسته به نور^{۱۳} ج) وابسته به ولتاژ^{۱۴} و د) وابسته به میدان مغناطیسی^{۱۵}.

در این آزمایش با یکی از این مقاومت های کوک شدنی یعنی LDR ها آشنا می شویم. در LDR ها، مقاومت به طول موج (یا هم ارز آن با بسامد یا انرژی) و شدت نور فرودی بستگی دارد. این مقاومت ها در تاریکی مقاومت بسیار بزرگی (از مرتبه ی مگا اهم) و در روشنایی مقاومتی کم (از مرتبه ی کیلو اهم یا اهم) دارند. به این مقاومت ها، فوتومقاومت یا LDR می گویند. برای آن که نور به فوتومقاومت برسد، لازم است سطح آن را با شیشه یا یک ماده ی شفاف دیگر بپوشانیم. این مقاومت ها در مدارهای الکترونیکی به عنوان آشکارساز نور و نیز برای نورسنجی به کار می روند. در شکل ۱ عکسی از چند نمونه ی گوناگون LDR و علامت این قطعه در مدارهای الکترونیکی آمده است.



شکل ۱- الف) علامت مداری LDR و ب) عکس هایی از چند LDR.

از جمله کاربردهای این مقاومت ها می توان به کاربرد آن در دوربین های عکاسی، کلیدهای نوری و چشم های الکترونیکی اشاره کرد. از پرکاربردترین کاربردهای LDR مدارهای فوتوسل است که با آن سامانه های روشنایی گذرگاه ها خودکار، روشن و خاموش می شود. شکل ۲ عکسی از چنین سامانه ای را نشان می دهد. این مدار در آزمایشگاه وجود دارد و می توانید به خوبی کارکردش را ببینید.

¹² Temperature Dependent Resistor, TDR

¹³ Light Dependent Resistor, LDR

¹⁴ Voltage Dependent Resistor, VDR

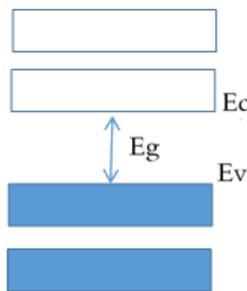
¹⁵ Magnetic Dependent Resistor, MDR



شکل ۲- یک مدار فوتوسل

فیزیک فوتومقاومت‌ها:

همان‌گونه که می‌دانیم در دمای صفر مطلق (یا کلونین) همه‌ی نوارهای انرژی نیم‌رساناها و نارساناها (عایق‌ها) یا همگی خالی یا همگی کاملاً پر شده‌اند و یک گاف انرژی بالاترین نوار پر را از نوارهای خالی جدا می‌کند، شکل ۳.



شکل ۳: چگونگی پر شدن نوارهای انرژی در یک نارسانا (عایق). E_g گاف انرژی نامیده می‌شود.

فاصله انرژی بالاترین نوار پر E_v و پایین‌ترین نوار خالی E_c "گاف انرژی" نامیده و با E_g نمایش داده می‌شود. در نارساناها این گاف انرژی بزرگ ($E_g > 5eV$) است. منظور از بزرگی E_g آن است که $kT \ll E_g$ ، به گونه‌ای که احتمال گذار الکترون از نوار پر به نوار خالی بعدی بر اثر انرژی گرمایی ناچیز باشد. بدین ترتیب اگر نارسانا‌یی در یک میدان الکتریکی نه چندان بزرگ قرار گیرد، الکترون‌ها نمی‌توانند به آن پاسخ دهند و جریان الکتریکی برقرار نخواهد شد. چگونگی پر شدن نوارهای انرژی یک نیم‌رسانا در صفر مطلق همانند یک نارسانا است، اما گاف انرژی کوچک است، بدین ترتیب در دمای اتاق شماری از الکترون‌های نوار ظرفیت انرژی گرمایی کافی دارند که برانگیخته شده و به نوار تقریباً خالی رسانش بروند و به همان اندازه جای خالی (یا حفره) در نوار ظرفیت (که تقریباً پر است) به جا بگذارند. از دید فیزیک کلاسیک اگر الکترون‌های رسانش در یک فلز را مانند اتم‌های یک گاز در جعبه‌ای در نظر بگیریم، نشان داده می‌شود که مقاومت ویژه‌ی آن از رابطه‌ی:

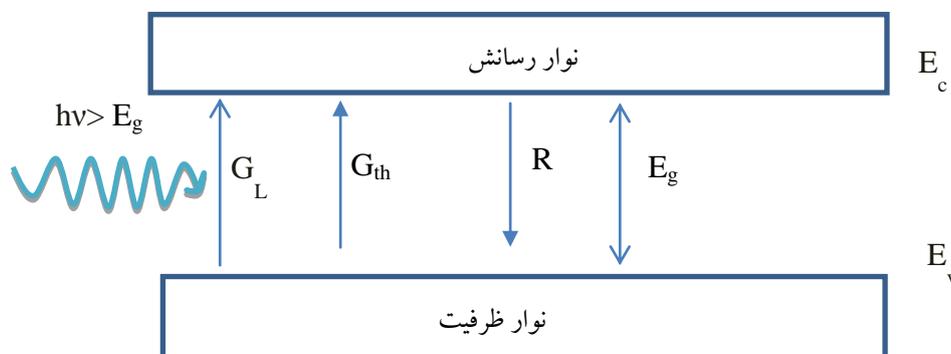
$$\rho = m/ne^2\tau \quad (1)$$

به دست می‌آید که در آن m و e به ترتیب جرم و بار الکترون، n چگالی الکترون‌های رسانشی و τ زمان میانگین میان برخوردهای پی‌درپی یک الکترون است. ضریب دمایی مقاومت ویژه α ، برابر با تغییر نسبی مقاومت ویژه ρ ، به ازای یکای تغییر دما است:

$$\alpha = (1/\rho) (d\rho/dT) \quad (2)$$

مقاومت ویژه فلزها با بالا رفتن دما افزایش می‌یابد ($dp/dT > 0$) زیرا با افزایش دما، شمار آهنگ برخوردی افزایش می‌یابد. پس با افزایش دما τ ، کاهش می‌یابد. در فلزها چگالی حامل‌های بار تقریباً مستقل از دما است. مقاومت ویژه نیم‌رساناها با افزایش دما کم می‌شود ($dp/dT < 0$). زیرا اگرچه در نیم‌رساناها هم با افزایش دما آهنگ برخوردها افزایش می‌یابد و τ کاهش می‌یابد، اما چگالی حامل‌های بار، n و p ، با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد.

نیم‌رساناها به دو دسته‌ی ذاتی و نا ذاتی دسته‌بندی می‌شوند. در نیم‌رساناهای ذاتی، چگالی الکترون (n) دقیقاً با چگالی حفره (p) برابر است، در نتیجه $n=p=n_i$ که چگالی حامل‌های ذاتی حامل‌ها است. پس می‌توان گفت $np=n_i^2$ ، که به آن قانون اثر جرم می‌گویند و برای هر دو گونه نیم‌رساناهای ذاتی و نا ذاتی در ترازمندی گرمایی درست است. در نیم‌رساناهای نا ذاتی، افزایش یک گونه از حامل‌ها، به کاهش گونه‌ی دیگر، از راه باز ترکیب، می‌انجامد. اما حاصل ضرب چگالی هر دو گونه حامل در یک دما، ثابت باقی می‌ماند. در ترازمندی گرمایی، حامل‌های نیم‌رسانا انرژی گرمایی میانگینی دارند که به دما بستگی دارد. با این انرژی گرمایی، برخی از الکترون‌های نوار ظرفیت می‌توانند خود را به نوار رسانش برسانند. گذار الکترون‌ها به سوی بالا، حفره‌هایی در پشت سر خود به جا می‌گذارند، به گونه‌ای که به‌ازای هر گذار یک زوج الکترون-حفره تولید می‌شود. این فرآیند را "تولید حامل" می‌نامند که در شکل ۴ با G_{th}^{16} نمایش داده شده است. هنگامی که یک الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت باز می‌گردد، یک زوج الکترون-حفره نابود می‌شود. این فرآیند وارونه، که "باز ترکیب"¹⁷ نامیده می‌شود و در شکل ۴ با R نمایش داده شده است.



شکل ۴- نمایش فرآیندهای تولید و باز ترکیب.

E_g انرژی گاف، R آهنگ باز ترکیب، G_{th} آهنگ تولید گرمایی، G_L آهنگ تولید با نور، E_v بالاترین انرژی نوار ظرفیت، E_c پایین‌ترین انرژی نوار رسانش است. در ترازمندی گرمایی، آهنگ تولید و آهنگ باز ترکیب باید برابر باشند، به گونه‌ای که چگالی حامل‌ها ثابت باقی بماند. پس شرط $np=n_i^2$ برقرار می‌ماند. شرط ترازمندی را می‌توان با وارد کردن حامل‌های آزاد و بیشتر کردن آن‌ها از مقادیر ترازمندی گرمایی‌شان، برهم زد. این فرآیند، که "تزریق حامل" نامیده می‌شود، می‌تواند به کمک ابزارهای نوری یا الکتریکی انجام شود. تزریق نوری

¹⁶ Thermal Generation

¹⁷ Recombination

شامل یک نور فرودی است که انرژی فوتون آن مساوی یا بزرگتر از انرژی گاف نوار، E_g ، است. آهنگ تولید زوج‌های الکترون-حفره با نور در شکل ۴ با G_L^1 نشان داده شده است. تزریق حامل‌ها، چگالی‌های الکترون‌ها و حفره‌ها را افزایش می‌دهد به گونه‌ای که $p_n > n_i^2$. حامل‌های افزون بر n_i را "حامل‌های افزوده" می‌نامند. با این وجود همیشه چگالی الکترون‌ها و حفره‌های افزوده، برابر است، به گونه‌ای که خنثایی بار فضایی پایدار می‌ماند.

