

به نام خداوند مهربان



دانشکده‌ی فیزیک

گروه فیزیک

دستور کار آزمایشگاه فیزیک حالت جامد

تهیه کننده و نگارش

دکتر مرتضی مظفری

نیمسال اول ۹۹-۰۰

فهرست

آزمایش شماره‌ی ۱: ابررسانایی ۳
آزمایش شماره‌ی ۲: پاسخ مواد پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس به یک میدان مغناطیس ساکن نایکنواخت ۱۳
آزمایش شماره‌ی ۳: رسم چرخه‌ی پسماند یک هسته‌ی آهنی ۲۰
آزمایش شماره‌ی ۴: اثر هال ۲۷
آزمایش شماره‌ی ۵: ویژگی‌های مکانیکی جامد‌ها: کش‌سانی فلز‌ها ۳۳
آزمایش شماره‌ی ۶: ویژگی‌های مکانیکی مواد؛ تنش فشار و استحکام شکست ۴۰
آزمایش شماره‌ی ۷: ویژگی‌های نیم‌رساناه‌ها: بررسی وابستگی دمایی مقاومت یک نیم‌رسانا و مقایسه‌ی آن با یک وابستگی دمایی مقاومت یک فلز ۴۵
آزمایش شماره‌ی ۸: فیزیک نیم‌رساناه‌ها: بررسی وابستگی منحنی جریان-ولتاژ (V-I) یک فوتومقاومت به شدت موج ۵۱
آزمایش شماره‌ی ۹: بررسی پدیده‌های لومینسانسی Luminescence Phenomena ۵۹
آزمایش شماره‌ی ۱۰: بررسی گذاره‌ای فاز با میکروسکوپ نوری ۶۳
آزمایش شماره‌ی ۱۱: بررسی اثر چرخش فارادی ۷۲

آزمایش شماره‌ی ۱

ابرسانایی

زمینه‌ی نظری آزمایش:

ابرسانایی پدیده‌ای است که در دماهای پایین در برخی از مواد رخ می‌دهد. در حالت ابررسانایی 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 ابررسانا با یک رسانای کامل است. زیرا در یک رسانای کامل در دمای صفر خطوط القایی مغناطیسی می‌تواند به درون آن راه یابد.

در مواد ابررسانا، پدیده‌ی ابررسانایی زمانی پدیدار می‌شود که دمای ماده، T_c کم‌تر شود. دمای بحرانی بستگی به جنس ماده دارد و از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر تغییر می‌کند. دمای بحرانی عناصری که ابررسانا می‌شوند، کوچک‌تر از 20°C کلوین است. اما ترکیب‌های دیگری وجود دارند که می‌توانند دمای بحرانی ای به بزرگی 160°C کلوین داشته باشند. برای نمونه ترکیب $(\text{La} \cdot \text{Ba})_2\text{CuO}_4$ ابررسانایی با دمای بحرانی 30°C کلوین است که برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ مولر و بدنورز کشف کردند. به این ابررساناهای، ابررساناهای دما بالا (HTSC) می‌گویند. همچنین ابررساناهای دمای بالای دیگری بر پایه‌ی جیوه کشف شده‌اند که دمای بحرانی آنها نزدیک به 160°C کلوین است. نظریه‌های موجود ابررسانایی نمی‌توانند ابررسانایی دمای بالا را، که با نام ابررساناهای نوع ۲ (Type II) شناخته می‌شوند، توضیح دهنند. در کاربرد ابررساناهای دمای بالا پرکاربردترند، زیرا در دماهایی ابررسانا 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 ابررسانایی دمای بالا همچنان ادامه دارد.

ویژگی ابررساناهای

در حالت ابررسانایی، ابررسانا ویژگی‌های ویژگی‌های پیدا می‌کند. ناپدید شدن مقاومت الکتریکی، دیامغناطیس کامل شدن (اثر مايسنر)، تغییر بزرگ در ویژگی‌های گرمایی و پدیده‌های دیگر از جمله‌ی این ویژگی‌هاست. ابررساناهای می‌توانند جریان را بدون نیاز به هیچ ولتاژی برای زمان‌های طولانی در یک حلقه نگه دارند. این ویژگی در آهن‌رباهای ابررسانایی، مانند آنچه در دستگاه‌های MRI هست، به کار می‌رود. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که یک جریان می‌تواند در پیچه‌های ابررسانایی بی هیچ اتلافی، سال‌ها بماند.

اثر مايسنر

رانده شدن خطوط القای مغناطیسی و شناور شدن یک ابررسانا بر روی یک آهن‌ربا، یا آهن‌ربا بر روی یک ابررسانا، به نام اثر مايسنر شناخته می‌شود. اگر ابررسانا را در یک میدان مغناطیسی بیرونی ضعیف H قرار دهیم، میدان تا عمق کم (λ) در ابررسانا پیشروی می‌کند که عمق نفوذ لندن نامیده می‌شود. پس از این مسافت، میدان به سرعت به صفر میل می‌کند. برای بیشتر ابررساناهای عمق نفوذ لندن نزدیک به 100 nm است. اثر مايسنر را نباید با اثر دیامغناطیس که در برخی از رساناهای 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 بحرانی اش 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 کاربستی بسیار بزرگ باشد، اثر مایسنس از میان می‌رود. همین پدیده ابررساناهای 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 خطوط القای مغناطیسی درونشان وارد نمی‌شود) همزمان وجود دارند. در این‌گونه ابررسانا برای میدان‌های کوچک (کم‌تر از میدان بحرانی اول H_{c1}) خطوط القای مانند ابررساناهای نوع ۱ به طور کامل به ابررسانا راه نمی‌یابد. ولی برای میدان‌های بزرگ‌تر (البته کن‌تر 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 کاربستی 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 کویر و رابرت شریفر) توضیح داده شد و این نظریه به افتخار این سه فیزیکدان نظریه BCS نام‌گرفت.

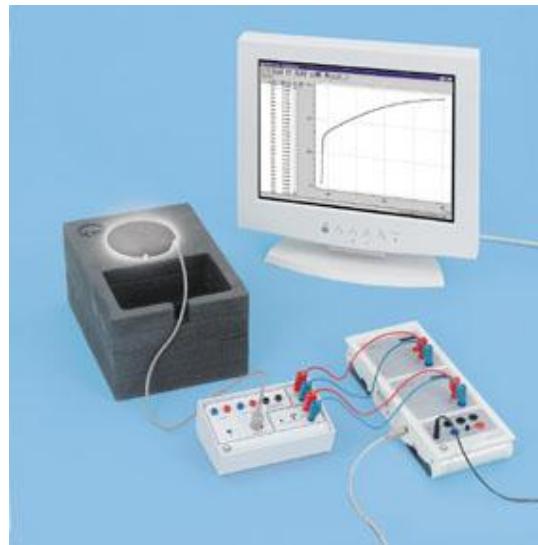
تاریخچه ابررسانایی

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

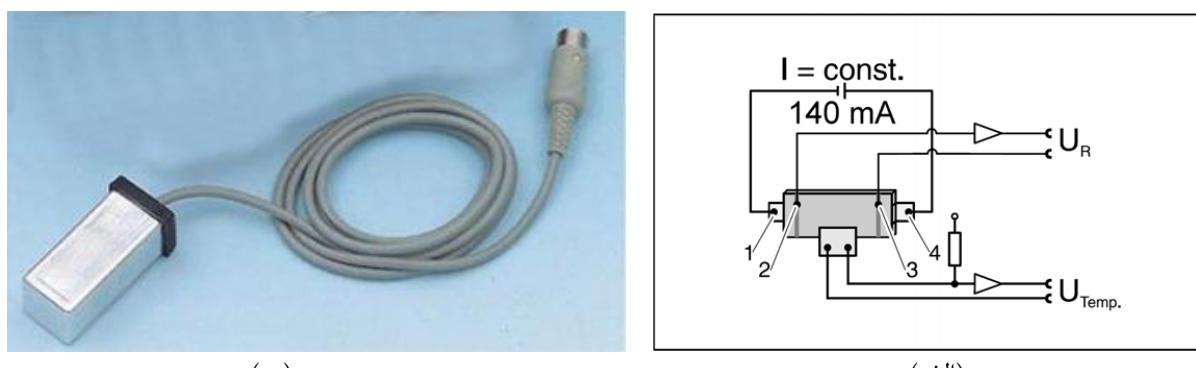
ابزار آزمایش:

در شکل ۱ ابزارها و دستگاه‌های انجام آزمایش دیده می‌شوند.



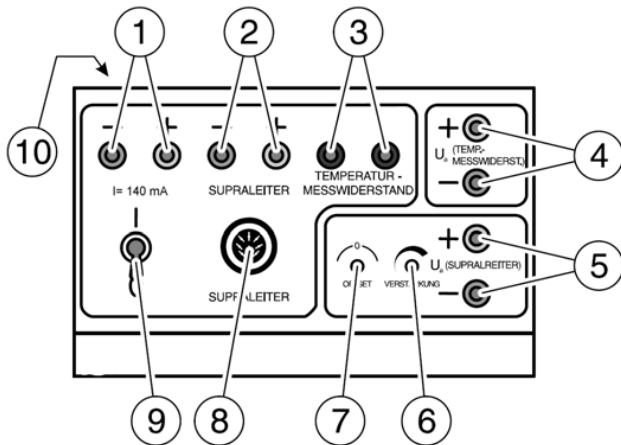
شکل ۱: ابزارها و دستگاه‌های بررسی مقاومت یک ابررسانا در دماهای بالاتر از دمای نیتروژن مایع

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



شکل ۲: (الف) عکس نمونه‌ی ابررسانایی، (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 ابررسانای به کار رفته $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ است که به آن ابررسانای YBCO یا ابررسانای 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: آدپتور ۱- منبع جریان ۱۴۰ میلی آمپری، ۲- ورودی اندازه گیری ولتاژ، ۳- ورودی دما سنج، ۴- خروجی اندازه گیری دما، ۵- خروجی اندازه گیری ولتاژ (U_a)، ۶- عامل بهره، ۷- تنظیم صفر (offset)، ۸- ورودی فیش DIN، ۹- کلید روشن و خاموش آدپتور و ۱۰- سوکت اتصال به منبع تغذیه (پشت دستگاه)

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

۳- مدل CASSY

این دستگاه، شکل ۴، ولتاژهای آنالوگ اندازه گیری شده از دو سر نمونه و دو سر مقاومت گرمایی را به سیگنال‌های 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.

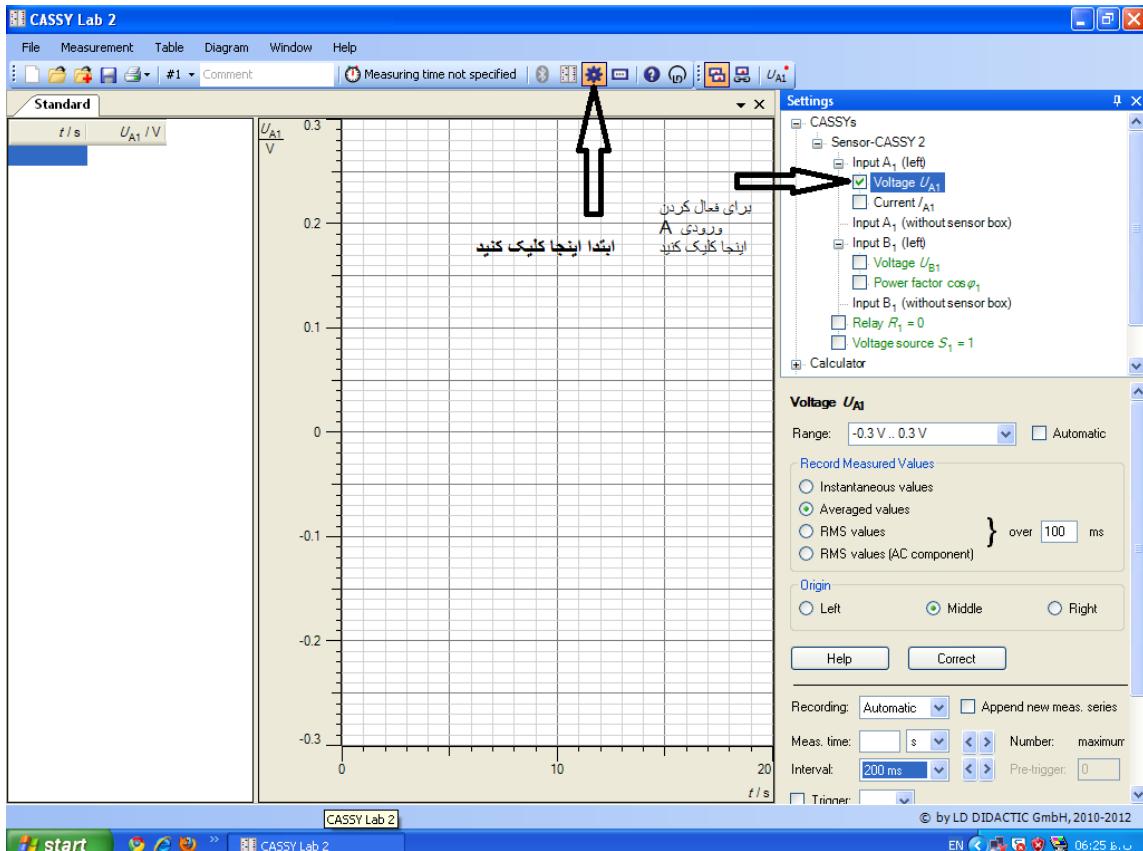


شکل ۴: مدل CASSY

آزمایش اول:

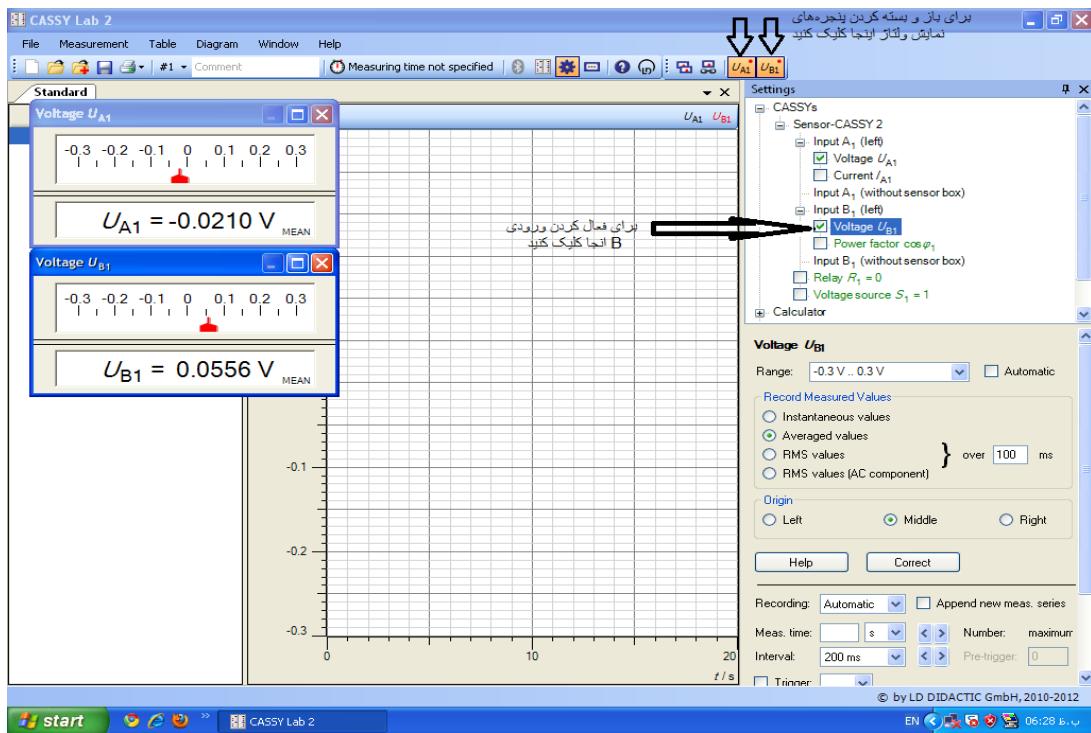
- ۱- فیش DIN نمونه را به آدپتور وصل کنید.
- ۲- مدل CASSY را به کامپیوتر وصل کنید.
- ۳- ولتاژ خروجی مقاومت گرمایی را از آدپتور (سوکت ۴) به ورودی A مدل CASSY و خروجی ولتاژ ابررسانا (سوکت ۵) را به ورودی B مدل CASSY وصل کنید.
- ۴- نمونه را درون ظرف پلاستیکی پلی اورتان قرار دهید. سپس با فلاسک و با احتیاط مقداری نیتروژن مایع درون آن بریزید به گونه‌ای که نمونه را به طور کامل در بر بگیرد. صبر کنید تا نمونه با نیتروژن مایع هم شود.

۵- کامپیوتر را روشن و برنامه‌ی CASSYLab را اجرا کنید. بر روی صفحه‌ی اصلی بر روی گزینه‌ی تنظیمات (Settings) 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.

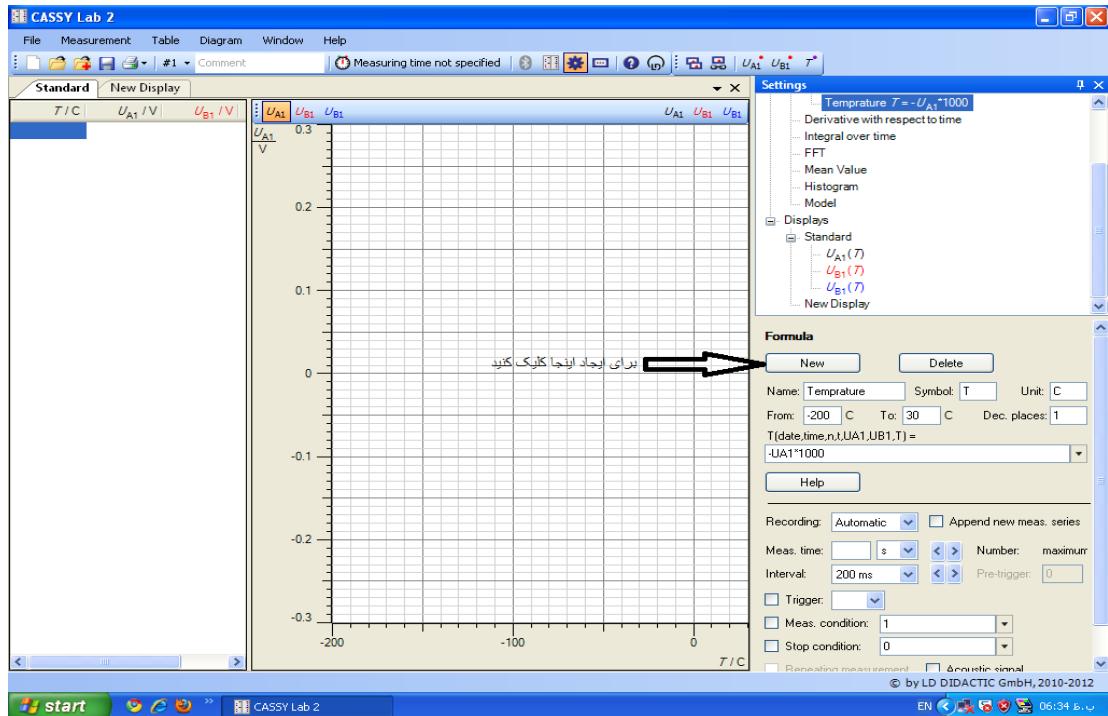


شکل ۵

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 "UA1*1000"- را وارد کرده و بازه‌ی تغییرات آن را از ۰ تا ۳۰ درجه‌ی سانتی گراد تنظیم کنید.