آهنگ بازترکیب متناسب با چگالی الکترون‌های موجود در نوار رسانش و چگالی حالت‌های پرنشده در نوار ظرفیت است که ممکن است گذار به آن‌ها رخ دهد. چون چگالی حالت‌های پرنشده در این مورد با چگالی حفره‌ها برابر است، می‌توان آهنگ بازترکیب مستقیم را چنین نوشت:

$$R = Bnp \quad (3)$$

که در آن B یک ضریب احتمال است و ماهیت آماری بازترکیب را نشان می‌دهد. در ترازمندی گرمایی، آهنگ بازترکیب (R_{th}) باید با آهنگ تولید گرمایی (G_{th}) برابر باشد. پس:

$$G_t = R_{th} = Bn_0p_0 \quad (4)$$

که زیرنویس 0 نماینده‌ی حالت ترازمندی گرمایی است. با تاباندن نور زوج‌های الکترون-حفره با آهنگ G_L تولید شده و چگالی حامل‌ها بیشتر از چگالی ترازمند آن‌ها خواهد شد. در این حالت آهنگ‌های بازترکیب و تولید، تبدیل به مقادیر زیر می‌شوند:

$$R = Bnp = B(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) \quad (5)$$

$$G = G_{th} + G_L \quad (6)$$

که در آن‌ها Δn و Δp چگالی حامل‌های افزوده‌اند و چنین تعریف می‌شوند:

$$\Delta n = n - n_0, \Delta p = p - p_0$$

زیر تابش پایا، باید آهنگ‌های معادلات 5 و 6 برابر باشند. پس:

$$G_L = R - G_{th} \equiv U \quad (7)$$

که U آهنگ "بازترکیب خالص" است. با جای‌گذاری معادلات (4) و (5) در (7) خواهیم داشت:

$$G_L = B(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) - Bn_0p_0 \quad (8)$$

چون $\Delta p = \Delta n$ ، به گونه‌ای که خنثایی بار فضایی برقرار باشد، معادله‌ی (8) را می‌توان چنین بازنویسی کرد:

$$B\Delta p^2 + B(n_0 + p_0)\Delta p = G_L \quad (9)$$

قانون اهم را می‌توان برای حامل‌های بار(الکترون‌ها و حفره‌ها) در نیم‌رساناها به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = (p e \mu_p + n e \mu_n) \mathbf{E} \quad (10)$$

که در آن \mathbf{J} چگالی جریان کل، \mathbf{E} شدت میدان الکتریکی کاربستی، σ رسانندگی، e بارالکترون، μ_n تحرک پذیری الکترون‌ها و μ_p تحرک پذیری حفره‌ها است باوجود آن که سرعت حفره‌ها و الکترون‌ها ناهم‌سو است،

اما جریان آن‌ها با هم جمع می‌شود. با تابش نور و افزایش چگالی بار به اندازه Δn و Δp در فوتومقاومت، چگالی جریان به اندازه ΔJ زیاد می‌شود. پس:

$$\Delta J = (\Delta p e \mu_p + \Delta n e \mu_n) E \quad (11)$$

یا بر حسب اختلاف پتانسیل دو سر نیم‌رسانا (V) می‌توان نوشت:

$$\Delta I = I_{ph} = (\Delta p e \mu_p + \Delta n e \mu_n) (VA/d) \quad (12)$$

که در آن A سطح مقطع گذر جریان، d فاصله میان الکترودها، I_{ph} فوتوجریان و V اختلاف پتانسیل میان دو الکتروود است.

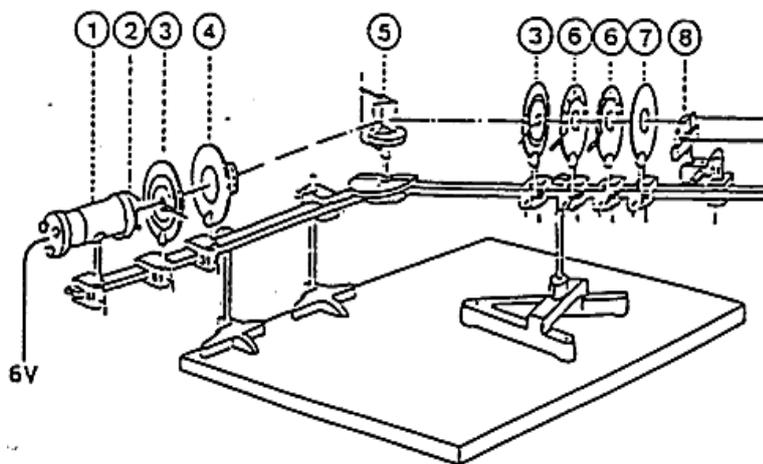
هر بار برای یک شدت نور فرودی ثابت، جریان گذرنده از فوتومقاومت بر حسب ولتاژ کاربرستی را اندازه‌گیری و منحنی مشخصه‌ی $I-V$ فوتومقاومت رسم کنید.

وسایل آزمایش:

منبع تغذیه، لامپ، عدسی هم‌گرا، شکاف‌های تنظیم‌شدنی، منشور شیشه‌ای فلینت، فوتومقاومت، سیم‌های رابط و دو عدد مولتی‌متر برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان.

روش آزمایش:

الف) دستگاه نوری را همانند شکل زیر ببندید.



۱-چشمه‌ی نور

۲-عدسی هم‌گرا

۳-شکاف تنظیم‌شدنی

۴-عدسی هم‌گرا

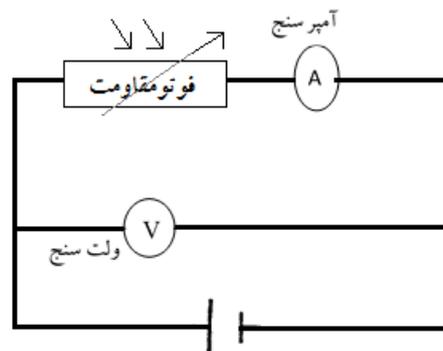
۵-منشور شیشه‌ای فلینت

۶-پولاریزور و آنالیزور مدرج

۷-عدسی هم‌گرا

۸-فوتومقاومت با پوشش

ب) مدار الکتریکی آزمایش را همانند شکل زیر ببندید.



پ) با تنظیم پهنای شکاف‌ها، با حرکت قسمت متحرک و قرار دادن در مکان مناسب، نور تک رنگی را بر روی فوتومقاومت بتابانید. به خاطر داشته باشید که هرچه شکاف تنظیم‌شدنی کوچک‌تر باشد جداسازی رنگی بهتری در رنگ‌ها به دست می‌آید و حساسیت این چیدمان نوری بالاتر می‌رود. بهتر است اولین شکاف را طوری تنظیم کنید که پهنای آن دست کم برابر یا بیشتر از پهنای شکاف دوم باشد.

برای نمونه پهنای شکاف اول بیشتر از $0/3$ میلی‌متر و پهنای شکاف دوم کمتر از $0/3$ میلی‌متر باشد. این بستگی به نتایج شما دارد و می‌توانید آن را بهینه کنید.

یادآوری:

۱- برای کم کردن نورهای ناخواسته، تا آنجایی که ممکن است، اتاق آزمایش را تاریک کنید و دور لامپ را با چیزی پوشانید.

۲- پس از تنظیم نور تک‌رنگ بر روی فوتومقاومت، پوشش سیاه رنگ سوراخ‌دار را بر روی فوتومقاومت قرار دهید. این کار جریان تاریکی (I_0) را تا مقدار زیادی کاهش می‌دهد.

ج- پولاریزور را بر روی درجه‌ی صفر و آنالیزور را هر بار بر روی زاویه‌ی خواسته شده α (برابر صفر، 30° ، 60° و 75°) قرار دهید. شدت نور، I را می‌توان برای هر زاویه دلخواه α از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$J = J_0 D \cos^2 \alpha \quad (13)$$

که در آن J_0 شدت نور فرودی (بی‌پلاریزور و آنالیزور) و D نسبت شدت نور گذشته از پلاریزور و آنالیزور هنگامی که هر دو روی یک زاویه (مثلاً صفر) اند، است.

چ- ولتاژ V را به‌طور پله‌ای برای رنگ انتخابی تغییر دهید و هر بار جریان کل I_{tot} را اندازه‌گیری کنید. با بستن در جعبه‌ی تاریک، جریان تاریکی (I_0) را اندازه بگیرید. اکنون فوتوجریان (I_{ph}) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I_{ph} = I_{tot} - I_0 \quad (14)$$

توجه: با توجه به خطرهای کار با ولتاژهای بالا ($V > 25V$)، به هنگام کار با این ولتاژها دقت کنید. هم‌چنین I_0 را می‌توانید تنها یک‌بار (با هر α ای) اندازه بگیرید.

خ- نتایج را در جدول‌های زیر وارد کنید (خطاها فراموش نشود).

د- آزمایش را برای نورهای قرمز، سبز و بنفش انجام دهید و نتایج را هر بار در جدولی مانند زیر یادداشت کنید.

$V \pm \Delta V$	$I_{ph} (\alpha = 0^\circ) \pm \Delta I$	$I_{ph} (\alpha = 30^\circ) \pm \Delta I$	$I_{ph} (\alpha = 45^\circ) \pm \Delta I$	$I_{ph} (\alpha = 60^\circ) \pm \Delta I$	I_0 جریان تاریکی
0					
5					
10					
15					
20					
25					

نمودار مشخصه‌ی $I-V$ تغییرات I بر حسب ولتاژ کاربستی V فوتومقاومت را برای هر سه رنگ رسم کرده و نتایج آن را تعبیر کنید. پس از انجام آزمایش، ابزارهای اندازه‌گیری را خاموش و میز خود را مرتب کنید.

پرسش‌ها:

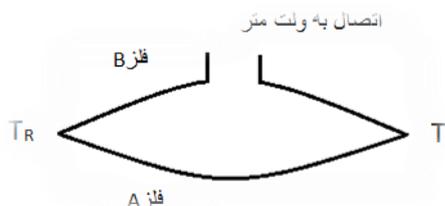
- ۱- رابطه (1) را به دست آورید.
- ۲- در تغییر پله از ولتاژهای ۲۰ ولت به بالا چه تغییری در دقت آزمایش به وجود آمد؟
- ۳- چگونه می‌توان خطاها را در این آزمایش کاهش داد؟
- ۵- نتایج اندازه‌گیری‌های خود را با فرمول‌های موجود در نظریه‌ی آزمایش مقایسه و تعبیر کنید.

آزمایش شماره ۹

آشنایی با برخی از پدیده های برق گرمایی (Thermoelectric)

هدف آزمایش: بررسی پدیده های برق گرمایی، سنجه بندی یک ترموکوپل، بررسی وابستگی ولتاژ یک ترموکوپل به دما

زمینه نظری آزمایش:



اگر دو فلز ناهمسان را سر به سر به یکدیگر وصل کنیم (شکل ۱) و یکی از پیوندگاه ها (آزمون) را در دمای T و پیوندگاه دیگر (مرجع) را در دمای T_R نگه داریم یک جریان در مدار شارش پیدا می کند که مقدار آن به اختلاف

دمای دو پیوندگاه بستگی دارد. این آرایش ترموکوپل نامیده می شود.