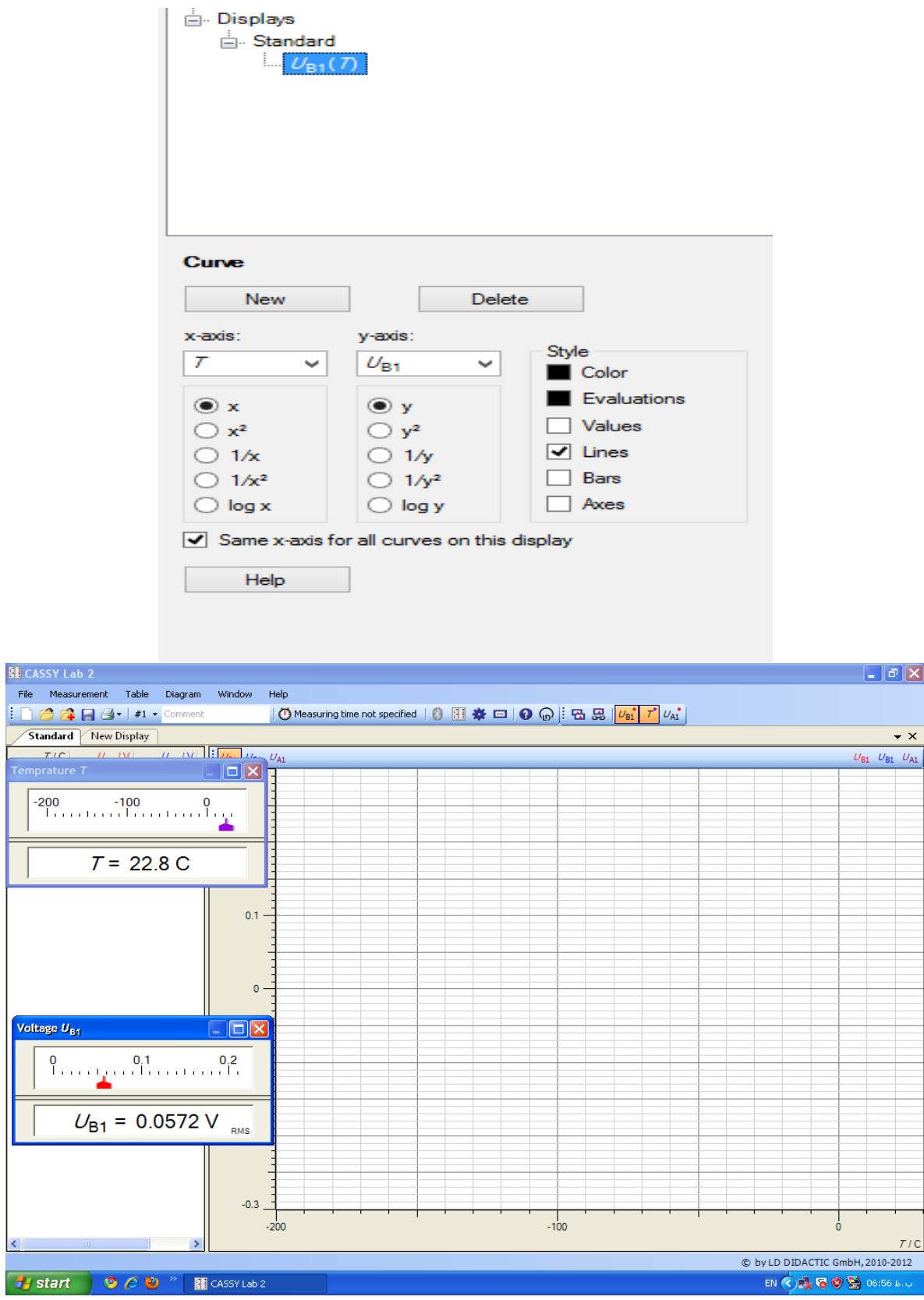


شکل ۶



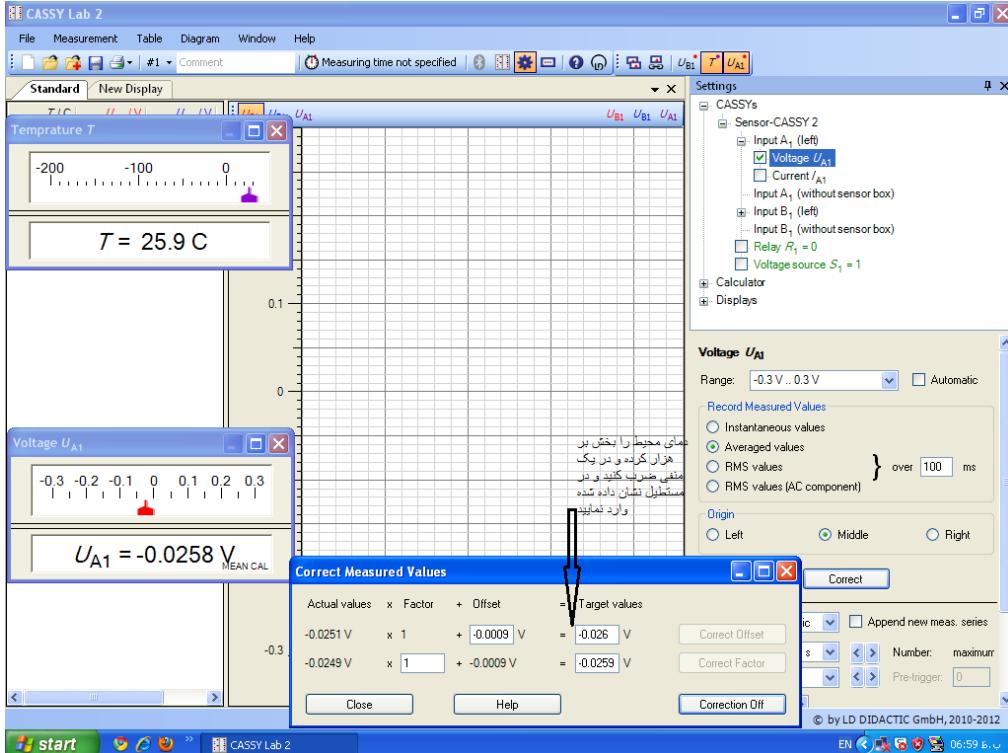
شکل ۷

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



شكل ٨

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

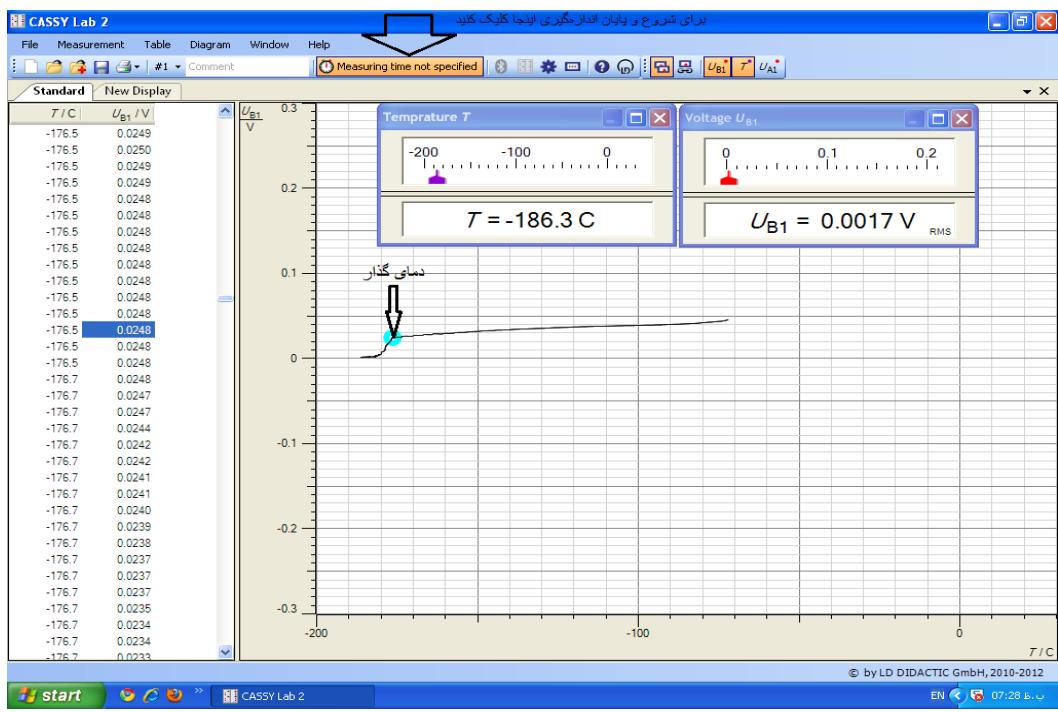


شکل ۹

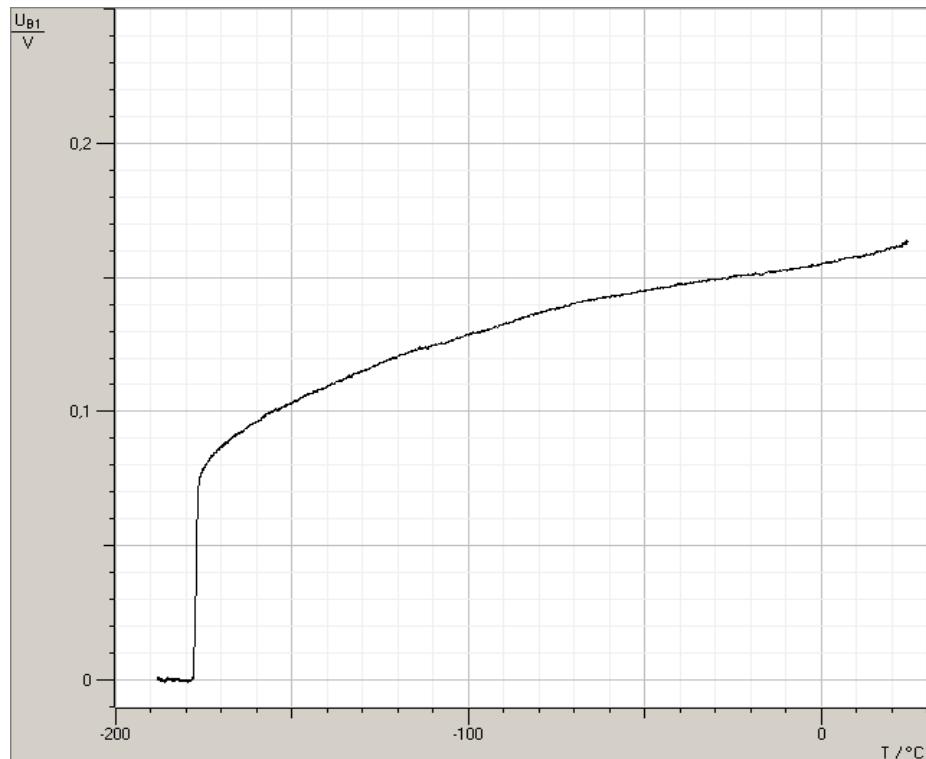
۹- برای شروع اندازه گیری بر روی گزینه "Measuring time not specified" کلیک کنید.

نتیجه های آزمایش

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



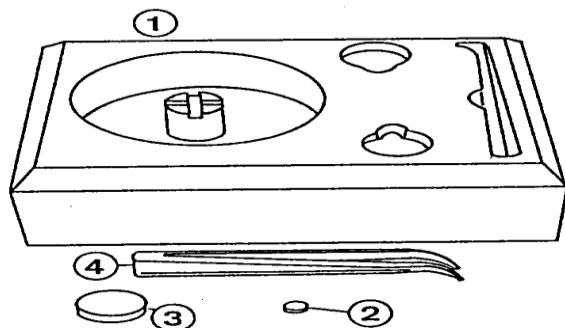
شکل ۱۰



شکل ۱۱: نمودار ولتاژ-دما. دمای گذار تقریباً -177 درجه سلسیوس است.

آزمایش ۲: دیدن اثر مایسنر

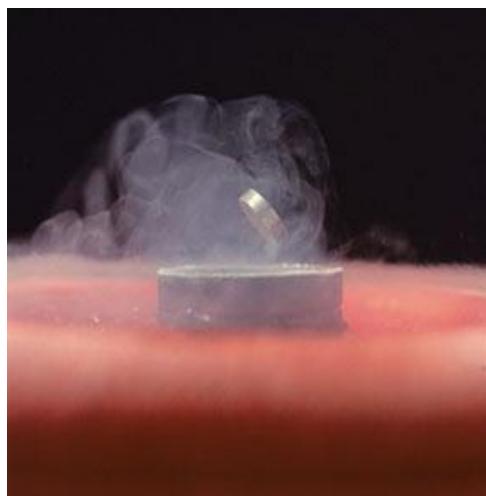
شکل زیر ابزارهای انجام آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: ابزارهای انجام آزمایش: ۱- ظرف نیتروژن مایع ۲- آهنربا به قطر ۸mm ۳- قرص ابررسانا به قطر ۲۶mm و ۴- انبرک پلاستیکی به طول ۱۴۵mm

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

نخست ابررسانا را در جای ویژه‌ی خود قرار دهید و به اندازه‌ی نیتروژن مایع درون ظرف بپریزید که پیرامون ابررسانا را بگیرد. پس از سرد شدن ابررسانا نمونه‌ی آهنربا را در بالای ابررسانا قرار داده و رها کنید.



شکل ۱۳: اثر مایسner

پرسش‌ها

- ۱- عامل اصلی پدیده‌ی ابررسانایی در برخی از مواد چیست؟
- ۲- تفاوت یک ابررسانا با ماده‌ای با مقاومت صفر چیست؟
- ۳- مقاومت گرمایی به کار گرفته شده در آزمایش اول چه ویژگی ویژه‌ای می‌باشد؟

آزمایش شماره‌ی 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 فرمغناطیس‌ها

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 جریان دار 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 کوانتمی، وجود تک قطبی مغناطیسی را پیش‌بینی کرده‌اند، اما هنوز در طبیعت تک قطبی 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 ($\mu = md$) تعریف می‌شود که در آن m قدر مطلق قدرت قطب مغناطیسی (همارز با q) و d فاصله میان آن‌هاست. گشتاور دوقطبی مغناطیسی همانند d ، یک بردار است که سوگیری آن‌ها (بردارهای d و μ) از قطب منفی به مثبت است.

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

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

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

القای مغناطیسی: معمولاً به جای شدت میدان مغناطیسی 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 مل 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 جفت نشده داشته یا نداشته باشند به ترتیب پارامغناطیس یا دیامغناطیس اند. برای نمونه اتم لیتیوم با آرایش الکترونی ($\text{Li}: 1s^2 2s^1$) یک الکترون جفت نشده در لایه‌ی $2s$ دارد پس یک اتم پارامغناطیس است. در حالی که یون آن با آرایش الکترونی ($\text{Li}^+: 1s^2$) الکترون جفت نشده ندارد، پس دیامغناطیس است. بدین ترتیب چیزی به نام اتم، یون یا مولکول فرومغناطیس، پادفرومغناطیس یا فرمغناطیس بی‌معنا است. هر الکترون یک گشتاور دوقطبی مغناطیسی دارد که اندازه‌ی آن یک مگنتون بوهر ($J/T = 9/27 \times 10^{-21} \mu_B$) است. پس اتم آهن با آرایش الکترونی (Fe^{3+}) سه الکترون تکی (جفت نشده) و 3d^5 گشتاور دوقطبی مغناطیسی دارد. در حالی که یون آهن با آرایش الکترونی (Fe^{3+}) پنج الکترون تکی (جفت نشده) و 3d^5 گشتاور دوقطبی مغناطیسی دارد.

دسته‌بندی مواد از دیدگاه ویژگی‌های مغناطیسی

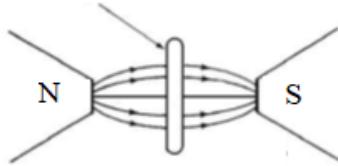
مواد از دیدگاه ویژگی‌های مغناطیسی دست کم به پنج دسته‌ی دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فرمغناطیس دسته‌بندی می‌شوند، که به دنبال برخی از ویژگی‌های آن‌ها را بررسی می‌کنیم. این ویژگی‌ها، ویژگی‌های گروهی است و به سامانه‌های بس‌ذره‌ای مربوط می‌شود. مواد از اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌ها ساخته شده‌اند و این اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌ها یا دیامغناطیس یا پارامغناطیس اند 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 باننظم (شامل فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فرمغناطیس) میان گشتاورهای مغناطیسی برهمنشی به نام "**برهم‌کنش تبادلی**" وجود دارد که باعث می‌شود هر ماده باننظم 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 باننظم به بی‌نظم می‌شود که به آن دمای کوری (T_C) می‌گویند. در یک ماده باننظم 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 محركه‌ی القابی در تکانه‌ی مداری 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.

Diamagnetic rod



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

برخی از ویژگی‌های مواد دیامغناطیسی:

- ۱- پذیرفتاری مغناطیسی ($\chi = M/H$) این مواد منفی و کوچک است (در دستگاه SI از مرتبه 10^{-5}) است (جدول ۱)، به جز برای ابرساناها 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 ملا است در یک میدان مغناطیسی قرار گیرد دو قطبی‌های مغناطیسی اتم‌ها می‌کوشند با میدان مغناطیسی کاربستی هم‌سو شوند و بدین ترتیب یک مغناطش ناصرف (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، هم‌سویی 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 پارامغناطیسی:

- ۱- پذیرفتاری مغناطیسی این مواد مثبت و کوچک از مرتبه 10^{-4} است.
- ۲- در دماهای نه‌چندان پایین و میدان‌های نه‌چندان بزرگ، به گونه‌ای که نسبت H/T به نهایت نشود پذیرفتاری این مواد تابع دماسی 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 هم‌سویی کامل همه‌ی دو قطبی‌ها در حجم V نمونه است،

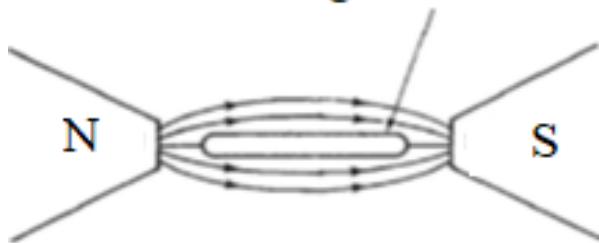
می‌گراید. به سخن دیگر مغناطش نمونه اشباع می‌شود.

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 بسیار بزرگ و دماهای پایین (پیرامون کلوین یا زیر کلوین) است. به طور 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 به دست می‌آید:

$$T = \mu \times H \sin \theta \quad \text{یا} \quad \tau = \mu H \sin \theta \quad (1)$$

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. اگریک میله پارامغناطیس در یک میدان مغناطیسی نایکنواخت قرار گیرد، به آرامی می‌چرخد، چنان‌که در راستای اصلی میدان قرار گیرد.

Paramagnetic rod



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

جدول ۱:

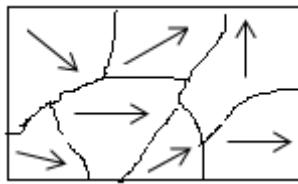
Room-temperature magnetic susceptibility
for diamagnetic

Room-temperature magnetic susceptibility
for paramagnetic

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}

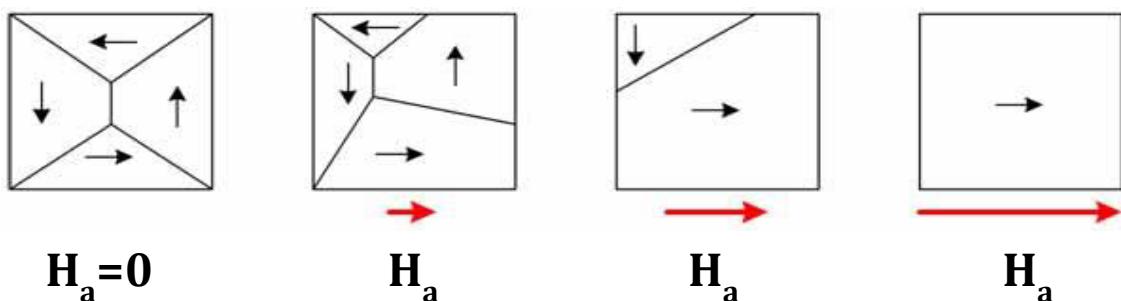
Material	Susceptibility χ_m (volum)SI unit
Aluminum	2.07×10^{-5}
Chromium	3.13×10^{-4}
Chromiumchloride	1.51×10^{-3}
Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Molybdenum	1.19×10^{-4}
Sodium	8.48×10^{-6}
Titanium	1.81×10^{-4}
Zirconium	1.09×10^{-4}

مواد فرومغناطیس: این مواد نیز دست‌کم یک اتم، یون یا مولکول پارامغناطیس دارند. اما در این مواد "برهمکنش تبادلی" 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 گشتاورهای مغناطیسی در یک نمونه‌ی فرومغناطیسی. جهت گشتاورها در هر حوزه با یک پیکان نمایش داده شده است.

هنگامی که این ماده در یک میدان مغناطیسی بیرونی قرار می‌گیرد، مغناطیسیده شده و معمولاً مغناطش آن بزرگ است. فرآیند مغناطش شامل حرکت دیواره (بازگشت پذیر و بزگشت‌ناپذیر) و در میدان‌های بزرگ‌تر چرخش حوزه است. با کاربست 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، گشتاورهای حوزه‌ها به سوی میدان چرخیده و کل نمونه به یک حوزه تبدیل می‌شود شکل ۵. آهن، کبالت، نیکل و گادولونیوم در جدول دوره‌ای عناصرها، فرومغناطیسی‌اند.



شکل ۵: نگاره‌ی چگونگی تغییر ساختار حوزه‌ای یک ماده‌ی فرمغناطیسی با کاربست یک میدان افقی به‌سوی راست.

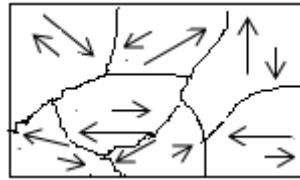
پادفرومغناطیس: این مواد نیز دست کم یک اتم، یون یا مولکول پارامغناطیس دارند. همانند فرمغناطیس‌ها به بخش‌های کوچکی بخش‌بندی می‌شود (حوزه‌های مغناطیسی) با این تفاوت که در هر بخش گشتاورهای مغناطیسی با هم دیگر پادموازی‌اند و یگدیگر را ختشی می‌کنند. در نتیجه در یک ساختار منظم پادفرومغناطیس مغناطش کل نمونه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



شکل ۶: نگاره‌ای از توزیع گشتاورهای مغناطیسی در یک نمونه‌ی پادفرومغناطیسی. جهت گشتاورها در هر حوزه با یک جفت پیکان نمایش داده شده است.

فری‌مغناطیس: 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 گشتاورهای مغناطیسی با هم دیگر نابرابراند و گشتاور یکدیگر را همانند پادفرومغناطیس‌ها ختشی نمی‌کنند پس هر حوزه یک

گشتاور مغناطیسی برآیند خنثا نشده دارد. در یک فریمغناطیس "میدان فدیده"، جهت این حوزه‌ها کاتوره‌ای توزیع شده و مغناطش کل نمونه صفر است.



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

برخی از ویژگی‌های مواد فرومغناطیس:

- ۱- پذیرفشاری فرمغناطیس‌ها مثبت و بسیار بزرگ است ($\chi > 1$). آهن بسیار بسیار خالص می‌تواند پذیرفشاری 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 فرمغناطیس‌ها 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 ماهی گیری)

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

۹- مقداری نیتروژن مایع و تشک ویژه نگهداری آن

توجه: نمونه‌های دیگری را می‌توان با توجه به پذیرفشاری 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 میله‌ی افقی
- ۶- قلاب L 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 بیندید 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 بیندید که نخ دقیقا در میانه 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.

۴- آمپر سنج را روشن کرده و دامنه‌ی ۲۰ آمپری را برگزینید.

۵- با چرخاندن پیچ تنظیم ولتاژ جریان پیچه‌ها را افزایش دهید. و با دقت بینید که نمونه در چه جهتی می‌چرخد.

توجه: برای نمونه‌ی دیا مغناطیس (ابررسانا) 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 هم‌دما 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.



شکل ۸

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 ابررسانایی که در آن قرار گرفته بپرهیزید.

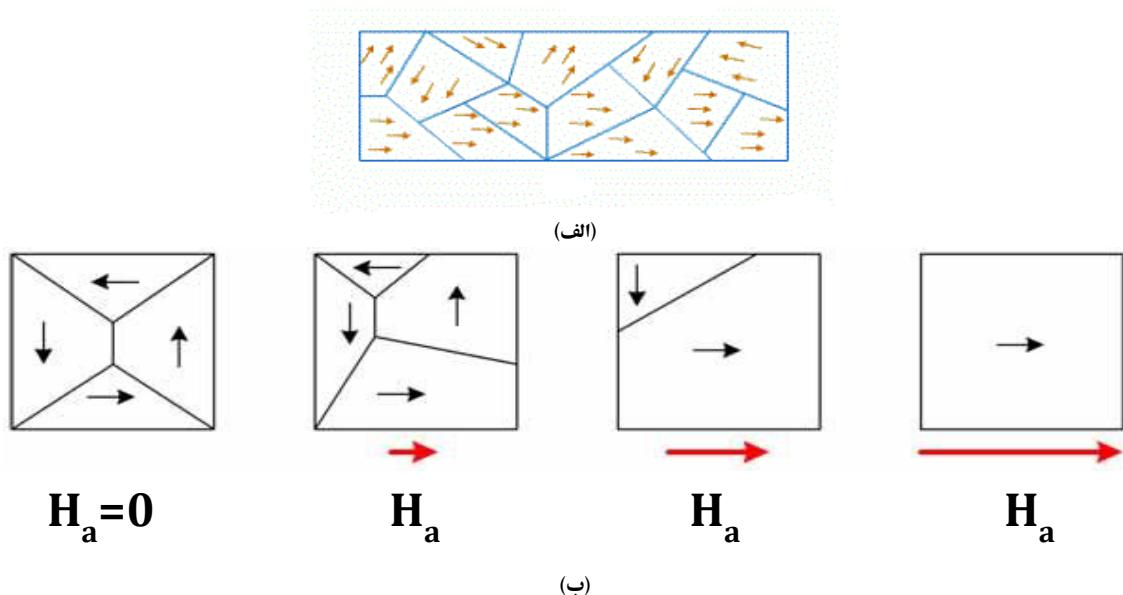
آزمایش شماره ۳

رسم چرخه پسماند یک هسته‌ی آهنی (فرومغناطیس)

زمینه‌ی نظری آزمایش

الف- حوزه‌های مغناطیسی

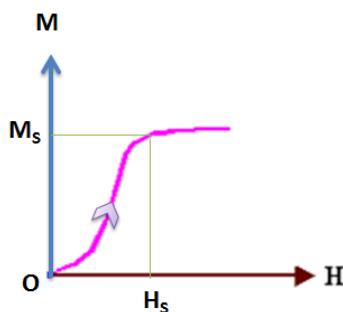
مواد بر پایه‌ی چگونگی پاسخ‌شان به یک میدان مغناطیسی کاربستی به پنج دسته‌ی دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فرمغناطیس دسته‌بندی می‌شوند. فرمغناطیس‌ها دسته‌ای از مواد مغناطیسی هستند که از شمار بسیاری حوزه‌ی مغناطیسی تشکیل شده‌اند (شکل ۱-الف). یک حوزه‌ی مغناطیسی ناحیه‌ای از ماده است 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 ماده 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 می‌ایستد 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).



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 فراینده.

ب- سازو کار مغناطش

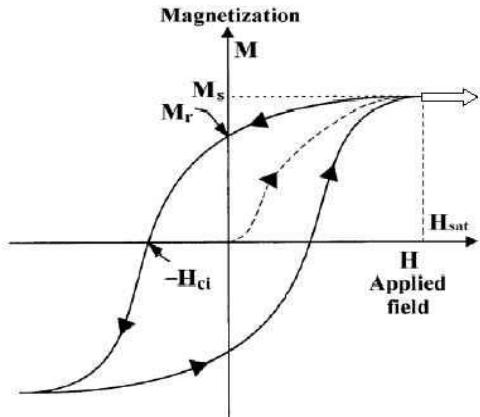
یک ماده‌ی نامغناطیده (میدان ندیده) در نبود یک میدان بیرونی را در نظر بگیرید. در این صورت برآیند گشتاورهای مغناطیسی نمونه صفر است (شکل ۲- نقطه‌ی ۰). با کاربست یک میدان مغناطیسی بیرونی، مغناطش افزایش می‌یابد و با افزایش میدان تا مقدار H_s ، مغناطش نمونه اشباع می‌شود (M_s). این بخش از منحنی را "منحنی مغناطش" 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 "هیسترزیس" 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 ($H < -H_c$) 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 هیسترزیس یا چرخه‌ی اصلی پسماند نامیده می‌شود و معمولاً نسبت به مبدأ متقارن است. برای یک ماده‌ی فرومغناطیس رابطه‌ی میان \mathbf{M} و \mathbf{B} به صورت $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ است.



شکل ۲: منحنی مغناطش یک ماده‌ی فرمغناطیس یا فرمغناطیس



شکل ۳: منحنی وامغناطش

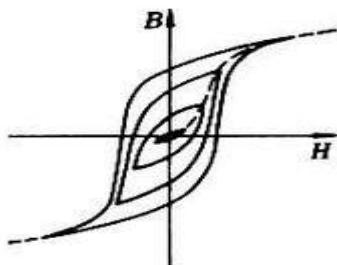


شکل ۴: چرخه‌ی پسماند

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:

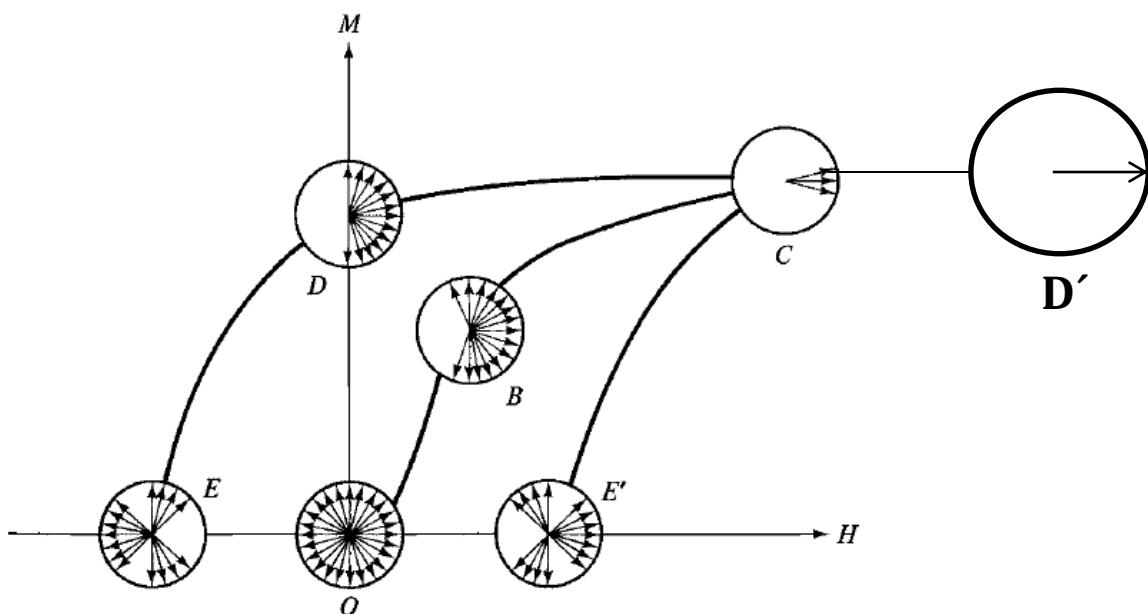
افزون بر حلقه‌ی اصلی، حلقه‌های فرعی نیز می‌توانند وجود داشته باشند. این حلقه‌ها هنگامی به وجود می‌آیند که میدان کاربستی را پیش از به اشباع رسیدن ماده، کاهش دهیم. حلقه‌های فرعی از حلقه اصلی کوچک‌تر و بی‌شمارند (شکل ۵)، در حالی که حلقه‌ی اصلی یکتاست.



شکل ۵: چرخه‌های فرعی و اصلی پسماند

ت-چگونگی توزیع گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به هنگام مغناطش و وامغناطش:
یک ماده با ناهمسانگردی تک محوری (مانند کبات) 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 به طور کاتورهای جهت‌گیری کرده و برآیندشان صفر است. با یک مدل دو بعدی می‌توان چه گونگی 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 مغناطیش اشباع می‌تواند متأثر از عوامل گوناگونی باشد که یکی از این عوامل دماس است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با کاهش دما مغناطیش افزایش می‌یابد که به علت کم شدن بی‌نظمی‌های افت و خیزهای گرمایی است. رابطه‌ی زیر که به قانون $T^{3/2}$ واکس معروف است، ارتباط میان مغناطیش و دما را برای یک ماده‌ی فرومغناطیس نشان می‌دهد. $M(T) = M(0) (1 - A_{exp} T^{3/2})$ به دست می‌آید:

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

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

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

انجام آزمایش:

الف: رسم چرخه 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 1 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 انتگرال‌گیری 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 کanal ۲ نوسان نما وصل می‌کنیم. بر روی نوسان نما بهره‌ی تقویت کننده‌های افقی و عمودی را تغییر می‌دهیم تا چرخه‌ی پسمند 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 جایه‌جا نشود هسته به اشباع رسیده است و دیگر لازم نیست که ولتاژ را افزایش دهیم. در اینجا چند نقطه از منحنی، به‌ویژه نقاطی که منحنی پسمند محورهای عمودی و افقی را قطع کرده است، برگزیده و مشخصات آنها را از روی نوسان نما یادداشت می‌کنیم. هم چنین 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 پسمند بروی 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 $B=V_2 RC/N_2 A$ به ازای ولتاژ‌های گوناگون حساب می‌کنیم و سرانجام منحنی B بر حسب H را رسم می‌کنیم.

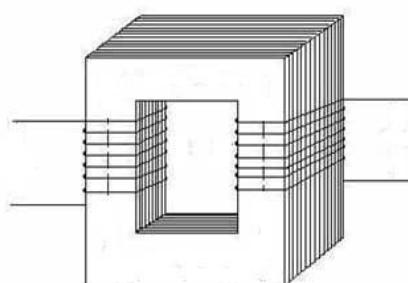
$$N_1=100, N_2=200,$$

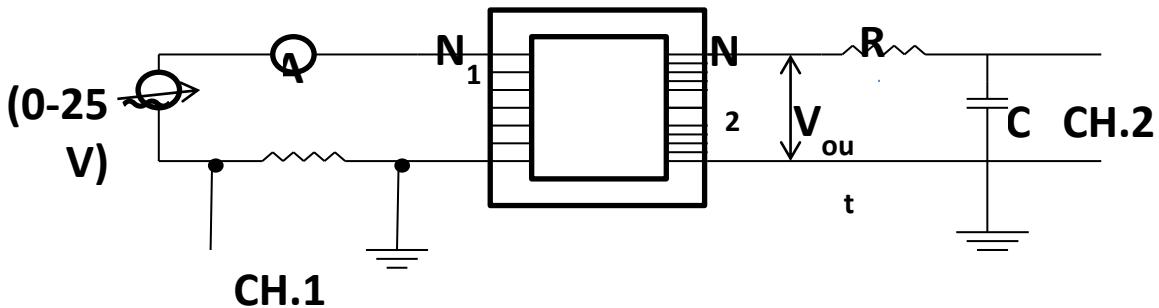
$$l=14.6 \text{ cm}$$

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

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

(شکل ۷)





شکل ۸

ب: رسم چرخه فرعی

برای رسم حلقه های داخلی، ولتاژ ورودی را کاهش می دهیم که ماده از اشباع بیرون آید و دوباره چندین نقطه بر روی منحنی را برگزیده، H و B را از روابطی که گفته شد به دست آورده و چرخه فرعی را رسم می کنیم.

$B(T)$	$H(A/m)$	V_2	i

محاسبه:

- ۱- بیشینه القای مغناطیسی (B_{max}) را از V_{max} به دست آورید.
- ۲- نیروی واحد ندگی را از i به دست آورید.
- ۳- اتلاف انرژی پسماند در واحد حجم را در یک دوره از روی سطح حلقه پسماند محاسبه کنید.

۴-خطاهای اندازه گیری را به دست آورید.