این پدیده را نخستین بار سبیک^{۱۹} در سال ۱۸۲۱ کشف کرد و پس از آن به نام وی شناخته شد. در اثر اختلاف دمای دو پیوندگاه یک نیروی محرکه الکتریکی^{۲۰} ایجاد می شود که می توان آن را با رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$\mathcal{E}_{AB} = \int_{T_R}^T (\mathcal{E}_A - \mathcal{E}_B) dT \quad (1)$$

که در آن \mathcal{E}_A و \mathcal{E}_B ضرایب سبیک دو فلز، T دمای پیوندگاه آزمون و T_R دمای پیوندگاه مرجع هستند. چنانچه \mathcal{E}_A و \mathcal{E}_B به صورت توابعی از T معلوم باشند، نیروی محرکه الکتریکی به سادگی محاسبه می شود. اگر T_R را عوض کنیم و به آن مقدار ثابت دیگری بدهیم رابطه میان \mathcal{E}_{AB} و T به جز افزوده شدن یک مقدار ثابت، بی تغییر باقی می ماند. بنابراین نتیجه می شود که $\frac{d\mathcal{E}_{AB}}{dT}$ مستقل از T_R است و فقط به ماهیت فلز های A و B و دمای T

بستگی دارد. عبارت $\frac{d\mathcal{E}_{AB}}{dT}$ به ازای هر مقدار T_R به توان ترمو الکتریکی معروف است.

از نظر میکروسکوپی دلیل ایجاد این نیروی محرکه الکتریکی به انرژی فرمی مربوط می شود. مواد مختلف دارای انرژی فرمی متفاوتی هستند، به همین دلیل زمانی که دو فلز ناهمسان را سر به سر به یکدیگر وصل می کنیم اختلاف دمایی میان دو سر به وجود می آوریم، الکترون های آزاد با سطح انرژی بیشتر به سمت انرژی کمتر حرکت کرده و سبب ایجاد یک جریان ترمو الکتریکی خواهد شد. برتری بزرگ ترموکوپل ها گستره بزرگ اندازه گیری و کارکرد خطی آن ها در بازه ی اندازه گیری است. گزینش فلزهای هر ترموکوپل با توجه به بازه ی اندازه گیری مورد نظر، دمای ذوب فلز و حساسیت مورد نیاز انجام می شود.

¹⁹seebeck

²⁰Electromotive force

ولتاژ به وجود آمده در دو سر هر ترموکوپل و حساسیت آن بسته به جنس سیم هایش گوناگون است. در جدول (۱) حساسیت چهار گونه ترموکوپل آمده است.

جدول ۱- حساسیت ترموکوپل های گوناگون

گونه	آلیاژ	حساسیت ($\mu V/^{\circ}C$)	بازه دمایی کار پیوسته ($^{\circ}C$)	محدوده دمایی کوتاه مدت ($^{\circ}C$)
<i>K - type</i>	کرومل - آلومل	۴۱	۰ تا ۱۱۰۰	۱۸۰- تا ۱۳۰۰
<i>J - type</i>	آهن - کنستانتان	۵۵	۰ تا ۷۵۰	۱۸۰- تا ۸۰۰
<i>T - type</i>	مس - کنستانتان	۴۳	۱۸۵- تا ۳۰۰	۲۵۰- تا ۴۰۰
<i>E - type</i>	کرومل - کنستانتان	۶۸	۰ تا ۸۰۰	۴۰- تا ۹۰۰

بیشترین دمای کاری ترموکوپل به ضخامت سیم های آن بستگی دارد. جدول زیر نمونه ای از قطرهای بهینه برای ترموکوپل های گوناگون است.

جدول ۲- حد بالای دمای کاری پیوسته بر حسب درجه سلسیوس برای قطرهای گوناگون سیم ها

قطر سیم (mm)					گونه
۰.۳۳	۰.۵۱	۰.۸۱	۱.۵۳	۳.۲۵	
-	۱۴۸۲	-	-	-	<i>R & S - type</i>
-	۱۷۰۵	-	-	-	<i>B - type</i>
۲۰۴	۲۰۴	۲۶۰	۳۷۱	-	<i>T - type</i>
۳۷۱	۳۷۱	۴۸۲	۵۹۳	۷۶۰	<i>J - type</i>
۸۷۱	۸۷۱	۹۸۲	۱۰۹۳	۱۲۶۰	<i>K - type</i>
۴۲۷	۴۲۷	۵۳۸	۶۴۹	۸۷۱	<i>E - type</i>

ترموکوپل ها هنوز پس از گذشت سال های زیادی از ساخت آن ها، همواره از بهترین حسگرهای دمابوده و هستند، زیرا با نقطه مورد نظر برای دماسنجی در تماس بوده و دما را به سادگی به صورت پتانسیل الکتریکی انتقال می دهند. از جمله کاربردهای ترموکوپل می توان به اندازه گیری کردن دمای کوره، دمای دودکش، اندازه گیری دمای دستگاه های تولید کننده مواد غذایی و دارو اشاره کرد. هم چنین ترموکوپل را می توان برای ایجاد یک اختلاف پتانسیل و ایجاد یک جریان الکتریکی به کار گرفت. این ابزار در صنعت کاربردهای بسیاری دارد و از مهمترین آن ها ایمن سازی تجهیزات گازسوزمانند اجاق گاز و بخاری های گازی است. در این دستگاه های گازسوز، یک شیر مغناطیسی وجود دارد که جریان الکتریکی آن با ترموکوپلی که کنار شعله قرار داده شده است، فراهم می گردد. هنگامی که به دلایلی مانند وزش باد، شعله ی گاز خاموش می شود، با سرد

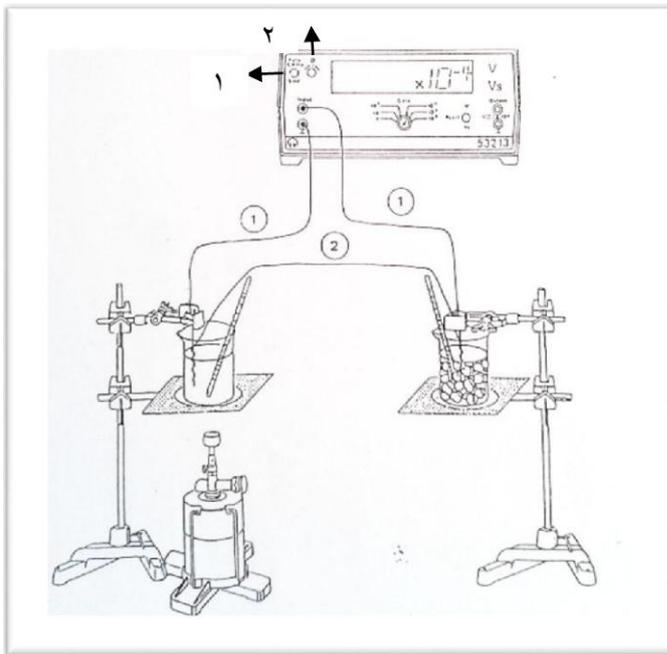
شدن ترموکوپل جریان شیر مغناطیسی کاهش یافته و باعث قطع جریان گاز می گردد. جهت قطع کردن گاز و جلوگیری از انتشار آن از ترموکوپل استفاده می شود. معمولاً برای جلوگیری از آسیب دیدن ترموکوپل آن را درون یک پوشش مناسب قرار می دهند.

ابزارهای آزمایش: بشر، دماسنج، میکرو ولت متر، پایه و میله نگهدارنده، ترموکوپل هایی با جنس های گوناگون، توری سیمی، یخ، آب مقطر، کبریت و شعله گرم کن.

دستور انجام آزمایش:

الف) سنجه بندی یک ترموکوپل با

نقطه مرجع:



نخست ترموکوپل شماره (۱) را به طور مستقیم به میکروولت متر وصل کرده و دکمه تقویت را بر روی 10^3 اقرار دهید و به کمک دکمه های شماره ۱ و ۲ مقدار ولتاژ را بر روی صفر تنظیم کنید. به این کار تنظیم صفر میکرو ولت متر می گویند. سپس بشری را تا $\frac{3}{4}$ از آب مقطر پر کنید و روی شعله قرار دهید. در ظرف دیگر چند قطعه یخ به همراه مقداری آب مقطر بریزید. کمی صبر کنید تا دمای آب و یخ به صفر درجه سانتیگراد برسد.

پس از اینکه آب درون ظرف اول به جوش آمد، شعله را خاموش کنید. یک سر ترموکوپل را در ظرف آب گرم و سر دیگر را در ظرف مخلوط آب و یخ قرار دهید و مانند شکل ترموکوپل را به میکروولت وصل کنید. دمای آب گرم را با گذاشتن یک دماسنج جیوه ای (یا الکلی) و ولتاژ ایجاد شده را یادداشت کنید. دقت کنید که در هنگام انجام آزمایش دمای آب و یخ باید تقریباً صفر باشد. اگر این طور نیست دلیل آن را بیان کنید. به همین منظور گاه گاهی آنرا هم بزنید. به ازای هر ۵ درجه کاهش دمای آب گرم، ولتاژ مربوطه را بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.