پرسش‌ها:

۱-تفاوت مواد مغناطیسی نرم و سخت چیست؟

۲-چرا با کاهش دما منحنی هیسترزیس فشرده‌تر می‌شود؟

۳-خطاهای آزمایش را نام برد و راههای کاهش این خطاهای آزمایش را بنویسید.

آزمایش شماره‌ی ۴

بررسی اثر هال در نقره

هدف آزمایش:

۱- بررسی رابطه‌ی میان ولتاژ هال V_H و القای مغناطیسی B

۲- تعیین علامت حامل‌های بار در یک رسانا (نقره)

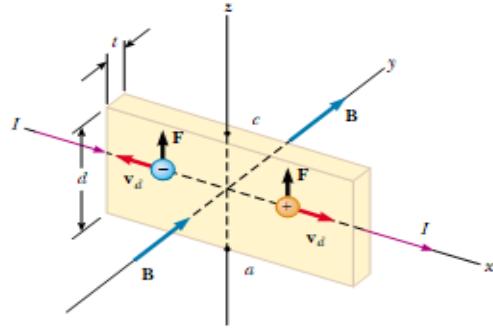
۳- محاسبه‌ی چگالی حامل‌های بار (n)

زمینه‌ی نظری:

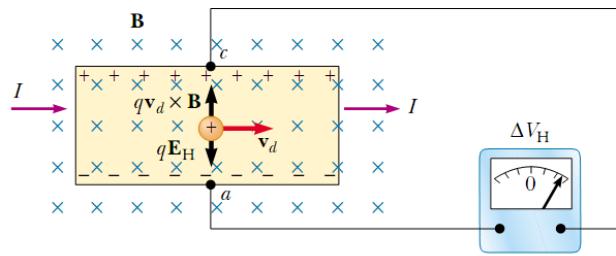
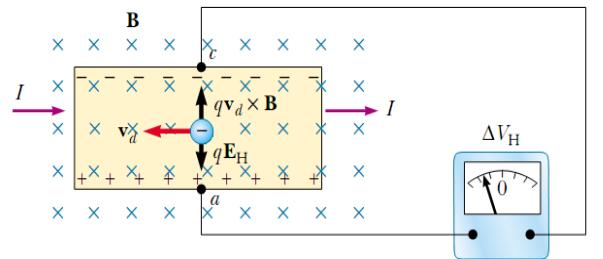
در سال ۱۸۷۹، ادوین هال^۱ آزمایشی انجام داد که تعیین مستقیم علامت و چگالی (تعداد به ازای یکای حجم) حامل‌های بار در یک رسانا را امکان‌پذیر کرد. اثر هال نقشی اساسی در شناخت ما از رسانش الکتریکی در فلزها و نیم‌رساناهای دارد. می‌دانیم که با تعیین جهت نیروی وارد بر یک سیم نازک حامل جریان در یک میدان مغناطیسی، نمی‌توان علامت حامل‌های بار را تعیین کرد. اما **نکته‌ی کلیدی آزمایش هال** به کارگیری یک **تسمه (یا نوار)** فلزی به جای سیم نازک بود.

نواری تخت از فلزی به عرض d را مانند شکل ۱ در نظر بگیرید که حامل جریان I است. جهت جریان همان جهت قراردادی یعنی جهت حرکت بارهای مثبت یا بر خلاف جهت حرکت الکترون‌هاست. میدان مغناطیسی B ، با قرار دادن نوار میان قطب‌های یک آهنربای الکتریکی، عمود بر صفحه‌ی نوار برقرار شده است. نیروی مغناطیسی وارد بر حامل‌های بار الکتریکی (چه مثبت و چه منفی باشند) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، آن‌ها را به سوی بالای نوار می‌راند. افزایش بارهای الکتریکی در یک سوی نوار و کمبود آن‌ها در سوی دیگر، یک میدان الکتریکی E_H در نوار به وجود می‌آورد که میدان هال (E_H) نامیده می‌شود. همارز آن میان دو سر نوار اختلاف پتانسیل $V_H = E_H d$ به وجود می‌آید که به آن اختلاف پتانسیل هال (V_H) می‌گوییم. اختلاف پتانسیل V_H را می‌توان با یک ولت سنج اندازه گرفت. قطبش و اندازه‌ی V_H به ترتیب علامت و چگالی حامل‌های بار الکتریکی را مشخص می‌کند. اگر حامل‌های بار، منفی باشند، بار افزوده‌ی انباسته شده در بالای نوار منفی است و پتانسیل بالای نوار کمتر از پتانسیل پایین آن خواهد شد (شکل ۲-الف). از سوی دیگر اگر حامل‌های بار مثبت باشند، بار افزوده‌ی انباسته شده در بالای نوار مثبت است و پتانسیل بالای نوار بیشتر از پتانسیل پایین آن خواهد شد (شکل ۲-ب). با انباسته شدن بیشتر بارها در بالا، میدان هال بزرگ‌تر شده و با انباستگی بیشتر حامل‌های بار مخالفت می‌کند. سرانجام ترازمندی به وجود می‌آید و نیروی مغناطیسی با نیروی الکتریکی برابر و نیروی لورنتس وارد بر حامل‌های بار صفر می‌شود. پس داریم:

¹Edwin Hall



شکل ۱: نیروی وارد بر حامل‌های بار مثبت یا منفی در یک نوار رسانا یا نیم‌رسانا که در یک میدان مغناطیسی عمود بر یک وجه نوار قرار گرفته است.



(ب)

(الف)

شکل ۲: قطبش الکتریکی (علامت پتانسیل هال) به شرط آن که حامل‌های بار علامت (الف) مثبت و (ب) منفی داشته باشند.

$$q\mathbf{E}_H + q\mathbf{V}_d \times \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_H = -\mathbf{V}_d \times \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

که در آن \mathbf{V}_d سرعت سوچ حامل‌های است که با میدان کاربستی E_x (و جریان I) هم‌راستا و برای بارهای مثبت با آن هم‌سو و برای بارهای منفی با آن ناهم‌سو است. چون \mathbf{V}_d و \mathbf{B} بر هم عمودند، داریم:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V}_d \mathbf{B} \quad (3)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\mathbf{V}_d = j/nq, \quad j = i/A, \quad A = td, \quad \mathbf{E}_H = \mathbf{V}_H/d \quad (4)$$

که در آن \vec{J} چگالی جریان، n چگالی حامل‌های بار، t ضخامت نوار و A سطح مقطع نوار است که از آن جریان می‌گذرد. پس داریم:

$$V_H = Ed, \quad V_d = i/nqA, \quad qE = qV_d B \quad (5)$$

$$V_H = Bi/ntq \quad (6)$$

اولین بار هال با انجام این آزمایش و ۲۰ سال پیش از کشف الکترون نشان داد که بر خلاف تصور آن زمان، حامل‌های بار در یک فلز علامت مثبت ندارند. این آزمایش هم‌اکنون یکی از آزمایش‌های پرکاربرد برای تعیین علامت حامل‌های بار در نیم‌رساناها است. بدین ترتیب با این آزمایش می‌توان گونه‌ی یک نیم‌رسانا (n یا p) را تعیین کرد. در آزمایش هال ضریبی به نام ضریب هال (R_H) تعریف می‌شود که علامت آن تعیین کننده‌ی علامت حامل‌های اکثریتی است. ضریب هال از روابط حرکت الکترون آزاد و الکترونی در یک محیط میرانده با وجود برخوردها به دست می‌آید. تکانه‌ی الکترون آزاد با رابطه‌ی $mv_d = \hbar k$ به بردار موج مربوط می‌شود. در میدان الکتریکی E و میدان مغناطیسی B نیروی F وارد بر الکترون برابر با $(E + V_d \times B) - e$ است. بر پایه‌ی قانون دوم حرکت نیوتون برای الکترون آزادی به جرم m داریم:

$$F = m dv/dt = \hbar dk/dt = -e (E + V_d \times B) \quad (7)$$

معادله‌ی حرکت الکترونی با نیروی اصطکاکی برآمده از برخوردهایی با آهنگ $1/\tau$ ، به صورت زیر است:

$$F = \hbar (d/dt + 1/\tau) \delta k = -e (E + V_d \times B) \quad (8)$$

که در آن جمله‌ی اول سمت چپ به شتاب ذره‌ی آزاد و جمله‌ی دوم به برخوردها (اصطکاک) مربوط می‌شود و τ میانگین زمان برخوردها است. اکنون حرکت الکترون را در یک میدان مغناطیسی یکنواخت B در نظر بگیرید. نیروی لورنتس وارد بر الکترون برابر است با:

$$F = -e (E + V \times B) \quad (9)$$

اگر \mathbf{k} در نتیجه معادله‌ی حرکت به صورت زیر است:

$$m (d/dt + 1/\tau) \delta v = -e (E + V \times B) \quad (10)$$

اگر میدان مغناطیسی در امتداد محور Z باشد، مولفه‌های معادلات حرکت برابر اند با:

$$m (d/dt + 1/\tau) v_x = -e (E_x + B v_y) \quad (1-10)$$

$$m (d/dt + 1/\tau) v_y = -e (E_y - B v_x) \quad (2-10)$$

$$m (d/dt + 1/\tau) v_z = -e E_z \quad (3-10)$$

در حالت پایا میدان هال یک میدان ایستا خواهد بود و مشتق‌های زمانی آن صفر می‌شوند، در نتیجه داریم:

$$v_x = -e E_x \tau / m - \omega_c \tau v_y \quad (4-10)$$

$$v_y = -e E_y \tau / m - \omega_c \tau v_x \quad (5-10)$$

$$v_z = -e E_z \tau / m \quad (6-10)$$

که در آن $\omega_c = eB/mc$ بسامد سیکلوترونی نامیده می‌شود.

نواری تخت را در یک میدان طولی E_x و یک میدان مغناطیسی عرضی مانند (شکل ۱) در نظر بگیرید. اگر جریان نتواند در جهت y از نوار بیرون رود آن‌گاه، $v_y = 0$ است. پس داریم:

$$E_y = -\omega_c \tau E_x = -eB\tau E_x / m \quad (11)$$

ضریب هال، به صورت نسبت میدان الکتریکی القایی به حاصل ضرب چگالی جریان و میدان مغناطیسی کاربرستی تعريف می‌شود، یعنی:

$$R_H = E_y / j_x B \quad (12)$$

از سوی دیگر داریم: $j_x = nev = ne^2 \tau E_x / m$ در نتیجه با جایگذاری به دست می‌آوریم:

$$R_H = - (eB\tau E_x / m) / (ne^2 \tau E_x B / m) = -1/ne \quad (13)$$

که این یک نتیجه بسیار شگفت‌انگیز است و نشان می‌دهد که ضریب هال به هیچ‌ویژگی از فلز، به جز چگالی حامل‌هایش بستگی ندارد.

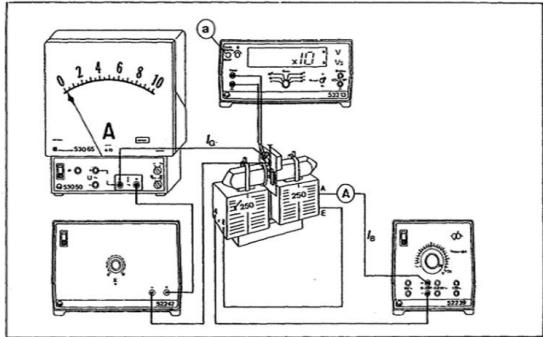
ابزار مورد نیاز:

- ۱- دستگاه اثرهال با نوار نقره‌ای
- ۲- آهنربای الکتریکی (شامل هسته U شکل و پیچه‌های ۲۵۰ و ۱۰۰۰ دوری)
- ۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان (آمپرسنج‌های تا ۱۰ و تا ۲۰ آمپری)
- ۴- دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ (میکروولت سنج)
- ۵- منبع‌های تغذیه
- ۶- سیم‌های رابط مناسب (با توجه به بالا بودن جریان‌ها در این آزمایش بایستی سیم‌های نمره بالا به کار گرفته شود).

دستور آزمایش:

۱) تغییرات V_H بر حسب B

مدار را مانند شکل ۳ بیندید. دستگاه اثر هال را به میکرو ولت متر، منبع‌های تغذیه و آمپرسنج‌های مناسب وصل کنید. جریان پیچه‌ها (I_B) را تغییر داده و به ازای هر مقدار جریان، ولتاژ V_H را در جدول زیر یادداشت کنید. آزمایش را باید برای دو جریان طولی I_Q ، مانند برابر با ۱۵ و ۱۹ آمپری انجام دهید. روشن است که آمپرسنج بایستی توانایی اندازه‌گیری جریان‌هایی تا ۲۰ آمپر را داشته باشد. پس از سنجه‌بندی میدان، ردیف آخر جدول-های زیر را پر کنید.



شکل ۳

جدول ۱- برای جریان طولی $I_Q = 15/00 \text{ A}$

I_B	۱/۰۰	۲/۰۰	۳/۰۰	۴/۰۰	۵/۰۰	۶/۰۰	۷/۰۰	۸/۰۰	۹/۰۰
V_H									
$B(T)$									

جدول ۲- برای جریان طولی $I_Q = 15/00 \text{ A}$

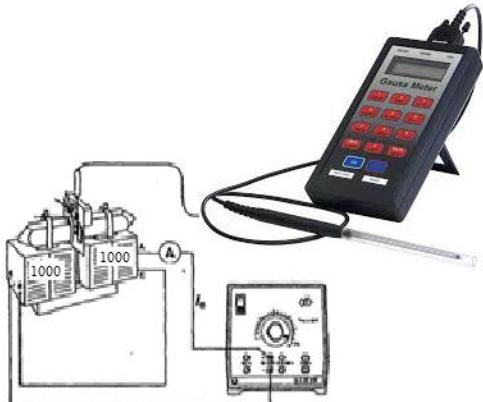
I_B	۱/۰۰	۲/۰۰	۳/۰۰	۴/۰۰	۵/۰۰	۶/۰۰	۷/۰۰	۸/۰۰	۹/۰۰
V_H									
$B(T)$									

سنجه‌بندی B بر حسب I_B

در این آزمایش میدان مغناطیسی کاربستی با یک آهنربای الکتریکی (با پیچه‌های ۱۰۰۰ دوری) ایجاد می‌شود و بایستی القای مغناطیسی B که این دستگاه ایجاد می‌کند را بر حسب جریان پیچه‌ها I_B سنجه‌بندی کرد. پیش از آن که نوار نقره‌ای دستگاه هال را بیرون آورید، جای فک‌ها را با مداد نشانه‌گذاری کنید که پس از برداشتن نوار نقره‌ای، بتوانید همین فاصله‌ی فک‌ها را دوباره ایجاد کنید. توجه کنید که اگر فاصله‌ی فک‌ها کمتر یا بیشتر از آن‌چه در آزمایش داشته‌اید، باشد القای مغناطیسی به ترتیب بزرگتر و کوچک‌تر از آن‌چه داشته‌اید، به دست می‌آید. دستگاه را مانند شکل ۴ سوار کنید، و گمانه‌ی دستگاه تسلاسنج (یا گاوس‌سنجد) را میان دوقطب آهنربای الکتریکی قرار دهید. وقت کنید که به این دستگاه "گمانه‌ی هال" نیز می‌گویند و برپایه‌ی همین آزمایش که انجام می‌دهید، کار می‌کند. ولی به جای نوار نقره‌ای در آن یک نیم‌رسانا به کار رفته است. مغناطش پسماند هسته‌های آهنربای الکتریکی را پیش از سنجه‌بندی آهنربای با کمک استاد درس وامگناطیده کنید. توجه کنید که در گمانه‌های آنالوگ پیش از سنجه‌بندی میدان آهنربای الکتریکی، خود گمانه با یک آهنربای استاندارد تنظیم می‌شد. چنین دستگاهی در آزمایشگاه وجود دارد و می‌توانید آن را بینید و با آن کار کنید. بدین منظور برای سنجه‌بندی میدان بر حسب جریان، گمانه هال را میان دوقطب قرار دهید. منبع تغذیه را روشن کنید و میدان را به ازای جریان‌های گوناگون در جدول زیر یادداشت کنید. بدین منظور ولتاژ منبع تغذیه را افزایش دهید تا بیشنه جریان عبوری را به دست آوردید. **توجه:** جریان نباید از 10 آمپر بیشتر شود (بسیار مهم). سپس بازه‌ی جریان را به گونه‌ای تقسیم کنید که جدول پر شود. در هر مرحله I_B را $1 \text{ آفراش} \text{ دهید}$. نمودار B بر

حسب I_B را رسم کنید. با این منحنی می‌توان میدان را به ازای هر جریان دلخواه به دست آورید. این منحنی را منحنی سنجه‌بندی (کالیبراسیون) می‌نامند.

یادآوری: با توجه به آن که افزایش جریان، قطب‌های آهن‌ربا را به سوی هم می‌کشد، برای جلوگیری از آسیب دیدن گمانه‌ی هال پیچ‌های نگهدارنده‌ی قطب‌ها را کاملاً سفت کنید و قطب‌ها را بیش از حد به هم نزدیک نکنید.



شکل ۴

$I_B \pm 0.01(A)$	۰/۵۰	۱/۵۰	۳/۵۰	۴/۵۰	۶/۵۰	۷/۵۰	۹/۵۰	۱۰/۵۰
B(T)								

(۳) تعیین چگالی حامل‌های بار و ثابت هال:

برای جریان‌های ۱۵ و ۱۹ آمپری در نوار نقره (I_Q)، نمودار V_H را برحسب B در یک نمودار رسم کنید و پس از برآش خطی و روابط مربوط، ضریب هال و چگالی حامل‌های بار را به دست آورید. مقادیر به دست آمده را با مقادیر گزارش شده‌ی استاندارد مقایسه کنید. ضخامت نوار هال برابر با 0.05 میلی‌متر است.

پرسش‌ها:

- ۱- خطاهای آزمایش را نام ببرید. چگونه می‌توان خطاهای آزمایش را کاهش داد؟
- ۲- چگونه می‌توان علامت حامل‌های بار را با توجه به ولتاژ هال می‌توان تشخیص داد؟
- ۳- نمودار B بر حسب I_B چه رفتاری دارد؟ آیا به اشباع می‌رسد؟
- ۴- رابطه‌ی (۱) را به دست آورید.
- ۵- چرا باید مغناطیش پسماند هسته‌های آهن‌ربای الکتریکی را پیش از سنجه‌بندی وامغناطیده کرد؟
- ۶- برای حذف آثار لبه‌ای جریان طولی در نوار نقره باید چه کاری انجام داد؟
- ۷- چرا در دستگاه تسلا سنج (گمانه‌ی هال) به جای نوار نقره‌ای نیمرسانا به کار می‌رود؟

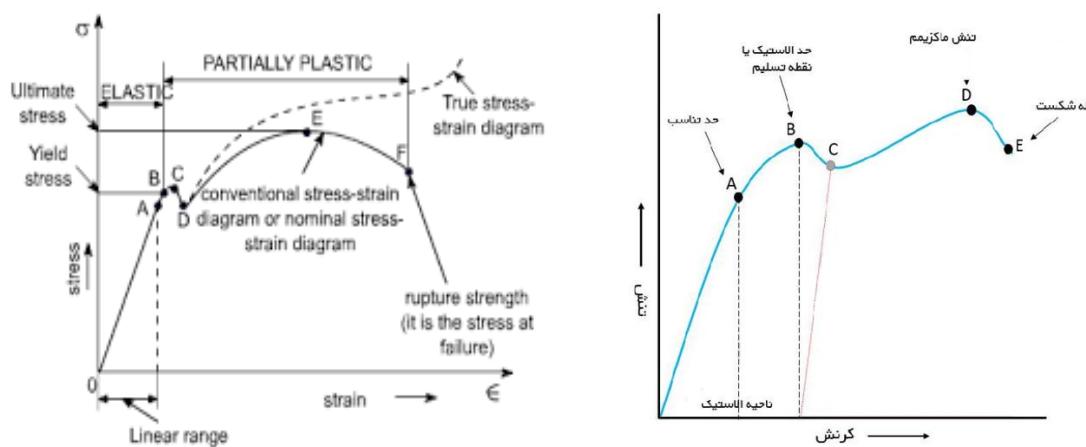
آزمایش شماره‌ی ۵

ویژگی‌های مکانیکی جامد‌ها: کشسانی فلزها

هدف: بررسی نمودار تنش - کرنش چند فلز گوناگون و به دست آوردن نقطه‌ی تسليم (یا نقطه‌ی سیلان) یا شارش یا جاری شدن) و برآورد نقطه‌ی گسیختگی آنها

زمینه‌ی نظری:

پاسخ یک جامد به یک نیروی کاربستی بیرونی، ویژگی‌های مکانیکی آن جامد را تعیین می‌کند. هرگاه نیرویی کششی بر جامدی وارد شود، تغییر طولی در آن ایجاد می‌شود که تغییر نسبی (کرنش) آن بستگی به ویژگی‌های مکانیکی آن جامد دارد. شکل ۱ نمودار همگانی تنش - کرنش یک جامد را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمودار همگانی تنش - کرنش یک جامد

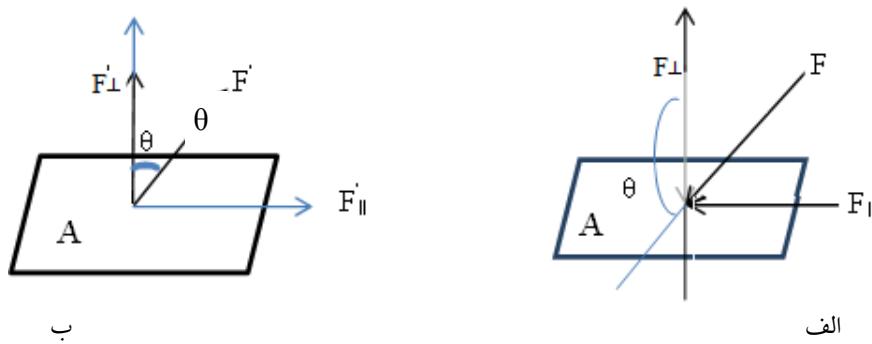
بر پایه‌ی قانون هوک تغییر درازای یک جامد کشسان، برای تغییر شکل‌های کوچک، با فشار متناسب است. کرنش، تغییر نسبی طول است. برای یک جسم باریک و بلند (سیم یا میله) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

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

که در آن ΔL تغییر درازا در راستای کشش و L درازای اولیه‌ی جسم است. بدین ترتیب می‌بینیم که کرنش بُعد و یکاندارد. از سوی دیگر، تنش برابر با نیروی وارد بر یکای سطح است. یعنی:

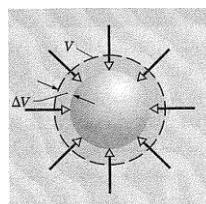
$$\sigma = F / A \quad (2)$$

یکای تنش همانند فشار نیوتون بر متر مربع یا پاسکال (Pa) است. اگر همانند شکل ۲-الف نیروی F با زاویه‌ی θ نسبت به بردار عمود بر سطح A ، بر سطح وارد شود، آنگاه تنش فشاری با $\sigma_{\perp} = F_{\perp} / A$ و تنش برشی $\sigma_{II} = F_{II} / A$ تعریف می‌شوند. اگر همانند شکل ۲-ب جهت نیروی F وارونه گردد، آنگاه $\sigma_{II} = F_{II} / A$ تنش کششی نامیده می‌شود. ولی تنش برشی باز همان $\sigma_{\parallel} = F_{\parallel} / A$ است. دقت کنید که یکای همه‌ی تنش‌ها، همانند و برابر Pa است و تنش فشاری همان کمیتی است که به نام فشار شناخته می‌شود.



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 رابطه‌ی $\Delta V/V$ تعریف می‌گردد. این کمیت نیز بی‌بعد و یکاست و فشار وارد بر نمونه همان فشار مایع (معمولًاً روغن) پیرامون نمونه است. این آزمایش در دستگاه‌های پرس هم‌فشار^۲ ایجاد می‌شود.



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

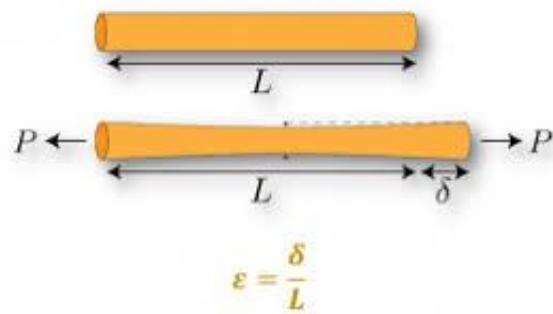
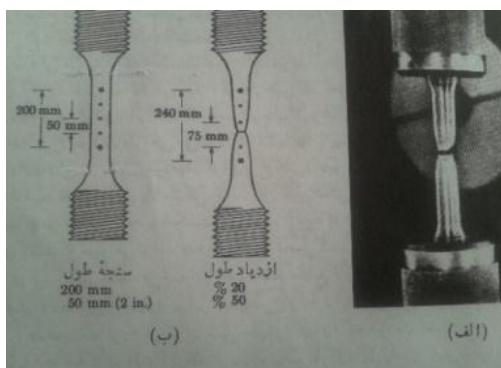
رابطه‌ی میان تنش و کرنش برای یک جامد در کرنش‌های کم یا بازه‌ی کشسانش با فرمول زیر داده می‌شود که همانند قانون هوک است و در آن ثابت تناسب E ، را مدول کشسانی یا مدول یانگ می‌نامند. $\sigma = E\varepsilon$ با کاربست یک تنش عمودی نه‌چندان بزرگ، جامد نخست تغییر طول می‌دهد که با برداشتن آن تنش عمودی، این تغییر طول هم از میان می‌رود و جامد به طول اولیه بر می‌گردد. این بازه روى 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 اولیه خود بر می‌گردد. 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. شب این بخش خطی، خط OA در نمودار شکل ۱، 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

² Isostatic press

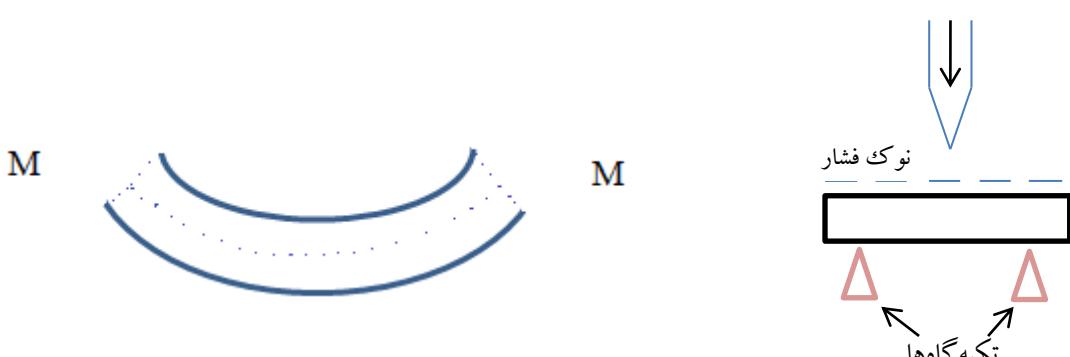
اندازه‌ی پیش‌بینی شده با قانون هوک خواهد بود. با افزایش تنش (یا نیرو) و گذشتن از حد کشسانی به نقطه‌ی تسليم می‌رسیم (نقطه‌ی B) که در آن افزایش اندکی در مقدار تنش به کرنش بزرگی می‌انجامد. پس از آن، به ناحیه‌ی مومسان (پلاستیکی) می‌رسیم که سیم کرنش همیشگی دارد و تغییر طول بازگشت ناپذیر است.

با افزایش بیشتر تنش، مقدار بیشینه‌ی تنش موسوم به تنش نهایی^۳ 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 گلوبی^۴ 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 تغییرشکل نهایی در ناحیه‌ی گلوبی متوجه می‌شود، بی‌سنجه‌ی طول، مقدار افزایش طول بی‌معناست. در آزمایش‌های معمول، سنجه‌ی طول ۵۰ میلی‌متری به کار می‌رود.

تنش خمی نیز گونه‌ای دیگر از تنش‌های است. اگر خمش را به شکل زیر در نظر بگیریم، در نیمه‌ی بالای 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 هیچ گونه کرنشی وجود ندارد.



شکل ۵-تنش خمی

از ویژگی‌های مکانیکی دیگر مواد، انعطاف‌پذیری، استحکام، سختی و چقرومگی به شرح زیر است.

³Ultimate stress

⁴Necking

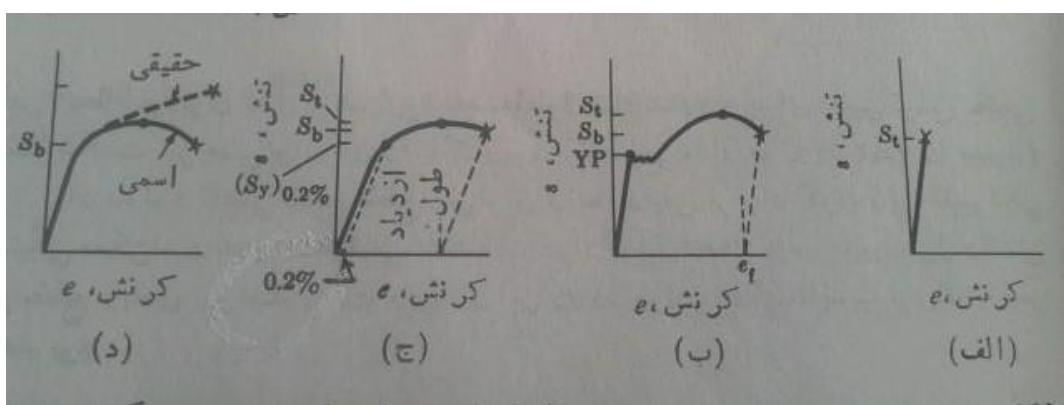
الف- انعطاف پذیری، کرنش موم سان (پلاستیکی) لازم برای شکست، را می توان به صورت درصد افزایش نسبی طول بیان کرد. انعطاف پذیری، $\Delta L/L$ نیز مانند کرنش، یکا ندارد. چون تغییر طول معمولاً در ناحیه گلویی نمونه، متوجه کر می شود، بنابراین مقدار افزایش طول به سنجه ای طول بستگی دارد. مقیاس دیگری برای انعطاف-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

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

ج- استحکام کششی، S_t ، از تقسیم بیشینه بار به سطح مقطع اولیه 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 ای انعطاف پذیر، زیر بار بیشینه تا اندازه ای کم می شود. بنابراین تنفس حقیقی، σ ، از تقسیم نیرو بر سطح واقعی و تنفس نامی بر پایه ای سطح اولیه محاسبه می شود. برای مهندسان که باید طراحی های خود را بر پایه ای ابعاد اولیه انجام دهند تنفس نامی، اهمیت بیشتری دارد.

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

ه- چفرمگی، مقدار انرژی لازم برای شکست ماده است. این انرژی متناسب با سطح زیر منحنی تنفس-کرنش است. ماده ای انعطاف پذیری که استحکامی برابر یک ماده ای انعطاف ناپذیر دارد، برای شکسته شدن انرژی بیشتری لازم دارد و پس چفرمه تر است. در شکل ۶ الف تا د) نمودار تنفس-کرنش مواد گوناگون رسم شده است.



شکل ۶- الف) جامد انعطاف ناپذیر بی هیچ کرنش پلاستیکی مانند چدن، ب) جامد انعطاف پذیر با نقطه ای تسليم مانند فولاد کم کربن، ج) جامد انعطاف پذیر بی نقطه ای تسليم مانند آلومینیم، د) نمودار تنفس-کرنش حقیقی در مقایسه با نمودار تنفس-کرنش نامی.

انجام آزمایش

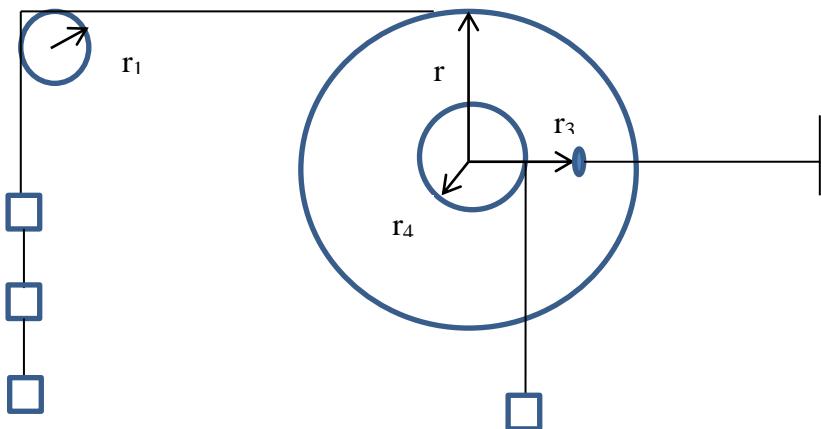
در این آزمایش سیم‌های آهنی و مسی با آویزان کردن وزنهایی به آن‌ها تنیده و افزایش طول (و کرنش) آن‌ها با یک عقربه اندازه‌گیری می‌شود. اگر پس از گذاشتن و برداشتن باری عقربه به صفر برگرد، سیم در گستره‌ی کشسانی خود قرار دارد. اما اگر با گذاشتن و برداشتن باری بزرگ‌تر، عقربه به صفر باز نگردد، از گستره‌ی کشسانی 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:

چرخ و محور فلزی، یک عقربه و مقیاس‌بندی، ۳ میله‌ی ۷۵ و یک میله‌ی ۲۵ سانتی‌متری، گیره‌های گوناگون، سیم‌های آهنی و مسی با قطر $20/20$ mm، وزنهای ۵۰ و ۱۰۰ گرمی، نخ ناکشسان یا سیم ماهی گیری

روش برپایی آزمایش:

دستگاه اندازه‌گیری را مانند شکل ۷ با رعایت نکات زیر برپا کنید:



شکل ۷: چگونگی برپایی آزمایش

- ۱- چرخ فلزی را با گیره‌ای به میله‌ی سمت چپ و گیره‌ی نگهدارنده سیم (a) را به میله‌ی سمت راست و در ارتفاعی برابر با مرکز چرخ بیندید.
- ۲- عقربه و مقیاس را در سمت چپ دستگاه متصل نمایید. تکه‌ای از نخ ماهی گیری را از یک سو حلقه کرده و به چرخ بیندید. سپس یک دور نخ را ساعت‌گرد در شیار چرخ پیچیده و از روی غلاف عقربه آویزان کنید و یک وزنه‌ی ۵۰ گرمی به آن بیاویزید. می‌توانید غلاف را با کمی چسب نواری بچسبانید تا نخ روی آن نلغزد.
- ۳- سر قطعه‌ی دیگری از نخ ماهی گیری را حلقه کرده به قرقه‌ی کوچک‌تر چرخ وصل نمایید و پادساعت‌گرد نیم یا یک و نیم دور از شیار چرخ پیچیده و به مقدار مناسب وزنه به آن بیاویزید تا گشتاور نیروهای میان دو قرقه‌ی کوچک‌تر و بزرگ‌تر برابر شود و عقربه بر روی عدد صفر قرار گیرد.

۴- مقدار مناسبی از سیم آهنی یا مسی را از یک سمت به گرهی a و از سمت دیگر با گیره به یکی از سوراخ-های روی قرقه به گونه‌ای محکم کنید که کاملاً هم تراز باشد.

نکته‌ی مهم: هنگامی که سیم را می‌بندید نباید در هیچ نقطه‌ای خم شود و از کشیدن آن نیز خودداری کنید.

شرح آزمایش:

طول سیم را پیش از بارگذاری اندازه بگیرید، $l_0 = \dots\dots\dots\dots\dots$ ±

وزنه‌های ۵۰ گرمی را به ترتیب به انتهای نخ متصل به عقربه آویزان و پس از هر بارگذاری به دقت مقدار انحراف عقربه را یادداشت نمایید. هر بار وزنه را برداشته و بینید که آیا عقربه به وضعیت پیشین برمی‌گردد یا خیر؟ بیشینه باری که به تغییر طول همیشگی می‌انجامد را یادداشت کنید (هر گاه پس از برداشتن وزنه‌ها عقربه صفر نمی‌شود). اکنون سیم را بالاتر از حد کشسانی بارگذاری کنید و این کار را تا رسیدن به نقطه‌ی شکست ادامه دهید. نتایج آزمایش را در جدولی مانند زیر یادداشت نمایید و نتایج را گزارش کنید.

سیم مسی:

مقدار وزنه بارگذاری شده (g)	چرخش عقربه (°)	طول اولیه سیم

سیم فولادی یا آهنی:

مقدار وزنه بارگذاری شده (g)	چرخش عقربه (°)	طول اولیه سیم

توجه:

۱- قطرهای چرخ‌ها را با کولیس اندازه بگیرید و شعاع آن را به دست آورید (r). با توجه به زاویه‌ی چرخش و عقره و با روابط هندسی رابطه‌ای میان هر درجه اندازه‌گیری شده و تغییر طول سیم را به دست آورید. رابطه را به استاد خود نشان دهید و از درستی آن مطمئن شوید.