جدول (۳) - ترموکوپل اول

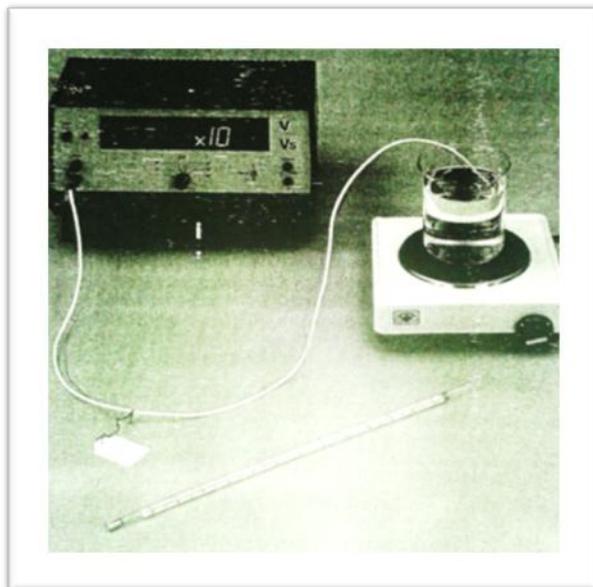
$U(mV)$							
$\Delta U(mV)$							
$\theta(^{\circ}C)$							
$\Delta\theta(^{\circ}C)$							

به کمک جدول (۲) نمودار ولتاژ بر حسب دما را رسم کنید. آیا این نمودار خطی است؟ خطی با این داده ها برازش داده و معادله آن را به کمک *excel* یا نرم افزارهای مناسب دیگر به دست آورید. از این نمودار چه نتیجه ای می گیرید؟ آزمایش را برای ترموکوپلی با جنس های دیگر تکرار کنید و پس از رسم نمودار، نتیجه را با حالت پیش مقایسه کنید.

جدول (۴) - ترموکوپل دوم

$U(mV)$							
$\Delta U(mV)$							
$\theta(^{\circ}C)$							
$\Delta\theta(^{\circ}C)$							

خطاهای موجود در این بخش را نام ببرید. برای کاهش خطاهای موجود چه پیشنهادی دارید؟ با نوشتن معادله خط و جایگذاری ولتاژ میکرو ولت متر در آن دمای یک نقطه از شعله گاز را با دو ترموکوپل به دست آورید. آیا اختلافی دارند؟ چرا؟



با توجه به اینکه دماسنج (ترموکوپل) تا $100^{\circ}C$ سنجه بندی است آیا نتیجه به دست آمده برای دمای شعله معتبر است؟

ب) سنجه بندی یک ترموکوپل یک پیوند گاهه (با نقطه مرجع دمای اتاق)

در این بخش ترموکوپل به کار رفته تنها یک نقطه اتصال دارد و دمای اتاق به عنوان دمای مرجع در نظر گرفته می شود. با بستن ترموکوپل به میکروولت متر همانند بخش پیش صفر آن را تنظیم کنید. با به جوش آوردن آب، به هنگام سرد شدن دمای آن و ولتاژ ایجاد شده را اندازه گیری و یادداشت کنید. به ازای

هر ۵ درجه سانتیگراد کاهش دما، ولتاژ مربوطه را بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.

جدول (۵) - ترموکوپل یک پیوند گاهه

$U(mV)$							
$\Delta U(mV)$							
$\theta(^{\circ}C)$							
$\Delta\theta(^{\circ}C)$							

تغییرات ولتاژ بر حسب دما را رسم کنید و وابستگی خطی ولتاژ به دما را تحقیق کنید. سپس به کمک نوشتن معادله خط مربوط و اندازه گیری ولتاژ به دست آمده از یک نقطه شعله، دمای آن بخش را به دست آورید. درباره معتبر بودن پاسخ به دست آمده بحث کنید. آزمایش قسمت (ب) را برای ترموکوپل دیگری تکرار کنید و وابستگی خطی ولتاژ به دما را تحقیق کنید.

جدول (۶) - ترموکوپل یک پیوند گاهه

$U(mV)$							
$\Delta U(mV)$							
$\theta(^{\circ}C)$							
$\Delta\theta(^{\circ}C)$							

از نتایج به دست آمده از قسمت های (الف)، (ب) و (ج) خطاگیری کنید.



ج) آهنربای الکتریکی - گرمایی (Thermo-Electromagnet):

آهنربای الکتریکی - گرمایی برای نشان دادن نیروی محرکه ی ترموالکتریکی یک زوج فلز (مس - کنستانتان) به کار می رود. بخش اصلی آهنربای الکتریکی - گرمایی، یک میله ی مسی از با سطح مقطع مربعی به ضلع ۱۰ میلی متر است. بازوهای این بخش با دو قطعه ی کنستانتانی به هم متصل شده است. سر یکی از بازوهایمانند شکل خم شده تا در آب سرد قرار گیرد. بازوی

دیگر روی شعله قرار می گیرد. هسته ی آهنربای الکتریکی - گرمایی از دو بخش آهنی تشکیل شده است. بخش بالایی که به آن یک قلاب متصل شده و بخش پایینی که شبیه به گلدان و جرم آن ۵ کیلوگرم است. زمانی که بازوی خم را درون ظرف آب و یخ قرار داده و بازوی دیگر را روی شعله گذاشته شود، به دلیل ایجاد جریان در میله مسی نیروی مغناطیسی قابل توجهی درون آهن القا می کند که می تواند وزنه ۵ کیلوگرمی را از زمین بلند کند. توجه کنید که اینجا فقط یک دور سیم پیچ وجود دارد.

وسیله ای مطابق شکل بالا در اختیار دارید. یک سر آن را به شعله نزدیک کنید و سر دیگر را در ظرف آب و یخ قرار دهید. پس از گذشت مدتی (حدود ۱۵ دقیقه) توسط قلاب اقدام به برداشتن قطعه ی رویی کنید. مشاهدات خود و دلیل آن را بیان کنید.

پرسش ها

۱. اثرهای تامسون، پلتیه، ژول و فوریه را توضیح دهید و آن‌ها را با اثر سبیک مقایسه کنید.
۲. ترموکوپل‌های نوع‌های R، T و N از چه آلیاژهایی تشکیل شده‌اند؟ توضیح دهید هر کدام از ترموکوپل‌های استفاده شده در آزمایش جزء کدام نوع دسته می‌باشند؟
۳. ترموپیل چیست؟
۴. کاربردهای دیگری از ترموکوپل (به جز مواردی که در دستورکار ذکر شده است) را برشمرد.
۵. غلاف ترموکوپل‌ها از چه جنسی است؟ به کار بردن آن‌ها چه کاستی‌ها و برتری‌هایی دارد؟

آزمایش شماره ۱۰

بررسی ساختار بلورین تنگستن با میکروسکوپ گسیل میدانی

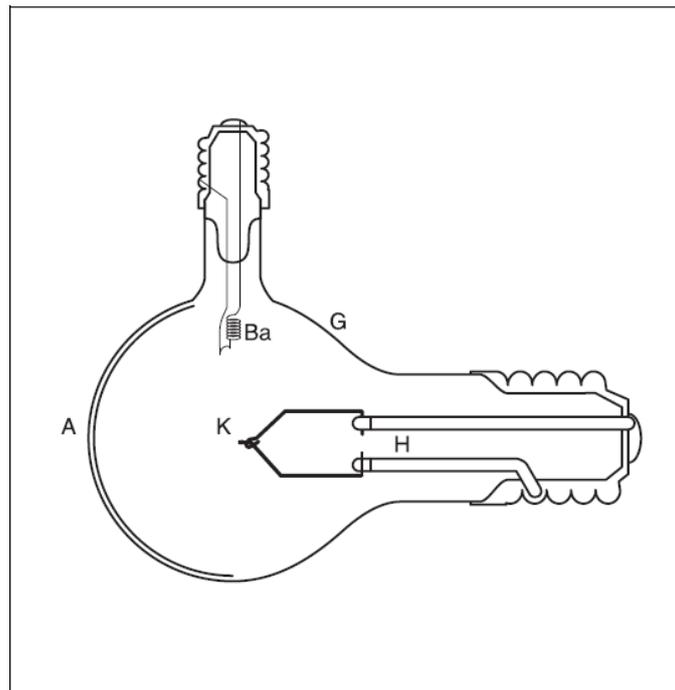
اهداف آزمایش:

- کار با میکروسکوپ گسیل میدانی و بررسی ساختار مکعبی مرکز حجمی تک بلور تنگستن
- دیدن تک اتم های باریوم و حرکت های گرمایی آن ها هنگامی که بر روی سطح تک بلور تنگستن می نشیند

نظریه

در میکروسکوپ گسیل میدانی یک تک بلور تنگستن بسیار نوک تیز به عنوان کاتد (K) در مرکز لامپ شیشه ای کروی شکل (G) که با خلا بالایی تخلیه شده است قرار دارد، شکل (۱). یک لایه فلورسانس نیز بر روی دیواره درونی لامپ که به عنوان آند (A) کار می کند نشانده شده است. با کار بست کمینه ولتاژی به اندازه ۵kV الکترون ها از تنگستن به سوی صفحه فلورسانس حرکت کرده و با آن برخورد می کنند. که در نتیجه ی این برخورد نور سبز گسیل می شود که می توان آن را در یک محیط تاریک به خوبی دید.

شکل (۱): نمای یک لامپ میکروسکوپ گسیل میدانی. G بدنه شیشه ای لامپ، K تک بلور تنگستن بسیار کوچک، A لایه فلورسانس که اند است، Ba فلز باریوم در گرمکن.



شکل ۱. نگاره ی لامپ میکروسکوپ گسیل میدانی

هنگامی که ولتاژ بالا (high voltage) به کار بسته می شود خطوط میدان به صورت شعاعی از نوک تنگستن تا صفحه فلورسانس شکل می گیرند. در نزدیکی نوک تنگستن شدت میدان از مرتبه بزرگی 10^{10} V/m است بنابراین الکترون های رسانش می توانند از بلور تنگستن با پدیده ی گسیل میدانی کنده شوند و به صورت