$D_1 \pm \dots$	$D_2 \pm \dots$	$D_3 \pm \dots$	$D_4 \pm \dots$

۲- پس از تعیین حد کش‌سانی، برای انجام دوباره‌ی آزمایش باید سیم نو به کار ببرید. چرا؟

خواسته‌های آزمایش

۱. حد کش‌سانی هر سیم را تعیین کنید.
۲. منحنی تنش-کرنش آهن و مس را رسم کرده با یکدیگر مقایسه کنید. آیا می‌توان آن‌ها را در یک صفحه رسم کرد؟ چه راهی پیشنهاد می‌کنید؟
۳. مدول کش‌سانی آهن و مس را تعیین کرده و با مقادیر نظری مقایسه کنید.
۴. آیا I_4 در محاسبات تغییر طول سیم مسی یا آهنی (یا کرنش آن‌ها) موثر است؟ چرا؟
۵. خطاهای آزمایش را نام ببرید و روش‌هایی برای کاهش خطاهای پیشنهاد کنید.
۶. به نظر شما چه تغییری می‌توان در برپایی آزمایش ایجاد کرد تا آزمایش بهتر انجام شود؟
۷. مس انعطاف‌پذیرتر است یا آهن؟

آزمایش شماره‌ی ۶

ویژگی‌های مکانیکی جامد‌ها: تنش فشاری و استحکام‌شکست

مقدمه

مقاومت‌فشاری، ایستادگی یک جامد در برابر تغییر شکل و شکست زیر نیروهای فشاری است. هنگامی که فشار از حد مقاومت‌فشاری یک ماده فراتر می‌رود، آن ماده فرو می‌ریزد. استحکام‌شکست، ایستادگی یک ماده در برابر نیروهای ویران‌گر بیرونی، پیش از فروریختن است و به صورت تنشی تعریف می‌شود که موجب شکست شده و اولین ترک‌ها دیده می‌شود. مقاومت هر ماده را در برابر تغییر‌شکل مومسان، استحکام‌تسلیم می‌نامند. در برخی از فولادهای نرم، استحکام تسلیم را می‌توان به صورت نقطه‌ی تسلیم نشان داد. هر اندازه ماده استحکام بیشتری داشته باشد، پیش از شکست، می‌تواند نیروی بزرگ‌تری را تحمل کند. **تنش‌های گوناگون، همانند کششی، فشاری، برشی و پیچشی و در نتیجه استحکام‌های گوناگون وجود دارد.**

استحکام فشاری: تغییر شکل کشسان هنگامی روی می‌دهد که تنش‌های نه‌چندان بزرگ روی فلز یا روی هر جامد دیگری وارد شود. برای نیروهای فشاری قطعه کوتاه‌تر (فسرده) می‌شود. برای تنش‌های فشاری کوچک، کرنش کشسان، نتیجه‌ی آبرفتگی اندک یاخته‌ی یکه در جهت نیروی فشاری است. یک مورد ساده فشار تک محوری، شکل زیر، است که در آن نیروهای ناهم‌سو جسم را فشار می‌دهند. استحکام شکست کمینه تنشی است که در آن اولین نشانه‌های ترک خوردنگی بر روی سطح نمونه پدیدار می‌گردد. به هنگام آزمایش تعیین استحکام شکست، نیرو از آغاز تا لحظه شکست به گونه‌ی یکنواختی افزایش می‌یابد. در این آزمون لازم است فشار به گونه‌ی یکنواختی بر روی سطح نمونه پخش شود تا کاهش ارتفاع بطور یکنواخت رخ دهد.

نمودار تنش-کرنش

برای رسم نمودار تنش - کرنش نیاز به دو تعریف داریم:

تنش: نیروی وارد بر یکای سطح، تنش نامیده می‌شود. اگر نیروی عمودی F_n بر سطح A وارد شود، تنش عمودی یا فشار برابر است با:

$$\sigma = F_n / A \quad (4)$$

که در آن σ تنش، F نیروی وارد بر سطح و A مساحت سطح نمونه است که تنش بر آن وارد می‌شود. یکای تنش پاسکال (Pa) است که با یک نیوتون بر متر مربع (N/m^2) برابر است.

کرنش: هنگامی که تنشی بر یک جسم وارد می‌شود، تغییر شکلی در راستای تنش در آن به وجود می‌آید. نسبت تغییر طول به طول اولیه‌ی جسم را کرنش (ϵ)، می‌گویند:

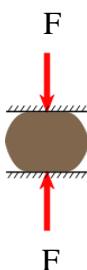
$$\epsilon = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0 \quad (5)$$

که در آن ΔL تغییر طول جسم و L_0 به ترتیب طول‌های اولیه و نهایی است. در بازه‌ی کشنده تنش و کرنش همیشه رابطه‌ای مستقیم دارند. یعنی با افزایش تنش، کرنش نیز افزایش می‌یابد. در طراحی مهندسی، بیشتر

به تنش نظری بسته می شود. به راستی، تنش واقعی با تنش نظری تفاوت دارد. پس محاسبه‌ی مقاومت فشاری نظری، معادلات داده شده، نتیجه دقیقی نخواهد داشت. البته دلیل آن تغییر مساحت سطح مقطع A به هنگام وارد شدن فشار نسبت به A_0 است به گفته‌ی دیگر، سطح مقطع نمونه، تابعی از فشار وارد شده است.

نکته: تفاوت در نتایج آزمایش با آن‌چه باید باشد، ممکن است برآمده از عوامل زیر باشد:

در زیر فشار، میانه‌ی نمونه، گرایش به پهن یا چاق شدن دارد که آن بشکه‌ای یا خمره‌ای شدن نامیده می شود (شکل ۱). این خود عاملی برای افزایش سطح مقطع نمونه است. از این رو یک نیروی اصطکاکی پدید می آید که در برابر چاق و پهن شدن نمونه ایستادگی می کند. این بدین معنی است که بخشی از نیروی کاربستی به هنگام آزمایش، صرف چیره شدن بر همین نیروی اصطکاک می شود. نتایج به دست آمده از این آزمایش، تا اندازه‌ی از مقدار واقعی مقاومت فشاری، متفاوت خواهد بود.



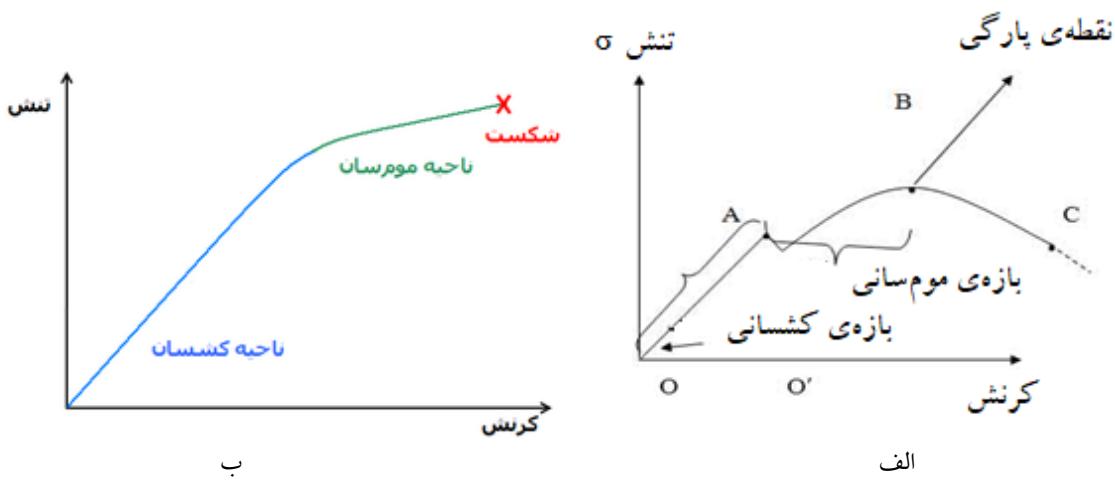
شکل ۱: بشکه‌ای شدن نمونه زیر فشار تک محوری

از دید کاربردی اثر تنش فشاری روی میله‌ها و ستون‌ها بسیاری با اهمیت و پی‌آمد آن کوتاه شدن آن‌هاست.

تغییر شکل:

کرنش اولیه با تنش متناسب و برگشت‌پذیر است. بدان معنا که پس از برداشتن تنش، کرنش نیز از میان می‌رود. اما در تنش‌های بالاتر، افرون بر کرنش کشسان، جایه‌جایی همیشگی نیز رخ می‌دهد، به گونه‌ای که اگر تنش را برداریم، کرنش برگشت‌نایپذیر است. این کرنش را، کرنش موسمان (پلاستیکی) می‌نامند. انعطاف‌پذیری (تغییر طول) کرنش کشسان، تنها حالت تغییر شکل اجسام در تنش‌هایی کمتر از استحکام تسلیم است. در تنش‌های بالاتر که کرنش موسمان (پلاستیکی) به وجود می‌آید، کرنش افزایش می‌یابد. هنگامی که ماده می‌شکند کرنش کشسان از میان می‌رود، اما کرنش پلاستیکی هست. با توجه به ویژگی ماده، شکست به صورت تسلیم در مواد چکش‌خوار و انعطاف‌پذیر (فلزها و برخی از خاک‌ها و پلاستیک‌ها) یا به صورت پارگی برای مواد ترد (مانند چدن، شیشه و گچ) روی می‌دهد.

گسیختگی: شکل ۲ نمودارهای تنش-کرنش را برای یک جسم ترد (الف)، و یک جسم انعطاف‌پذیر (چکش‌خوار) (ب) نشان می‌دهد. برای بیشتر فلزها، تغییر شکل کشسان تا کرنش‌هایی پیرامون ۰/۰۰۵ است. در تنش‌های بالاتر، دیگر مانند قانون هوک، تنش با کرنش متناسب نیست و تغییر شکل همیشگی روی می‌دهد که به آن تغییر شکل موسمان گفته می‌شود.



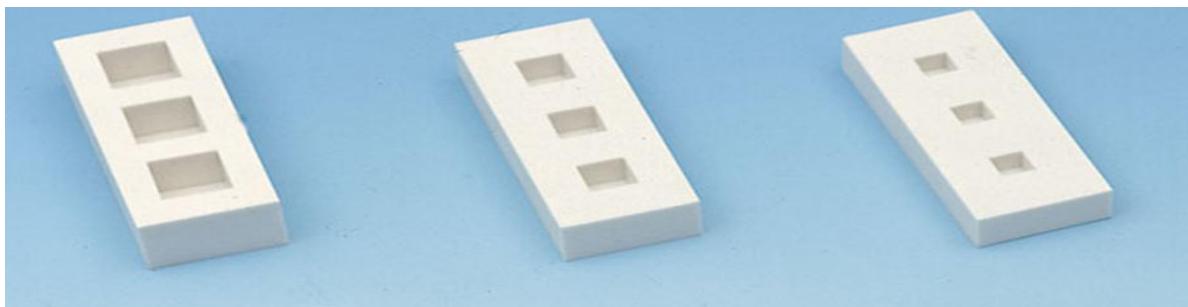
شکل ۲: (الف) ماده‌ی ترد، ب) ماده‌ی چکش‌خوار (انعطاف‌پذیر)

در این وضعیت ماده دیگر به طول اولیه‌ی خود برنمی‌گردد. سرانجام تنش، به یک مقدار بیشینه‌ی استحکام فشاری، نقطه‌ی B در شکل (۲-ب)، می‌رسد که در این نقطه نمونه شروع به تغییر شکل همیشگی می‌کند. پس از آن، تنش با افزایش کرنش کاهش بیشتری می‌یابد و نمونه می‌شکند که برگشت ناپذیر است. در این مرحله تنش‌ها تا زمانی که برای ایجاد شکستگی به حد کافی برسند، انباسه می‌شوند. همه‌ی مواد در تنش به حد کافی بزرگ دچار گسیختگی می‌شوند.

هدف آزمایش: تعیین مقاومت فشاری گچ

وسایل آزمایش:

دستگاه پرس هیدرولیک، قالب‌های مکعبی برای ساخت نمونه‌های با سطح مقطع‌های ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متر مربعی (شکل ۳) و ریزسنج عقربه‌ای یا ساعتی، (شکل ۴).



شکل ۳: قالب‌های پلیمری ساخت نمونه‌های مکعبی با مساحت سطح مقطع ۱، ۲ و ۴ سانتی‌مترمربعی.

چگونگی انجام آزمایش

آزمایش نخست: تعیین استحکام شکست

نخست یکی از نمونه‌های کچی را بر روی میز چهی ویژه قرار داده و با بالا کشیدن فک متحرک، سطح بالای نمونه را به فک ثابت بچسبانید، مطمئن شوید که فاصله‌ای میان فک ثابت و نمونه نیست. بدین‌منظور کمی پمپ

کنید تا نیروسنجد به مقدار بسیار ناچیزی حرکت کند، سپس با باز کردن شیر، نیرو را صفر کنید. اینکه با تنظیم فاصله‌ی میله‌ی ریزسنجد ساعتی و چرخاندن صفحه‌ی آن، ریز سنجد را صفر کنید.



شکل ۴: ریزسنجد عقربه‌ای یا ساعتی.

با پمپ کردن روغن، به نمونه نیرو وارد کنید. نیرو را بطور پیوسته افزایش دهید (با گام‌های 0.5 kN) تغییر طول را از روی ریزسنجد بخوانید و یادداشت کنید. این کار را تا جایی دنبال کنید که نمونه ترک بردارد و شروع به خردشدن کند. در این هنگام نیرو روبه کاهش می‌یابد. تلاش کنید تا می‌توانید شمار بیشتری از این نیروها را یادداشت کنید. آخرین مقدار نیرو، درست پیش از فروریز شدن نمونه، استحکام شکست نمونه مورد نظر است. مقاومت فشاری، معمولاً با آزمایش فشار و به صورت آزمایشگاهی به دست می‌آید. در این آزمایش دستگاه، فشار تک محوری وارد می‌کند.

الف) نمونه‌ی گچی کوچک

ΔL تغییر طول $\pm 0.01\text{ mm}$	$F(\text{N})$ نیرو $\pm 0.25 \text{ kN}$	$\epsilon = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$ کرنش	$\sigma = F_n / A$ (Pa)

ب) نمونه‌ی گچی میانه

ΔL تغییر طول $\pm 0.01\text{ mm}$	$F(\text{N})$ نیرو $\pm 0.25 \text{ kN}$	$\epsilon = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$ کرنش	$\sigma = F_n / A$ (Pa)

پ) نمونه‌ی گچی بزرگ

ΔL تغییر طول $\pm 0.01\text{ mm}$	$F(\text{N})$ نیرو $\pm 0.25 \text{ kN}$	$\epsilon = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$ کرنش	$\sigma = F_n / A$ (Pa)

برای هر یک از نمونه‌ها و برای هر نیرو سه مقدار و همارز آن سه کرنش به دست می‌آید. این‌ها را میانگین گرفته و منحنی تنش-کرنش را برای هر دسته نمونه رسم کنید. بازه‌ی کشسانی، استحکام، شکست و نقطه‌ی پارگی را مشخص کنید.

نمونه سازی

- ۱- نخست قالب‌ها را پاک کرده و با روغن چرب کنید.
- ۲- ملات گچ یا سیمان را بسازید.
- ۳- ملات را در قالب‌ها ریخته و سطح بالای آن‌ها را با دقت هموار کنید.

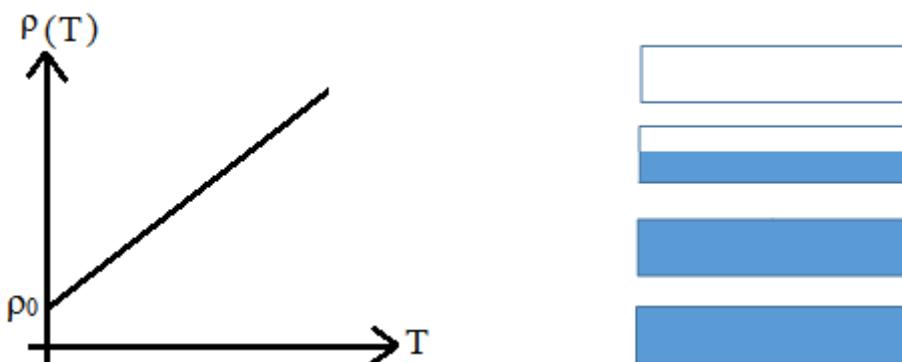
آزمایش شماره‌ی ۷

ویژگی‌های نیم‌رساناهای بررسی وابستگی دمایی مقاومت یک نیم‌رسانا و مقایسه‌ی آن با یک وابستگی دمایی مقاومت یک فلز

هدف آزمایش: هدف از این آزمایش بررسی وابستگی دمایی مقاومت‌های نیم‌رساناهای و فلزها و به دست آوردن گاف انرژی نیم‌رسانا از روی نمودار تغییرات مقاومت با دما است.

نظریه: رسانش الکتریکی در مدل نوار ساختار نواری فلزها:

در ساختار نواری فلزها شماری نوار کاملاً بخشی پر و شماری نوار کاملاً خالی وجود دارد که هیچ یک سهمی در رسانندگی ندارند. اما یک نوار وجود دارد که نیمه‌پر (۹۰ تا ۱۰ درصد) است که در رسانندگی نقش دارد. الکترون‌های نوار نیمه‌پر می‌توانند در یک میدان الکتریکی بی‌آن که نوار خود را تغییر دهند، به انرژی‌های بالاتر رفته و در رسانش الکتریکی شرکت کنند. بدین ترتیب رسانش می‌تواند با یک میدان الکتریکی بسیار کوچک هم رخ دهد و به همین دلیل فلزها رسانا هستند. مقاومت فلزها با افزایش دما، افزایش می‌یابد (شکل ۱).



شکل ۱: نوارهای انرژی (راست) و وابستگی دمایی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک فلز (چپ)

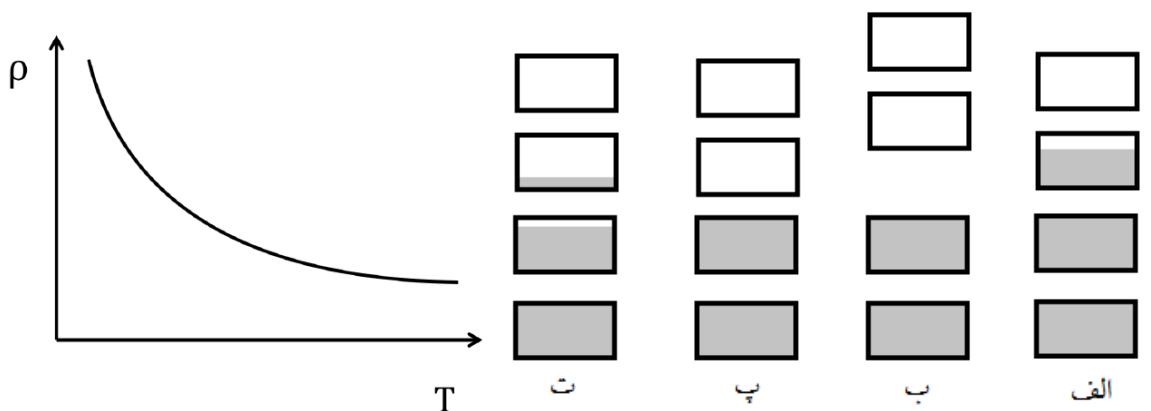
ساختار نواری نارساناهای:

ساختار نواری نارساناهای نوار نیمه‌پر ندارد و گاف انرژی میان بالاترین انرژی نوار پر (نوار ظرفیت) و پایین‌ترین انرژی نوار خالی (نوار رسانش)، به اندازه‌ای بزرگ است که هیچ الکترونی نمی‌تواند چه بر اثر برانگیختگی گرمایی یا میدان الکتریکی از نوار پر به نوار خالی برود در نتیجه رسانش الکتریکی در این اجسام صورت نمی‌گیرد.

ساختار نواری نیم‌رساناهای:

در صفر مطلق (یا کلوین) ساختار نواری نیم‌رساناهای همانند نارساناهای نوار نیمه‌پر ندارد. اما گاف انرژی میان بالاترین انرژی نوار پر و پایین‌ترین انرژی نوار خالی از گاف انرژی در نارساناهای بسیار کوچک‌تر است، به گونه‌ای که در دماهای معمولی مانند دمای اتاق، شماری از الکترون‌ها می‌توانند با برانگیختگی گرمایی از نوار پر به نوار خالی بروند و بدین ترتیب امکان رسانندگی فراهم شود. هرچه دما بیشتر افزایش یابد شمار بیشتری از

الکترون‌ها گذار میان نواری را انجام می‌دهند و بدین ترتیب رسانندگی افزایش می‌یابد. در نیمرساناهای نوار پر را نوار ظرفیت و نوار خالی را نوار رسانش می‌نامند. مهم‌ترین عناصرهای نیمرسانا، سیلیسیوم و ژرمانیوم‌اند که نیم-رساناهای ذاتی نامیده می‌شوند. شکل زیر نوارهای انرژی یک نیمرسانا در دمای صفر مطلق و دمای ناصفر و همچنین تغییرات مقاومت ویژه‌ی یک نیمرسانا را به گونه‌ی نموداری بر حسب دما نمایش می‌دهد.



شکل ۲: نوارهای انرژی: (الف) فلز، (ب) عایق، (پ) نیمرسانا در صفر مطلق و (ت) نیمرسانا در دمای ناصفر. وابستگی دمایی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک نیمرسانا (چپ)

برخی از ویژگی‌های نیمرسانا:

نیمرساناهای موادی هستند که مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن‌ها در دمای اتاق میان مقاومت ویژه‌ی الکتریکی فلزها و نارساناهای است. با این تفاوت که مقاومت ویژه‌ی فلزها با افزایش دما، افزایش می‌یابد، در حالی که مقاومت نیم-رساناهای (ونارساناهای)، با افزایش دما کاهش می‌یابد. در دمای صفر مطلق یا دماهای بسیار پایین، نوار ظرفیت نیم-رساناهای پر و نوار رسانش آن‌ها خالی است و الکترون‌ها تنها با گذار میان نواری می‌توانند در رسانش شرکت کنند. پس نیمرساناهای در دماهای بسیار پایین مانند یک نارسانا رفتار می‌کنند اما با افزایش دما، شماری از الکترون‌های نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌روند و بدین ترتیب هم در نوار ظرفیت و هم در نوار رسانش تراز خالی ایجاد می‌شود و در یک میدان الکتریکی، رسانش برقرار می‌شود. به جای خالی الکترون در نوار ظرفیت "حفره" گویند. پس در نیمرساناهای هم حفره‌های نوار ظرفیت و هم الکترون‌های نوار رسانش در رسانش الکتریکی شرکت می‌کنند. الکترون‌های نوار ظرفیت می‌توانند با کسب مقداری انرژی به نوار رسانش بروند. این الکترون‌ها در نوار رسانش می‌توانند به سادگی جای‌جا شده و سهمی در رسانندگی الکتریکی نیمرسانا داشته باشند. سهم رسانندگی نوار ظرفیت را می‌توان برپایه‌ی جای خالی الکترون‌ها یعنی حفره‌ها تفسیر کرد. به این صورت که به جای آن که گفته شود الکترون، گذاری درون نواری (نوار ظرفیت) انجام می‌دهد، می‌گوییم حفره‌ها جای خود را تغییر داده‌اند. هنگامی که یک نیمرسانا در یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرد الکترون‌های نوار رسانش ناهم‌سو با جهت میدان و حفره‌های نوار ظرفیت هم‌سو با آن جای‌جا شده و جریان الکتریکی برقرار می‌شود.

نیم رسانای ذاتی:

سیلیسیوم و ژرمانیوم خالص، نیم رساناهای ذاتی هستند و در هر دمایی چگالی الکترون‌های نوار رسانش (n) با چگال حفره‌های نوار ظرفیت (p) برابرند. یعنی: ($n=p=n_i$) که در آن i چگالی ذاتی حامل‌های بار نامیده می‌شود. در یک نیم رسانای ذاتی (نیم رسانای بی ناخالصی یا نآلاییده) شکستن یک پیوند کوالانسی (با گرمای یا نور یا...)، باعث به وجود آمدن یک زوج الکترون-حفره گشته و در یک میدان الکتریکی دو حامل در جهت‌های مخالف حرکت می‌کنند.

نیم رسانای ناذاتی:

نیم رساناهای ناذاتی نیم رساناهایی هستند که در آن‌ها ناخالصی‌هایی (میهمان) جانشین عنصرهای سیلیسیوم یا ژرمانیوم (میزبان) می‌شوند و رسانندگی آن‌ها به دلیل وجود همین ناخالصی‌ها به گونه‌ی چشمگیری افزایش می‌یابد. با توجه به آن که ظرفیت ناخالصی‌ها (معمولًا سه یا پنج ظرفیتی) با ظرفیت میزبان (چهار ظرفیتی) نابرابر است، در این نیم رساناهای چگالی‌های الکترون‌ها با حفره‌ها نابرابر است. این نیم رساناهای را **نیم رساناهای ناذاتی** یا آلالاییده می‌نامند. در نیم رساناهای گونه n (منفی) یک عنصر پنج ظرفیتی (مانند فسفر یا نیتروژن) جانشین میزبان چهار ظرفیتی می‌شود و یک الکtron آزاد به ازای هر جانشانی در شبکه رها می‌شود. همچنین در نیم رسانای گونه p (مثبت) یک عنصر سه ظرفیتی (مانند آلومینیوم یا بور) جانشین میزبان چهار ظرفیتی می‌شود و یک حفره به ازای هر جانشانی در شبکه به جا می‌گذارد. بدین ترتیب نیم رساناهای ناذاتی‌ای به دست می‌آوریم که در آن‌ها یا الکترون‌ها (گونه n) و یا حفره‌ها (گونه p) چگالی بالاتری دارند و دیگر $n \neq p$ است. چگالی‌های الکترون‌های نوار رسانش از رابطه‌ی $N_c = N_v e^{-(E_c - E_F)/kT}$ و نوار ظرفیت از رابطه‌ی $p = N_v e^{-(E_v - E_F)/kT}$ به دست می‌آید، که در آن k ثابت بولتزمن، E_F انرژی تراز فرمی، N_c و N_v چگالی‌های موثر حالت‌ها به ترتیب در نوار رسانش و نوار ظرفیت‌اند و با روابط زیر داده می‌شوند:

$$N_c = 2(2\pi m_e kT/\hbar^2)^{3/2}, \quad N_v = 2(2\pi m_h kT/\hbar^2)^{3/2} \quad (1)$$

که در آن m_e و m_h به ترتیب جرم‌های موثر الکtron در نوار رسانش و حفره در نوار ظرفیت‌اند. روابط بالا نشان می‌دهند که در نیم رسانا با افزایش دما چگالی حامل‌ها افزایش می‌یابند و درنتیجه مقاومت نیم رسانا کاهش می‌یابد. N_c و N_v برای سیلیسیوم در دمای اتفاق به ترتیب برابر $2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ و 10^{19} cm^{-3} است. برای تمام نیم رساناهای ذاتی و ناذاتی داریم:

$$n.p = N_c N_v e^{-E_g / kT}, \quad E_g = E_c - E_v \quad (2)$$

$$n.p = n_i^2 \quad (3)$$

که به آن **قانون اثر جرم** گویند و برای هر دو گونه نیم رساناهای ذاتی و ناذاتی در ترازمندی گرمایی درست است. می‌بینیم که هر چه یک نیم رسانای ذاتی گاف انرژی کوچک‌تری داشته باشد، در یک دمای معین، چگالی الکترون‌ها و در نتیجه چگالی حفره‌های بیشتری دارد.

در نیمرسانای ناذاتی، افزایش چگالی یکی از حامل‌ها، به کاهش چگالی گونه دیگر از راه بازتر کیب می‌انجامد، به گونه‌ای که حاصل ضرب چگالی هر دو حامل در یک دما، ثابت باقی می‌ماند. برای یک نیمرسانای ذاتی داریم:

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{-E_g / 2kT} \quad (4)$$

رسانندگی یک نیمرسانا با چگالی حامل‌هایش متناسب است. از آنجا که مقاومت الکتریکی وارون رسانندگی است می‌توان نوشت:

$$R \propto 1/n \propto e^{E_g / kT} \rightarrow R = R_0 e^{E_g / 2kT} \quad (5)$$

برای تبدیل این تناسب به تساوی از یک ضریب که R_0 می‌نامیم، بهره گرفته‌ایم. پس داریم:

$$\ln(R/R_0) = E_g / 2kT \quad (6)$$

$$\ln R - \ln R_0 = E_g / 2kT \quad (7)$$

می‌بینیم که نمودار $\ln R$ بر حسب $1/T$ خط راستی با که شیب آن برابر است با:

$$m = E_g / 2k \quad (8)$$

و عرض از مبدأ آن $\ln R_0$ است. پس با رسم تغیرات لگاریتم مقاومت یک نیمرسانا بر حسب دما و برازش خطی داده‌های تجربی، می‌توان گاف انرژی را از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_g = 2mk \quad (9)$$

مقاومت نیمرسانا را می‌توان به کمک یک دستگاه مناسب یا پل و تستون اندازه گرفت و با تغییر دما می‌توان داده‌های مناسبی فراهم کرد و با رسم منحنی $\ln R$ بر حسب دما و برازش خطی، گاف نیمرسانا را به دست آورد. در یک فلز مقاومت با افزایش دما، افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش برخورد الکترون‌های رسانشی با شبکه (فونون‌ها) است. این افزایش تقریباً خطی است، بهویژه اگر بازه‌ی دمایی مورد نظر بزرگ نباشد و می‌توان نوشت:

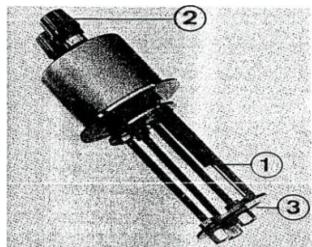
$$R = R_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad (10)$$

که در آن R مقاومت در دمای T ، R_0 مقاومت در دمای T_0 و α ضریب دمایی مقاومت است که می‌توان آن را با رسم تغیرات R بر حسب T به دست آورد. نیز برای یک نمونه با درازا (L) و سطح مقطع (A) ثابت می‌توان نوشت:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad (11)$$

وسایل آزمایش: ماژول فلز و نیمرسانا، کوره‌ی الکتریکی، دماستجو تا 300 درجه سانتی گراد، مولتی‌متر، سیم‌های رابط.

نکاتی در مورد ابزارهای آزمایش:
شکل زیر ماژول را نشان می‌دهد که از سه بخش تشکیل شده است:

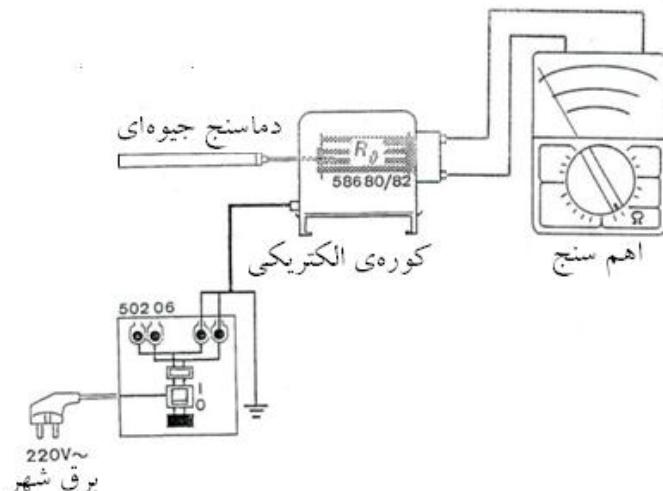


مقاومت نیم رسانا

- ۱- سیم پلاتین یا نیم رسانای گالیوم آرسناید که در یک لولهٔ شیشه‌ای است،
- ۲- فیش‌های دو سر مقاومت برای مقاومت سنجی و
- ۳- جای دما‌سنج.

روش انجام آزمایش:

نخست باید تعیین کنید که دو مژولی را که در اختیار دارید کدام یک نیم رسانا و کدام یک فلز است. برای این منظور پس از بستن مدار و پیش از روشن کردن کوره، دمای اتاق و مقاومت مژول در دمای اتاق را یادداشت کنید. حال کوره را روشن کنید و برپایهٔ کاهش یا افزایش مقاومت تعیین کنید که مژولی که در کوره است، نیم رسانا یا فلز است. مدار شکل زیر را ببندید.



انرژی گاف، مقدار انرژی‌ای است که هر الکترون باید داشته باشد تا از نوار ظرفیت به نوار رسانش برود. مژول نیم رسانا (یا فلز) را درون کوره قرار دهید و با دما‌سنج، دما را می‌پاییم تا به 200 درجهٔ سانتی‌گراد برسد. سپس کوره را خاموش می‌کنیم. دما تا حدود 220 درجهٔ سانتی‌گراد باز هم بالا خواهد رفت. برای رسیدن به تعادل گرمایی بهتر مقاومت نیم رسانا (یا فلز) را به هنگام سرد شدن از این دما تا 80 درجهٔ سانتی‌گراد، هر 10°C اندازه‌گیری و در جدول یادداشت کنید. با رسم نمودار $\ln R / T$ گاف انرژی را از شب نمودار به دست آورید.

$\theta (\text{ }^{\circ}\text{C})$	$R (\Omega)$	$T (\text{K})$	$\ln R$	$(1/T)(10^3/\text{K})$

اکنون این مژول را از مدار برداشته و مژول دیگر را جایگزین آن کنید و همانند آزمایش پیش جدول زیر را پر کنید. به یاد داشته باشید که پیش از قرار دادن مژول در کوره، مقاومت آن را اندازه بگیرید.

T (K)	R (Ω)

اکنون نمودار R بر حسب T را برای مقاومت فلزی رسم کنید.
برای این مقاومت دیده می شود که نمودار به دست آمده خطی است. یعنی مقاومت فلز با افزایش دما، افزایش می یابد. با محاسبه شیب نمودار ضریب دمایی فلز را تعیین کنید. مقدار آن را با مقدار ضریب دمایی پلاتین (از یک مرجع معتبر) مقایسه کنید.

پرسش:
چطور می توان خطای آزمایش را کاهش داد؟

آزمایش شماره‌ی ۸

فیزیک نیم رساناها: بررسی وابستگی منحنی جریان-ولتاژ یک فوتومقاومت به شدت نورفرودی

این آزمایش در دو بخش انجام می‌شود. در بخش اول به بررسی تاثیر طول موج نور فروندی و در بخش دوم به بررسی تاثیر شدت نور فروندی بر فوتوجریان می‌پردازیم.

نظریه‌ی آزمایش:

مقاومت‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های گوناگون دسته‌بندی کرد. از یک دیدگاه مقاومت‌ها به دو دسته‌ی:
۱- مقاومت‌های ثابت (کربنی، لایه‌ای و سیمی) و ۲- مقاومت‌های کوکشدنی (Tunable) دسته‌بندی می‌شوند. دسته‌ی نخست مقاومت ثابتی دارند، اما مقاومت دسته‌ی دوم را می‌توان از بیرون با سازه‌ای کوک کرد. مقاومت‌های کوکشدنی عبارت‌اند از: الف) وابسته به دما^۵ ب) وابسته به نور^۶ ج) وابسته به ولتاژ^۷ و د) وابسته به میدان مغناطیسی^۸.

در این آزمایش با یکی از این مقاومت‌های کوکشدنی یعنی LDR ها آشنا می‌شویم. در LDR ها، مقاومت به طول موج (یا هم‌ارز آن با بسامد یا انرژی) و شدت نور فروندی بستگی دارد. این مقاومت‌ها در تاریکی مقاومت بسیار بزرگی (از مرتبه‌ی مگا‌اهم) و در روشنایی مقاومتی کم (از مرتبه‌ی کیلو اهم یا اهم) دارند. به این مقاومت‌ها، فوتومقاومت یا LDR می‌گویند. برای آن‌که نور به فوتومقاومت برسد، لازم است سطح آن را با شیشه یا یک ماده‌ی شفاف دیگر پوشانیم. این مقاومت‌ها در مدارهای الکترونیکی به عنوان آشکارساز نور و نیز برای نورسنجی به کار می‌روند. در شکل ۱ عکسی از چند نمونه‌ی گوناگون LDR و علامت این قطعه در مدارهای الکترونیکی آمده است.



شکل ۱-الف) علامت مداری LDR و ب) عکس‌هایی از چند LDR

از جمله کاربردهای این مقاومت‌ها می‌توان به کاربرد آن در دوربین‌های عکاسی، کلیدهای نوری و چشم‌های الکترونیکی اشاره کرد. از پرکاربردترین کاربردهای LDR مدارهای فتوسل است که با آن سامانه‌های

⁵ Temperature Dependent Resistor, TDR

⁶ Light Dependent Resistor, LDR

⁷ Voltage Dependent Resistor, VDR

⁸ Magnetic Dependent Resistor, MDR

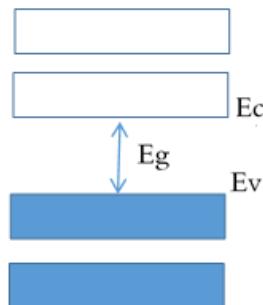
روشنایی گذرهای خودکار، روشن و خاموش می‌شود. شکل ۲ عکسی از چنین سامانه‌ای را نشان می‌دهد. این مدار در آزمایشگاه وجود دارد و می‌توانید به خوبی کارکردش را بینید.