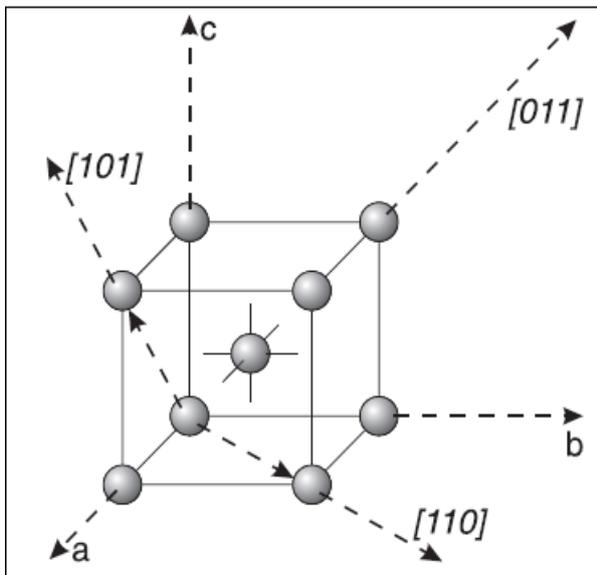
شعاعی به سوی صفحه فلورسانس حرکت کنند. تعداد الکترون های گسیل شده با میدان به شدت به تابع کار الکترون ها بستگی دارد. هم چنین می دانیم که تابع کار صفحات گوناگون بلور با هم تفاوت بسیاری دارند. بزرگنمایی تصویر ساختار تنگستن که بر روی صفحه فلورسانس نمایان می شود به صورت زیر است:

$$V = \frac{R}{r}$$

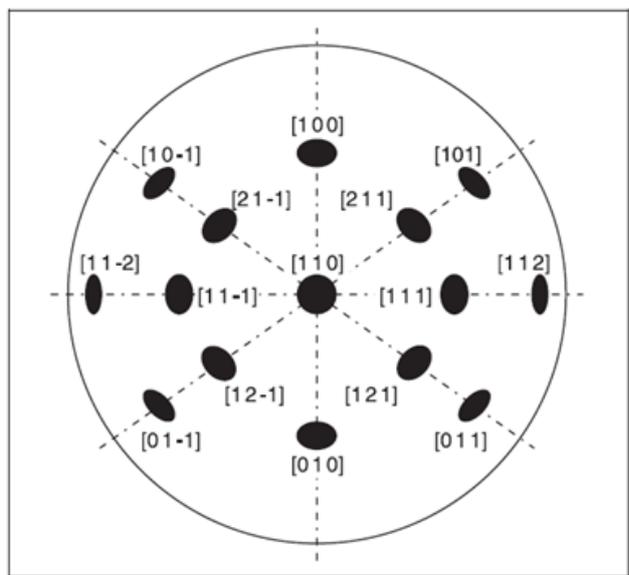
که در آن R شعاع کره ای است که لایه فلورسانس بر روی آن نشانده شده است و برابر 4cm است. ۲ میان ۰/۱ تا ۰/۲ میکرومتر است که در واقع این مقدار شعاع شکل نیم کره ای است که نوک کاتد دارد و از تنگستن ساخته شده است. این بزرگنمایی در حدود ۵۰۰۰۰۰ برابر است

بررسی ساختار بلورین تنگستن :

در شکل (۲) یاخته ی مکعبی مرکز حجمی (bcc) شبکه تنگستن نشان داده شده است. راستای بلورشناختی [۱۰] [۱] متناظر با چیزی است که در مرکز صفحه فلورسانس می بینیم. راستاهای دیگر بلورشناختی متناظر با نقاطی که بر روی صفحه فلورسانس دیده می شود در شکل (۳) نشان داده شده است .



شکل ۳



شکل ۲

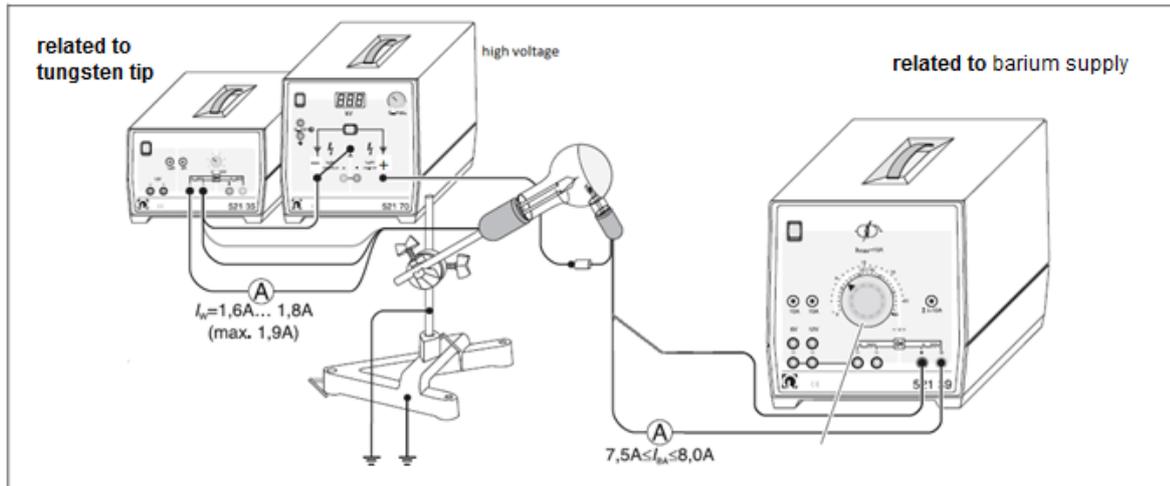
تصویر کردن اتم های باریوم :

با آن که لامپ شیشه ای تا 10^{-10} bar تخلیه شده است، اما اندک اتم های گازی باقی مانده هم کوچکتر از آنند که بتوان آن ها را به صورت تک اتم دید. به همین دلیل برای دیدن تک اتم ها یک فلز الکتروپوزیتیو (فلز هایی که گرایش به از دست دادن الکترون و تشکیل یون مثبت دارند) به کار گرفته شده است. بدین منظور در این آزمایش اتم های باریوم با قطری در حدود ۰/۴ nm که به اندازه کافی بزرگ اند به کار گرفته شده است. اتم های باریوم پس از آن که بر روی تنگستن نشستند به صورت نقاط روشن بر روی صفحه فلورسانس دیده شدنی اند. چگونگی قرارگیری فلز باریوم در بوبته ی باریوم که پتانسیل مثبت دارد (آند) در شکل (۱) نشان داده

شده است. اگر تنگستن با احتیاط گرم شود حرکت گرمایی اتم های باریوم قابل دیدن خواهد بود به این صورت که زمانی که اتم های باریوم در اثر حرکت های گرمایی جای خود را تغییر می دهند نقاط روشن محو می شوند و سپس دوباره روشن می شوند.

چیدمان و انجام آزمایش:

ابتدا چیدمان دستگاه را مانند شکل زیر در حالی که همه ی دستگاه ها خاموش اند ببینید و تا زمانی که به تایید استاد مربوطه نرسیده از روشن کردن آن خوداری کنید.



شکل ۴

مکانی که آزمایش در آن انجام می شود را تا حد امکان تاریک کنید این باعث می شود در آزمایش به ولتاژهای بسیار بالا نیاز نباشد. سپس مراحل زیر را به دقت انجام دهید.

● توجه داشته داشته باشید اشتباه انجام دادن هریک از این مراحل موجب از میان رفتن دستگاه می شود.

1 نخست منبع تغذیه ولتاژ بالا را روشن کنید و ولتاژ را به آرامی افزایش دهید تا تصویر بر روی صفحه فلورسانس دیده شود. اگر پدیده ی رخشانی با مرز های تیز (sharp boundaries) دیده شود تک بلور تنگستن آسیب دیده و در این حالت نباید ولتاژ های بیشتر از 5kV را به لامپ داد.

2 برای تمیز کردن تنگستن منبع ولتاژ بالا (high voltage) را صفر کنید. لازم به گفتن است که مدتی طول می کشد تا خروجی به صفر برسد. حال با توجه به شکل (۴) جریان متصل به نوک تنگستن را حتما به آرامی و از صفر تا ۱.۵ آمپر افزایش دهید. و پس از گذشت حدود ۳ دقیقه جریان را به صفر برسانید و مدتی صبر کنید تا تنگستن سرد شود.

3 پس از سرد شدن تنگستن برای مطالعه ساختار تنگستن ولتاژ منبع ولتاژ بالا را به آرامی از صفر تا هنگامی که تصویر به روشنی بر روی صفحه فلورسانس دیده شود افزایش دهید دقت کنید که ولتاژ هرگز نباید از 7 kV فراتر رود.

● از تصویر تشکیل شده بر روی صفحه فلورسانس یک بار بلافاصله بعد از زمان تشکیل تصویر و یک بار هم بعد از گذشت ۳ دقیقه از زمان تشکیل تصویر عکس برداری کنید و دلیل متفاوت بودن این تصاویر را بیان کنید.

● دلیل وجود لکه‌های تاریک با اندازه‌های متفاوت را در تصویر اولیه بیان کنید.

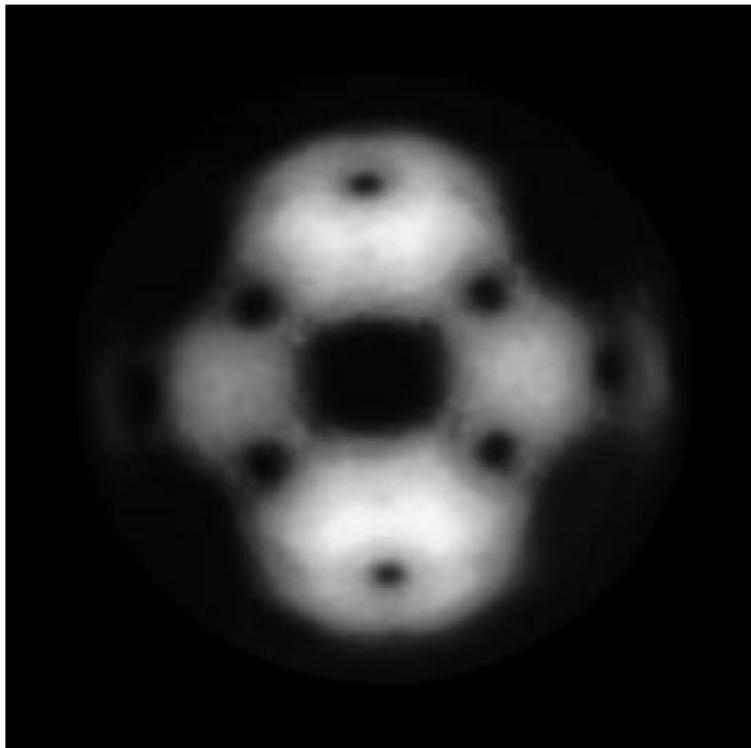
● با مقایسه تصویر تشکیل شده بر روی صفحه فلورسانس بلافاصله بعد از زمان تشکیل تصویر و شکل ۳ نواحی تاریک و روشن را به راستاهای بلور شناختی در شکل ۳ نظیر کنید و علت تاریک یا روشن بودن این نواحی را بیان کنید.

④ لایه نشانی کردن بخار باریوم بر روی تنگستن : همزمان با کار بست ولتاژ بالا با توجه به شکل (۴) جریان گرمایی باریوم را از صفر به آرامی و حداکثر تا ۷/۵ آمپر افزایش دهید. پیشنهاد می‌شود از زمان شروع مرحله ۴ از صفحه فلورسانس فیلم برداری کنید و سپس با دیدن تصاویر ضبط شده تغییرات آن را که می‌بینید بنویسید. علت این تغییرات چیست؟ جریان بوته تبخیر باریوم در این مرحله میان ۳۰ تا ۶۰ ثانیه برقرار کنید.

⑤ دیدن اتم‌های باریوم نشانده شده بر روی تنگستن : جریان متصل به نوک تنگستن را حداکثر تا ۰/۶ آمپر افزایش دهید و صفحه فلورسانس را مشاهده و مشاهدات خود رو تفسیر کنید.

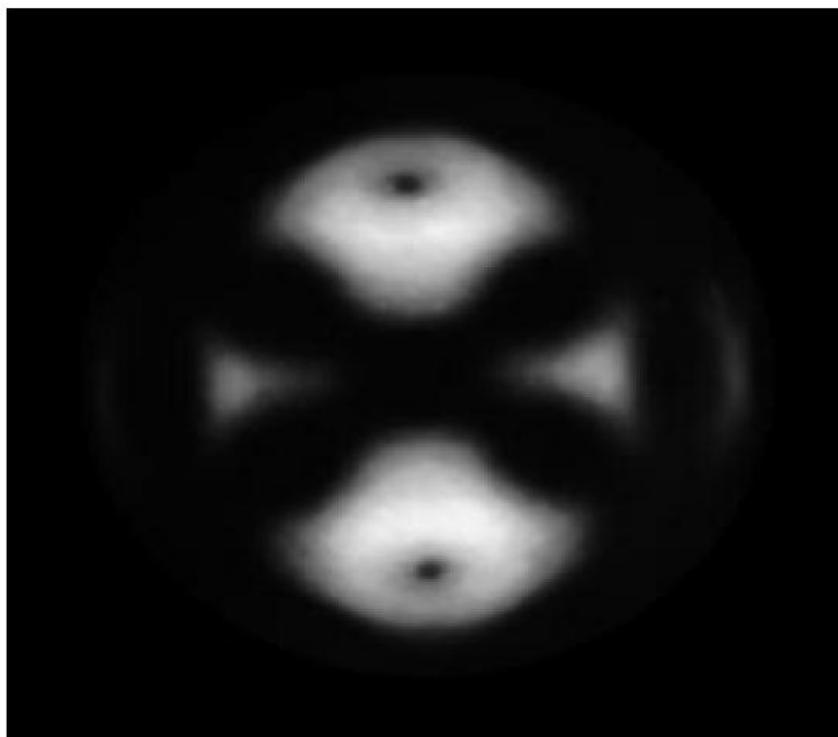
نمونه انجام آزمایش:

شکل ۵ نوک تنگستن را پس تمیز شدن آن به وسیله جریان گرمایی را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۵ و شکل ۳ می‌توان نواحی تاریک و روشن در شکل ۵ را به راستاهای بلور شناختی در شکل ۳ همانند کرد.



شکل ۵: تصویر نوک تنگستن بلافاصله بعد از تمیز کردن آن

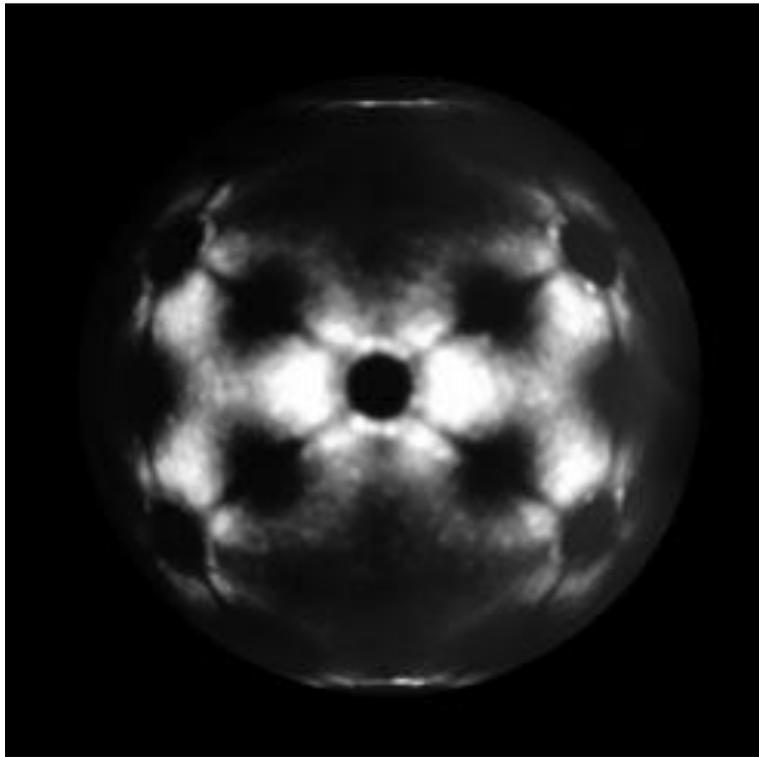
صفحه (۱ ۱ ۰) که عمود بر راستای [110] است در مرکز صفحه فلورسانس به صورت یک ناحیه تاریک بزرگ تصویر می شود. سایر صفحات با تقارن بلوری مشابه ((۱ ۰ ۱), (0 1 1), (1 0 -1), (0 1 -1)) نیز به صورت نواحی تاریک دیده می شوند. از این صفحات به دلیل بزرگ بودن تابع کار این صفحات نسبت به سایر صفحات تنها تعداد کمی الکترون گسیل می شود. صفحات بلوری (۱۰۰), (۰۱۰), (211), (۱۲۱), (۱۱۲), (21-1), (12-1), (11-2) چون تابع کار به نسبت، متوسط دارند به صورت نواحی تاریک کوچک تصویر می شوند. صفحات بلوری (۱۱۱) و (11-1) به دلیل تابع کار به نسبت کوچکشان به صورت نقاط روشن تصویر می شوند. بعد از گذشت ۳ دقیقه از زمان تشکیل تصویر نوک تنگستن به وسیله گاز های باقی مانده در لامپ پوشیده می شود و تصویر به شکل زیر در می آید.



کل ۶. تصویر نوک تنگستن

دیدن اتم های باریوم نشانده شده بر روی تنگستن :

بعد از اینکه باریوم روی نوک تنگستن قرار گرفت به شرط آنکه نوک تنگستن به طور مداوم گرم شود حرکت تک اتم های باریوم مشاهده می شود. ارتعاش های گرمایی شبکه بلور به اندازه کافی قوی است تا بر نیروی جاذب وارد بر اتم های باریوم چیره شود و سبب تغییر مکان اتم های باریوم شود. در ضمن جابجایی های عرضی اتم های باریوم قابل مشاهده نیست. می توان مشاهده کرد نیروی جاذب وارد بر اتم ها که باعث کمتر شدن حرکت اتم ها می شود در صفحه {۱ ۰ ۱} کمترین مقدار و در صفحه {۱ ۰ ۰} بیشترین مقدار خود را دارد. به همین دلیل است که در مورد دوم حرکت اتم های باریوم بعد از سپری شدن مدت زمان بیشتری قابل مشاهده است.



شکل ۷. تصویر نوک تنگستن به همراه اتم های باریوم نشانده شده روی آن

آزمایش ۱۱ تشدید اسپینی الکترون

اهداف آزمایش:

- ۱- تعیین میدان مغناطیسی تشدید B_0 به عنوان تابعی از فرکانس انتخابی ν
- ۲- تعیین عامل لانده g از نمونه‌ی DPPH
- ۳- تعیین پهنای قله δB_0 سیگنال تشدید

تشدید اسپین الکترونی:

از هنگام کشف اثر تشدید اسپین الکترونی در سال ۱۹۴۵، تشدید اسپین الکترونی به عنوان یک روش مهم در بررسی ساختارهای مولکولی و بلورین، واکنش‌های شیمیایی در فیزیک شیمی و بیوپزشکی گسترش یافته است. تشدید اسپینی به مواد پارامغناطیسی محدود می‌شود زیرا در این مواد تکانه‌های زاویه‌ای مداری و اسپینی الکترون با هم جفت شده به گونه‌ای تکانه زاویه‌ای کل صفر نیست. ترکیب‌های مناسب عبارتند از آنهایی که اتم‌هایی دارند که لایه داخلی آنها پر نشده است، مانند مولکول‌های آلی (رادیکال‌های آزاد) که دارای الکترون جفت نشده یا بلورهایی که با تهی‌جاها شبکه در حالت پارامغناطیس هستند. گشتاور مغناطیسی وابسته به تکانه زاویه‌ای \vec{J} از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\vec{\mu}_J = -\frac{g_J \mu_B}{\hbar} \vec{J} \quad (I)$$

که در آن μ_B مگنتون بوهر است و بیانگر گشتاور مغناطیسی یک تک الکترون است و g_J عامل شکافتگی لانده است:

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e}$$

انرژی پتانسیل یک گشتاور مغناطیسی $\vec{\mu}_J$ هنگامی که در یک میدان مغناطیسی B_0 قرار می‌گیرد، برابر است با:

$$E = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B}_0 \quad (II)$$

انرژی E کوانتیده است زیرا گشتاور مغناطیسی و تکانه زاویه‌ای کل تنها می‌تواند مقادیر گسسته نسبت به میدان مغناطیسی را به خود بگیرد. تکانه زاویه‌ای نسبت به یک میدان مغناطیسی دستی به یک حالت با انرژی خاص منجر می‌شود. هر مولفه‌ی J_z از تکانه زاویه‌ای کل که موازی میدان مغناطیسی است در زیر آمده است:

$$J_z = \hbar \cdot m_j \quad (III)$$

که در آن

$$m_j = -j, -(j-1), \dots, j$$

یک عدد درست یا نیم درست است. انرژی پتانسیل ترازهای زمین از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$E = g_J \cdot \mu_B \cdot B_0 \cdot m_j \quad (IV)$$

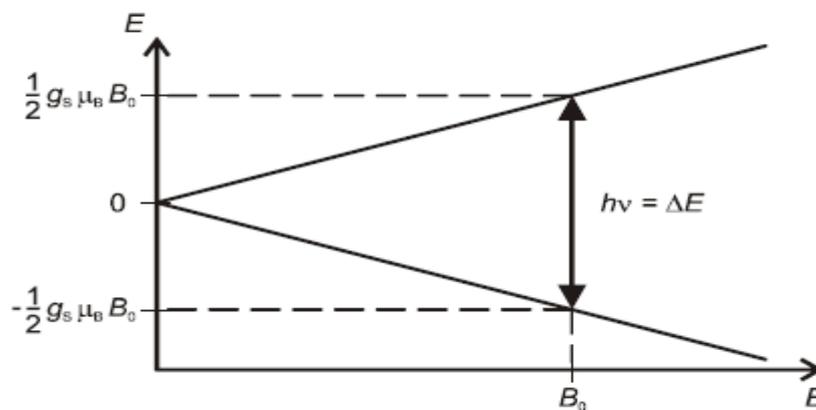
این انرژی می تواند به طور مستقیم با تشدید اسپین الکترونی اندازه گرفته شود. بدین منظور یک میدان مغناطیسی متناوب با بسامد بالا به شکل زیر :

$$B_1 = B_{HF} \cdot \sin(2\pi\nu \cdot t)$$

عمود بر میدان مغناطیسی ایستای B_0 بر نمونه تابانده می شود . اگر انرژی فوتون های میدان متناوب برابر اختلاف انرژی ΔE میان دو تراز هم پایه باشد، به عبارت دیگر اگر دو شرط $\Delta m_j = \pm 1$ (v) و

$$h\nu = \Delta E = g_j \cdot \mu_B \cdot B_0 \quad (vI)$$

بر آورده شود. آن گاه میدان متناوب منجر به یک وارو زدن گشتاور مغناطیسی از یک جهت میدان B_0 به جهت دیگر می شود. به سخن دیگر گزارهای میان ترازهای انرژی میانه القا شده و اثر تشدید دیده می شود که خود را با جذب انرژی از میدان مغناطیسی متناوب که به نمونه تابانده شده است نشان می دهد.



شکل ۱: شکافتگی تراز یک الکترون آزاد در یک میدان مغناطیسی و شرط تشدید برای تشدید اسپین الکترونی.

در ترکیبات بی شماری، تکانه زاویه ای مداري به گونه ای چشمگیر، کوچک است و بنابراین تنها می توان تکانه زاویه ای اسپینی را در نظر گرفت. برای ساده سازی این وضعیت برای الکترون آزاد داده شده است. در اینجا تکانه زاویه ای کل به اسپین الکترون محدود می شود.

$$J = S = 1/2$$

عامل لانده برابر است با :

$$g_j = g_s \cong 2.0023$$

در یک میدان مغناطیسی انرژی الکترون به دو تراز شکافته می شود:

$$E = g_s \cdot \mu_B \cdot B_0 \cdot m_s \quad (Iva)$$

$$m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

که متناظر با جهت گیری موازی $\frac{1}{2}$ و پاد موازی $\frac{1}{2}$ ، اسپین الکترون با میدان است. در یک گذار میان این دو تراز، قاعده گزینش $\Delta m_j = \pm 1$ به گونه ای خودبه خود برقرار است. در همانندی با معادله VI شرط تشدید به صورت زیر در می آید:

$$h\nu = g_s \mu_B B \quad (vIa)$$

اینکه اگر انرژی که از میدان متناوب با بسامد ثابت ν جذب می‌شود به عنوان تابعی از شدت میدان مغناطیسی B_0 اندازه گرفته شود. آن گاه در این حالت، یک قله‌ی جذب با پهنای δB_0 دیده می‌شود. در ساده‌ترین حالت این پهنای قله در یک میدان مغناطیسی همگن یک بیان از اصل عدم قطعیت δE از گذار است. اصل عدم قطعیت به صورت زیر به کار می‌رود:

$$\delta E \cdot T \geq \frac{\hbar}{2} \quad (vII)$$

که در آن T طول عمر تراز است. ا توجه به معادله (v) داریم:

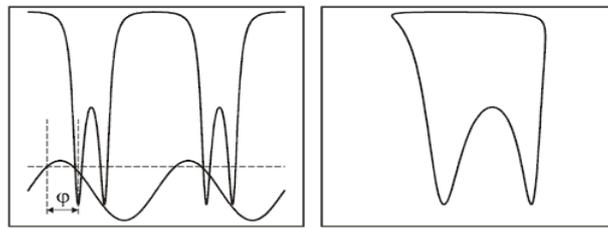
$$\delta E = g \mu_B \delta B_0 \quad (vIII)$$

بنابراین عبارت $\delta B_0 = \frac{\hbar}{2 \cdot g_j \cdot \mu_B \cdot T}$ به بسامد وابسته نیست.

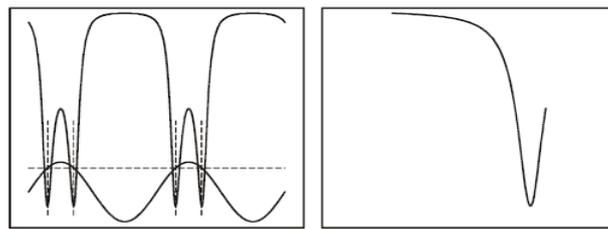
در این آزمایش موقعیت و پهنای قله‌های جذب نمونه مورد بررسی در بیناب ESR ارزیابی می‌شود. با توجه به موقعیت قله‌ها عامل لانده نمونه بر پایه معادله (vI) تعیین می‌شود. در مورد یک اتم یا یون آزاد اگر ویژگی مغناطیسی تنها از تکانه زاویه‌ای مداری باشد، عامل $g_j = 1$ و اگر ویژگی مغناطیسی تنها برآمده از اسپین باشد، عامل $g_j = 2.0023$ است. بهر حال باید توجه کرد مراکز پارامگناطیس که بوسیله‌ی تشدید اسپینی الکترونی بررسی می‌شود، آزاد نیستند چرا که در شبکه‌ی بلوری یک جامد جای گرفته‌اند یا با لایه‌ای از حلال در یک محلول پوشیده شده‌اند که در میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی قوی قرار می‌گیرند که با اتم پیرامونشان تولید می‌شوند. این میدان‌ها به یک جابه‌جایی انرژی منجر می‌شوند و بر شکافتگی زیمن ترازهای الکترونی تاثیر می‌گذارند. بدین گونه مقدار عامل لانده تغییر می‌کند و در بسیاری از مواقع یک محیط ناهمسانگرد می‌شود و یک ساختار خوب در طیف ESR اتفاق می‌افتد. بنابراین مقدار عامل لانده مجاز با توجه به بستگی الکترون و ساختار شیمیایی نمونه تحت ملاحظاتی نتیجه‌گیری می‌شود.

بسامد کاری بیناب سنج‌های ESR برای کاربردهای عملی معمولاً در حدود ۱۰ گیگا هرتز (مایکروویو) است. به طور متناظر میدان‌های مغناطیسی از مرتبه 0.1 تا 1 تسلا است. در این آزمایش میدان‌های مغناطیسی به گونه‌ای چشمگیری ضعیف‌تر است. میدان با پیچه‌های هلمهولتز تولید می‌شود. با انتخاب مناسب جریان پیچه مقدار میان ۰ تا 4 میلی تسلا تنظیم می‌شود. بدین ترتیب یک میدان $B_{mod} 50$ هرتز هم‌راستا با یک میدان B_0 مدوله می‌شود. نمونه در پیچه HF گذاشته می‌شود که بخشی از مدار نوسان ساز است. برای نوسان ساز تغییر بسامد HF از 15 تا 130 مگاهرتز برانگیخته می‌شود. اگر شرط تشدید رابطه‌ی (vI) برآورده شود، نمونه انرژی را جذب می‌کند و مدار نوسان ساز بارگیری می‌شود. در نتیجه مقاومت مدار نوسان ساز تغییر می‌کند و ولتاژ در پیچه کاهش می‌یابد این ولتاژ با یکسوسازی و تقویت‌کنندگی به سیگنال قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌شود. سیگنال اندازه‌گیری با یک تاخیر زمانی نسبت به میدان مغناطیسی مدوله شده به یونیت کنترل می‌رسد. این تاخیر زمانی با جابه‌جایی فاز در واحد کنترل جبران می‌شود. یک اسیلوسکوپ دو کاناله در نمایش x-y، سیگنال اندازه‌گیری را با ولتاژی که متناسب با میدان

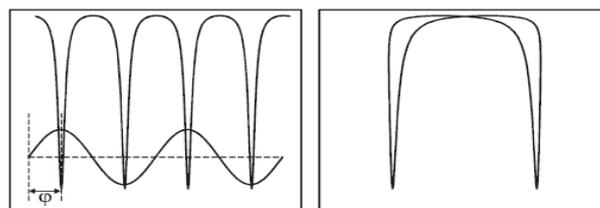
مغناطیسی است، بعنوان سیگنال تشدید نشان می‌دهد. اگر میدان هم‌جهت B_0 شرایط تشدید را برآورده کند و اگر جابجایی فاز ϕ میان سیگنال اندازه‌گیری و میدان مغناطیسی مدوله شده جبران شود، سیگنال تشدید متقارن می‌شود.



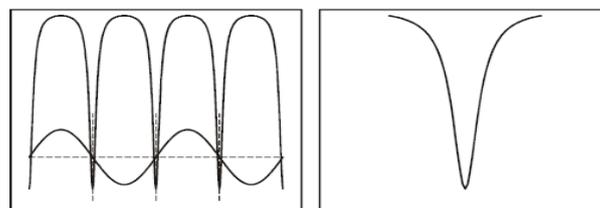
2a



2b



2c



2d

شکل ۲: اسیلوسکوپ سیگنال اندازه‌گیری (γ یا I به ترتیب) و میدان مغناطیسی مدوله شده (X یا II به ترتیب) را نشان می‌دهد.

شکل ۲a: جابجایی فاز جبران نشده است. میدان هم‌جهت B_0 خیلی ضعیف است.

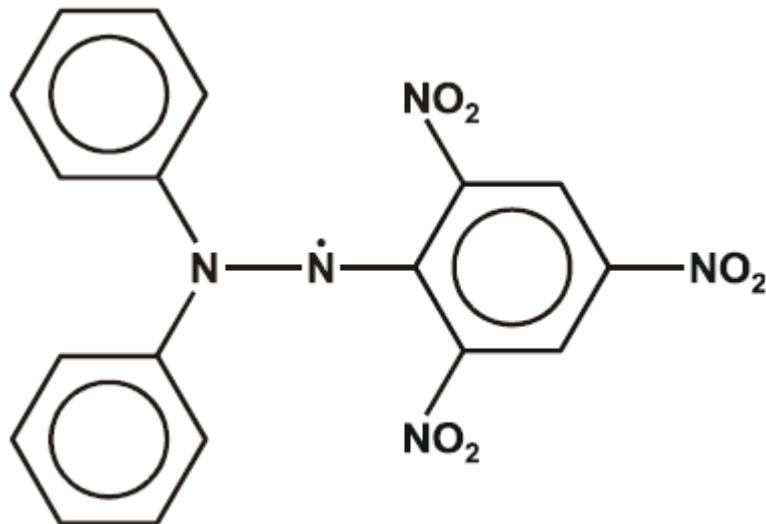
شکل ۲b: جابجایی فاز ϕ جبران شده است. میدان هم‌جهت B_0 خیلی ضعیف است.

شکل ۲c: جابجایی فاز ϕ جبران نشده است. میدان متناوب اعمال شده به طور تقریبی هم‌جهت با میدان B_0 است.

شکل ۲d: جابجایی فاز ϕ جبران شده است. میدان اعمال شده به طور تقریبی هم‌جهت با میدان B_0 است.

نمونه مورد استفاده 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl (DPPH). این ترکیب آلی به طور نسی یک رادیکال آزاد پایدار است که در آن یک الکترون جفت نشده در یکی از اتم‌های نیتروژن پیوند دهنده وجود دارد. تکانه زاویه‌ای مداری الکترون به خاطر ساختار مولکولی تقریباً ناچیز است بنابراین عامل لاند g الکترون تقریباً برابر با

عامل لانده g الکترون آزاد است. در حالت پلی کریستالین ماده به خوبی برای تشخیص تشدید اسپین الکترونی به طور مناسبی به کار گرفته شده است زیرا یک قله حساس ESR وجود دارد که به علت برهمکنش اندک با میدان مغناطیسی یک پهنای کوچک دارد.

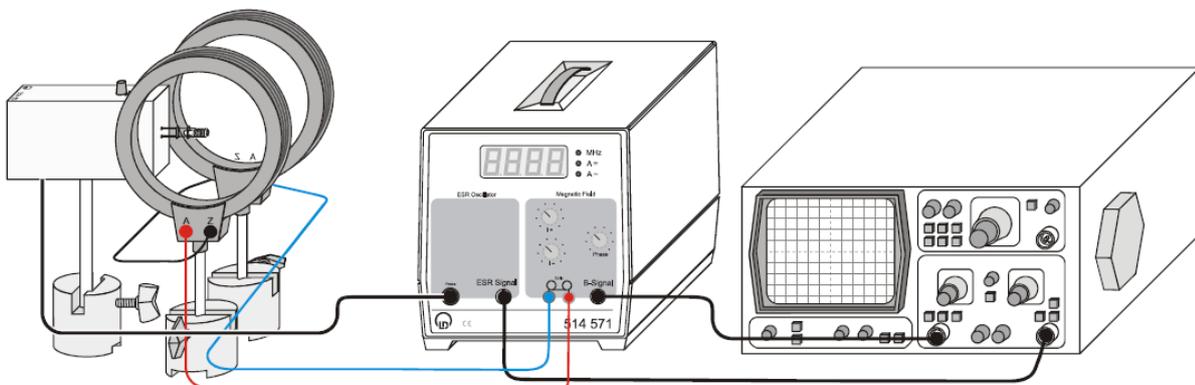


شکل ۳: ساختار شیمیایی (DPPH) 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl

وسایل مورد نیاز:

- ۵) کابل‌های روکش دار، BNC با سوکت 4mm
 572 24.....
 ۶) منبع تغذیه: واحد کنترل ESR
 514 57.....

- ۱) واحد پایه ESR..... 514 55
 ۲) پیچه‌های هلمهولتز..... 555 06
 ۳) پایه زمینی..... 300 11
 ۴) اسیلوسکوپ، ۲ کاناله..... 300 11



شکل ۴: اجزای اصلی دستگاه Electron Spin Resonance را نشان می‌دهد، در حالی که نمونه مورد بررسی در یک پیچه HF قرار می‌گیرد به آن یک میدان مغناطیسی B اعمال می‌گردد

چیدمان آزمایش:

آزمایش در شکل های ۴ و ۵ توضیح داده می شود.

- ۱- فاصله ی پیچه های هلمهولتز را $6/8$ سانتی متر قرار دهید و آنها را با هم تنظیم کنید.
- ۲- پیچه هلمهولتز را از نظر الکتریکی در حالت سری به واحد کنترل ببندید.
- ۳- واحد پایه ESR را به واحد کنترل ESR ببندید.
- ۴- سیگنال ESR خروجی از واحد کنترل را به کانال II (محور Y) از اسیلوسکوپ دو کاناله و سیگنال خروجی B به کانال I (محور X) .
تعیین میدان مغناطیسی شدید:
- ۱- پیچه پر دور ۱۵ تا ۳۰ مگاهرتز را انتخاب کنید و نمونه DPPH در آن قرار دهید:
- ۲- واحد پایه را روشن کنید و آن را چنان تنظیم کنید تا اینکه پیچه و نمونه DPPH در مرکز پیچه های هلمهولتز قرار گیرند.
- ۳- فرکانس شدید را بر روی ۱۵ مگاهرتز تنظیم کنید.
- ۴- دامنه مدولاسیون را تا میانه تنظیم کنید.
- ۵- اسیلوسکوپ را به صورت زیر تنظیم کنید:
الف) کلید دو گانه (DUAL) روشن باشد.
ب) پیچ زمان را بروی (2ms/cm) تنظیم کنید.
ج) پیچ دامنه ولتاژ دو کانال را بر روی (0.5 v/cm) تنظیم کنید.
- ۵- جریان پیچه های هلمهولتز را به آهستگی افزایش دهید تا سیگنال شدید به گونه ای هم فاصله جدا شود (شکل ۳). در بسامد ۱۵ مگاهرتز جریان به طور تقریبی برابر $13/0$ آمپر است.
- ۶- اسیلوسکوپ را به وضعیت X-Y ببرید و جابجایی فاز را به گونه ای تنظیم کنید تا دوسیگنال شدید برهم منطبق شوند.
- ۷- جریان مستقیم را تغییر دهید تا سیگنال شدید متقارن شود. یک جریان مدوله شده تا حد امکان کوچک انتخاب کنید.
- ۸- جریان مستقیم پیچه های هلمهولتز را بخوانید و با تغییر بسامد ν ، همراه با جریان جدول یک را پر کنید.
- ۹- بسامد شدید را تا ۵ مگاهرتز افزایش دهید. و شرط شدید جدید را با افزایش جریان مستقیم ایجاد کنید.
- ۱۰- دوباره جریان را اندازه بگیرید و یادداشت کنید.
- ۱۱- با افزایش بسامد با گام های ۵ مگاهرتزی این کار را تکرار و برای بسامدهای بالاتر پیچه های مناسب را به کار گیرید.

تعیین نیم پهنای δB

۱- اسیلوسکوپ را به وضعیت $X-Y$ ببرید و دامنه‌ی کانال II را بر روی $v/cm \cdot 0.5$ تنظیم کنید.

۲- بار دیگر شرایط تشدید را برای بسامد $v = 50MHz$ ایجاد کنید (پیچه متوسط).

۳- با تغییر جریان متناوب سیگنال تشدید را بر روی صفحه اسیلوسکوپ در جهت X به گونه‌ای تنظیم کنید که پهنای کل صفحه (۱۰ سانتیمتر) را بگیرد.

محاسبات:

جدول زیر را کامل کنید.

$v(MHz)$	$I(A)$	پیچه
۱۵		بزرگ
۲۰		بزرگ
۲۵		بزرگ
۳۰		بزرگ
۳۵		متوسط
۴۰		متوسط
۴۵		متوسط
۵۰		متوسط
۵۵		متوسط
۶۰		متوسط
۶۵		متوسط
۷۰		متوسط
۷۵		متوسط
۸۰		متوسط
۸۵		کوچک
۹۰		کوچک
۹۵		کوچک
۱۰۰		کوچک
۱۰۵		کوچک
۱۱۰		کوچک
۱۱۵		کوچک
۱۲۰		کوچک

۱۲۵		کوچک
۱۳۰		کوچک

تعیین نیم پهنای δB_0 :

نیم پهنای از روی اسپلوسکوپ خوانده شود. ۱/۵ سانتی متر مربوط است به:

$$\delta U = 1.5 \text{ cm} \cdot 0.2 \frac{\text{V}}{\text{cm}} = 0.3 \text{ V}$$

سنجه بندی ولتاژ مدولاسیون:

$$U = 1.5 \text{ cm} \cdot 0.5 \frac{\text{V}}{\text{cm}} = 5 \text{ V}$$

جریان مدوله شده مربوط به ولتاژ مدولاسیون:

$$I_{mod} = 0.28 \text{ A}$$

دامنه پیک تو پیک: $2\sqrt{2}$

میدان مغناطیسی پیچه‌های هلمهولتز با استفاده از جریان هر پیچه محاسبه می‌شود:

$$B = \mu_0 (4/5)^{3/2} \cdot \frac{n}{r} \cdot I$$

$$B = 4.23 \text{ mT} \cdot \frac{I}{\text{A}}$$

۲: شعاع پیچه ۶/۸ سانتی متر

n: تعداد دور پیچه 320

۱: جریان هر پیچه

تعیین میدان مغناطیسی تشدید:

با استفاده از فرمول فوق میدان مغناطیسی را محاسبه کنید:

ν (MHz)	B_0 (mT)
۱۵	
۲۰	
۲۵	
۳۰	
۳۵	
۴۰	
۴۵	
۵۰	
۵۵	
۶۰	

۶۵	
۷۰	
۷۵	
۸۰	
۸۵	
۹۰	
۹۵	
۱۰۰	
۱۰۵	
۱۱۰	
۱۱۵	
۱۲۰	
۱۲۵	
۱۳۰	

پرسش‌ها:

- ۱- رابطه‌ی \vec{v} را بدست آورید.
- ۲- مقدار عددی g_s را بدست آورید.
- ۳- نمودار λ بر حسب B بدست آورید.
- ۴- نیم پهنای δB_0 را بدست آورید.