شکل ۲- یک مدار فتوسل

فیزیک فوتومقاومت‌ها:

همان‌گونه که می‌دانیم در دمای صفر مطلق (یا کلوین) همهی نوارهای انرژی نیمرسانانها و نارسانانها (عایق‌ها) یا همگی خالی یا همگی کاملاً پرشده‌اند و یک گاف انرژی بالاترین نوار پر را از نوارهای خالی جدا می‌کند، شکل ۳.



شکل ۳: چگونگی پر شدن نوارهای انرژی یک عایق. 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 نارسانانها این گاف انرژی بزرگ است. $E_g > 5\text{eV}$

منظور از بزرگی E_g آن است که $E_g \gg kT$ ، 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 نیمرسانان در صفر مطلق همانند یک نارسانان 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:

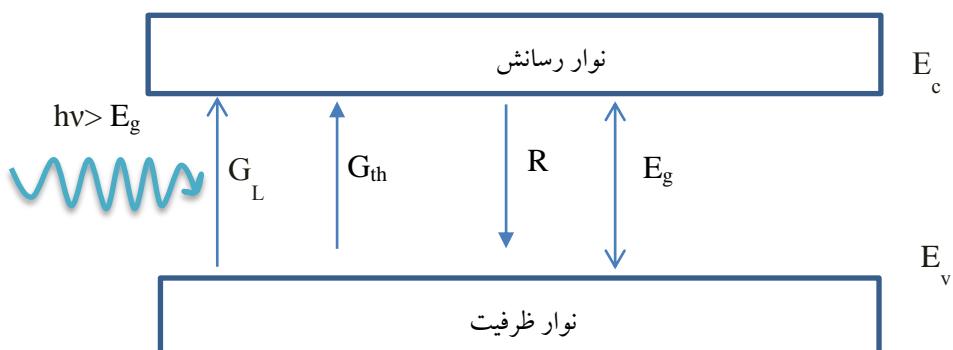
$$\rho = m/ne^2\tau \quad (1)$$

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 الکtron است. ضریب دمایی مقاومت ویژه α ، برابر با تغییر نسبی مقاومت ویژه ρ ، به ازای یکای تغییر دما است:

$$\alpha = \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{d\rho}{dT} \right) \quad (2)$$

مقاومت ویژه فلزها با بالارفتن دما افزایش می‌یابد ($d\rho/dT > 0$) زیرا با افزایش دما، شمار آهنگ برخوردها افزایش می‌یابد. پس با افزایش دما τ ، کاهش می‌یابد. در فلزها چگالی حامل‌های بار تقریباً مستقل از دماست. مقاومت ویژه نیم‌رساناهای با افزایش دما کم می‌شود ($d\rho/dT < 0$). زیرا اگرچه در نیم‌رساناهای هم با افزایش دما آهنگ برخوردها افزایش می‌یابد و τ کاهش می‌یابد، اما چگالی حامل‌های بار، n و یا p ، با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد.

نیم‌رساناهای به دو دسته‌ی ذاتی و ناذاتی دسته‌بندی می‌شوند. در نیم‌رساناهای ذاتی، چگالی الکترون (n) دقیقاً با چگالی حفره (p) برابر است، در نتیجه $n_i = p = n_i$ که چگالی حامل‌های ذاتی حامل‌ها است. پس می‌توان گفت $n^2 = np = n_i^2$ ، که به آن قانون اثر جرم می‌گویند و برای هردو گونه نیم‌رساناهای ذاتی و ناذاتی در ترازمندی گرمایی درست است. در نیم‌رساناهای ناذاتی، افزایش یک گونه از حامل‌ها، به کاهش گونه‌ی دیگر، از راه بازترکیب، 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 فرآیند را "تولید حامل" می‌نامند که در شکل ۴ با G_{th} ^۹ 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 "بازترکیب"^{۱۰} نامیده می‌شود و در شکل ۴ با R نمایش داده شده است.



شکل ۴- نمایش فرآیندهای تولید و بازترکیب.

^۹ Thermal Generation

^{۱۰} Recombination

E_g انرژی گاف، R آهنگ بازتر کیب، G_{th} آهنگ تولید گرمایی، G_L آهنگ تولید با نور، E بالاترین انرژی نوار ظرفیت، E_c پایین ترین انرژی نوار رسانش است. در ترازمندی گرمایی، آهنگ تولید و آهنگ بازتر کیب 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 فرایند، که "تزریق حامل" نامیده می‌شود، می‌تواند به کمک ابزارهای نوری یا الکترونیکی انجام شود. تزریق نوری 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^{11} نشان داده شده است. تزریق حامل‌ها، چگالی‌های الکترون‌ها و حفره‌ها را افزایش می‌دهد به گونه‌ای که $pn > n_i^2$. حامل‌های افزون بر n_i را "حامل‌های افزوده" می‌نامند. با این وجود همیشه چگالی الکترون‌ها و حفره‌های افزوده، برابر است، به گونه‌ای که خنثی‌باز فضایی پایدار می‌ماند.

آهنگ بازتر کیب 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 بازتر کیب مستقیم را چنین نوشت:

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

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

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

که زیرنویس ۰ 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 بازتر کیب 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 ۵ و ۶ برابر باشند. پس:

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

که U آهنگ "بازتر کیب خالص" است. با جای گذاری معادلات (۴) و (۵) در (۷) 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 خنثی‌باز فضایی برقرار باشد، معادله‌ی (۸) 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 نیم‌رساناهای به صورت زیر نوشت:

¹¹ Light Generation

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

که در آن \mathbf{J} چگالی جریان کل، \mathbf{E} شدت میدان الکتریکی کاربستی، σ رسانندگی، e بار الکترون، μ_n تحرک پذیری الکترونها و μ_p تحرک پذیری حفره‌ها است با وجود 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:

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

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 بین دو الکترود است.

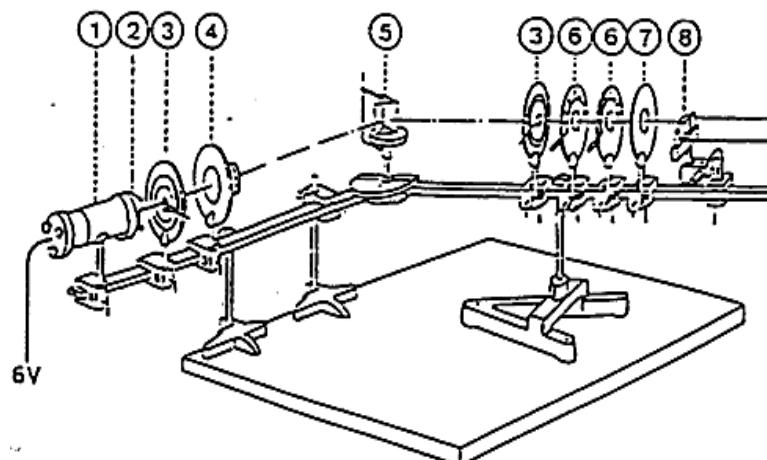
بخش اول: هر بار برای یک شدت نور فروپی ثابت، جریان گذرنده از فوتومقاومت بر حسب ولتاژ کاربستی را اندازه‌گیری و منحنی مشخصه V-I فوتومقاومت رسم کنید.

وسایل آزمایش:

منبع تغذیه، لامپ، عدسی هم گرا، شکاف‌های تنظیم شدنی، منشور شیشه‌ای فلینت، فوتومقاومت، سیم‌های رابط و دو عدد مولتی‌متر برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان.

روش آزمایش:

الف) دستگاه نوری را همانند شکل زیر بیندید.



۱-چشم‌های نور

۲-عدسی هم گرا

۳-شکاف تنظیم شدنی

۴-عدسی هم گرا

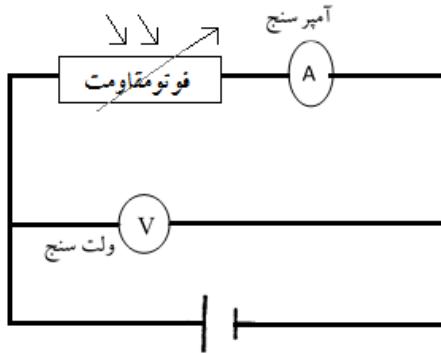
۵-منشور شیشه‌ای فلینت

۶-پولاریزور و آنالیزور مدرج

۷-عدسی هم گرا

۸-فوتومقاومت با پوشش

ب) مدار الکتریکی آزمایش را همانند شکل زیر بیندید.



پ) با تنظیم پهنهای 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 پهنهای آن دست کم برابر یا بیشتر از پهنهای شکاف دوم باشد.

برای نمونه پهنهای شکاف اول بیشتر از $\frac{1}{3}$ میلی‌متر و پهنهای شکاف دوم کمتر از $\frac{1}{3}$ 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، اتفاق آزمایش را تاریک کنید و دور لامپ را با چیزی پوشانید.

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

ج- پلاریزور 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، J 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 به طور 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 فتوجریان (I_{ph}) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

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

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 یک بار (با هر α ای) اندازه بگیرید.

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

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

$V \pm \Delta V$	$I_{ph}(\alpha = 0^\circ) \pm \Delta I$	$I_{ph}(\alpha = 30^\circ) \pm \Delta I$	$I_{ph}(\alpha = 45^\circ) \pm \Delta I$	$I_{ph}(\alpha = 60^\circ) \pm \Delta I$	جريان تاریکی I_0
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.

بخش دوم:

بررسی تاثیر تغییر شدت نور تابشی (تغییر زاویه‌ی α) بر فوتوجریان

در این آزمایش هر بار برای یک رنگ و یک ولتاژ ثابت، فوتوجریان با تغییر شدت نور فرودی بر فوتومقاومت (با تغییر زاویه α ، اندازه‌گیری و مشخصه $I - \cos^2\alpha$ فوتومقاومت رسم می‌شود).

روش آزمایش:

آزمایش را همانند چینش بخش پیش برپا و نور سبز (یا قرمز یا بنفش) را ببروی فوتومقاومت بتابانید. فوتوجریان را برای ولتاژهای خواسته شده اندازه‌گیری و در جدول زیر یادداشت کنید (خطا فراموش نشود). دقت کنید که باید جریان تاریکی (I_0) را برای هر ولتاژ یک‌بار اندازه‌گیری کنید.

نمودار مشخصه‌ی $I - \cos^2\alpha$ فوتومقاومت را رسم کرده و نتایج آن را تعبیر کنید. با همان نتایج جدول زیر را نیز کامل کنید (خطا فراموش نشود).

$\alpha (^\circ)$	$\cos^2\alpha$	۲۵V	۵۰V	۱۰۰V
		I_{tot}	I_{tot}	I_{tot}
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
		$I_0 =$	$I_0 =$	$I_0 =$

نمودار فوتومقاومت ($V/I_{ph} = R_{ph}(\Omega)$) و توان فتوالکتریک ($VI_{ph} = P_{ph}(W)$) را بر حسب $\cos^2\alpha$ رسم کنید.

نمودارها را بررسی و تعبیر کنید.

α	$\cos^2\alpha$	$V = 50 \text{ V}$			$V = 100 \text{ V}$		
		$I_{ph}(A)$	$V/I_{ph} = R_{ph}(\Omega)$	$VI_{ph} = P_{ph}(W)$	$I_{ph}(A)$	$V/I_{ph} = R_{ph}(\Omega)$	$VI_{ph} = P_{ph}(W)$
°							
10							
20							
30							
40							
50							
60							
70							
80							
90							

پس از انجام آزمایش، ابزارهای اندازه‌گیری را خاموش و میز خود را مرتب کنید.

پرسش‌ها:

- ۱- رابطه (۱) را به دست آورید.
- ۲- در تغییر پله از ولتاژهای ۲۰ ولت به بالا چه تغییری در دقت آزمایش به وجود آمد؟
- ۳- نمودارهای مشخصه $I - \cos^2\alpha$ را برای نورهای قرمز و بنفش مقایسه کنید. این نمودارها چه ارتباطی با نمودار مشخصه $I - V$ دارند؟
- ۴- چگونه می‌توان خطاهای را در این آزمایش کاهش داد؟
- ۵- نتایج اندازه‌گیری‌های خود را با فرمول‌های موجود در نظریه‌ی آزمایش مقایسه و تعبیر کنید.
- ۶- بیشترین خطای خطا به خطای تنظیم زاویه‌ی α میان پلاریزور و آنالیزور مربوط می‌شود. اگر فرض کنیم در مقدار α به اندازه‌ی ۵ درجه خطای داشته باشیم، مقدار خطای نسبی α را محاسبه کنید. برای زوایای بزرگ α ، این خطای نسبی افزایش می‌یابد یا کاهش؟

آزمایش شماره‌ی نه

پدیده‌های لومنسانس Luminescence Phenomena

هدف‌های آزمایش :

- ۱- بررسی پدیده‌های لومنسانس در مواد، به هنگام برانگیخته شدن با پرتو فرا بخش
- ۲- تأیید برانگیختگی فلورسانس با پرتو الکترونی

زمینه نظری آزمایش :

لومینسانس فرایند گسیل نور از حالت‌های برانگیخته‌ی الکترونی است. بسته به اینکه برانگیختگی با چه چشمه‌ای انرژی صورت گرفته باشد، لومنسانس چند گونه دارد. در فوتولومینسانس که یکی از پرکاربردترین گونه‌های لومنسانس است، برانگیختگی با فوتون انجام می‌شود. فلورسانس و فسفرسانس دو گونه‌ای فوتون لومنسانس‌اند. در فرآیند لومنسانس، الکترون‌های ماده هدف که در حالت یا تراز انرژی پایه به سر می‌برند، با گرفتن انرژی از یک چشمه به حالت‌های برانگیخته، با انرژی بالاتر می‌روند. این الکترون‌ها در بازگشت از حالت برانگیخته به حالت پایه، انرژی برانگیختگی خود را به صورت نور تابش می‌کنند.. با توجه به اتلاف انرژی به دلیل درگیری برخی از انتقالات درون مولکولی یا درون اتمی از جمله اتلاف انرژی به صورت گرمایی، انرژی فوتون گسیلی، از انرژی برانگیختگی کمتر است. از آنجا که فرایند لومنسانس، نیازمند دماهای بالا نبوده و در دماهایی پیرامون دمای اتاق هم رخ می‌دهد به نور گسیل شده، نور سرد هم گفته می‌شود. لومنسانس با توجه به نوع انرژی برانگیختگی، به گونه‌های زیر دسته‌بندی می‌شود:

انرژی برانگیختگی	گونه‌ی لومنسانس
درآشامی نور دیدگانی و برانگیختگی - فرابخش	فوتولومینسانس
انرژی واکنش شیمیایی	شیمی‌لومینسانس یا بیولومینسانس
باز ترکیب یون فعال شده به شیوه گرمایی	ترمولومینسانس
تزریق بار در نیمرسانا	الکترولومینسانس
انرژی نور یا ذرات پر انرژی	رادیولومینسانس - کاتدولومینسانس
کار نیروی اصطکاک	تریبولومینسانس
انرژی امواج صوتی	سونولومینسانس

الکترولومینسانس

به باز ترکیب ناگهانی الکترون و حفره در جامدهای نیمه رساناها یا نارساناها که به گذر جریان ناگهانی و شکست دی الکتریک می‌انجامد، الکترولومینسانس می‌گویند. این پدیده پی‌آمد کاربست میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگ است. در الکترولومینسانس فرآیند شکست دی الکتریک به تابش نور از جامد می‌انجامد.

کاتدولومینسانس

در نتیجه‌ی برخورد پرتوی کاتدی (پرتوی الکترونی تولید شده با تفنگ الکترونی) به مواد لومینسانس کننده در حالت جامد صورت می‌گیرد. الکترون‌های پر انرژی در این حالت همانند یک چشم‌های انرژی کار کرده و موجب برانگیختگی از راه انتقالات الکترونی و در نتیجه گسیل فوتون می‌گردند.

فوتولومینسانس

یکی از شناخته شده‌ترین گونه‌های لومینسانس است که در آن برانگیختگی با فوتون‌ها انجام می‌گیرد. از دیدگاه مکانیک کوانتومی، در این فرایند برانگیختگی به ترازهای انرژی بالاتر و سپس بازگشت به تراز انرژی پایین تر با درآشامی و گسیل فوتون همراه است.

فلورسانس

یکی از گونه‌های فوتولومینسانس است که در آن اتم‌ها یا مولکول‌ها، امواج الکترومغناطیسی یا همان فوتون‌ها را درآشامیده، برانگیخته می‌شود و در بازگشت به حالت پایه انرژی افرودهی خود را در قالب فوتون گسیل می‌کند. در مورد پدیده‌ی فلورسانس مدت زمانی که ماده در حالت برانگیخته می‌ماند بسیار کوتاه (در حدود 10^{-8} ثانیه) است و گسیل نور بی‌درنگ پس از برانگیختگی روی می‌دهد. در پدیده فلورسانس فروافت به ترازهای بالاتر از حالت زمینه روی می‌دهد. اگر زمانی که جسم تابش می‌کند پس از برانگیختگی طولانی‌تر شود (تا حدود چند ساعت) به این گونه لومینسانس، "فسفرسانس" گفته می‌شود. در فسفرسانس گسیل نور میان دو تراز با چندگانگی اسپینی روی می‌دهد. با توجه به این که تغییر اسپین نیازمند زمان است، (برای نمونه از حالت سه‌تایی چندگانگی اسپینی روی می‌دهد. با توجه به این که تغییر اسپین نیازمند زمان است، (برای نمونه از حالت سه‌تایی Singlet به حالت یکتایی Triplet) بنابراین فسفرسانس نسبت به پدیده فلورسانس طول عمر بیشتری دارد.

ابزار لازم برای آزمایش:

۱- لامپ لومینسانس	۵۵۵۰۹/۰۵
۲- پایه لامپ لومینسانس	۴۵۱۱۵
۳- لامپ جیوه	۴۵۱۱۹
۴- نگهدارنده لامپ جیوه بر روی میله	۵۶۲۷۳
۵- پالایه‌ی (فیلتر) فرابنفش	۵۲۳۳۷
۶- مبدل $6/12V$ و $30W$	۵۱۰۴۸
۷- منبع تغذیه با ولتاژ بالا (High Voltage)	
۸- سیم‌های رابط	
۹- آهنربا	

طول لوله لامپ: حدود 30 سانتی‌متر

(۱) گرم‌کن و تفنگ الکترونی

مشخصات لامپ لومینسانس

قطر لامپ: حدود 13 سانتی‌متر

(۲) صفحه‌های لومنیسانس از جنس‌های :

Yttrium vanadate doped with europium

وانادات ایتریوم آلاییده با یوروپیوم

Zinc sulfide doped with silver

سولفید روی آلاییده با نقره

Zinc sulfide doped with silver and cobalt

سولفید روی آلاییده با نقره و کبالت

منظور از آلاییدن، جادادن اتم‌ها یا یون‌ها در شبکه‌ی بلور میزبان است، به گونه‌ای که ساختار بلور تغییر نکند.

هشدار:

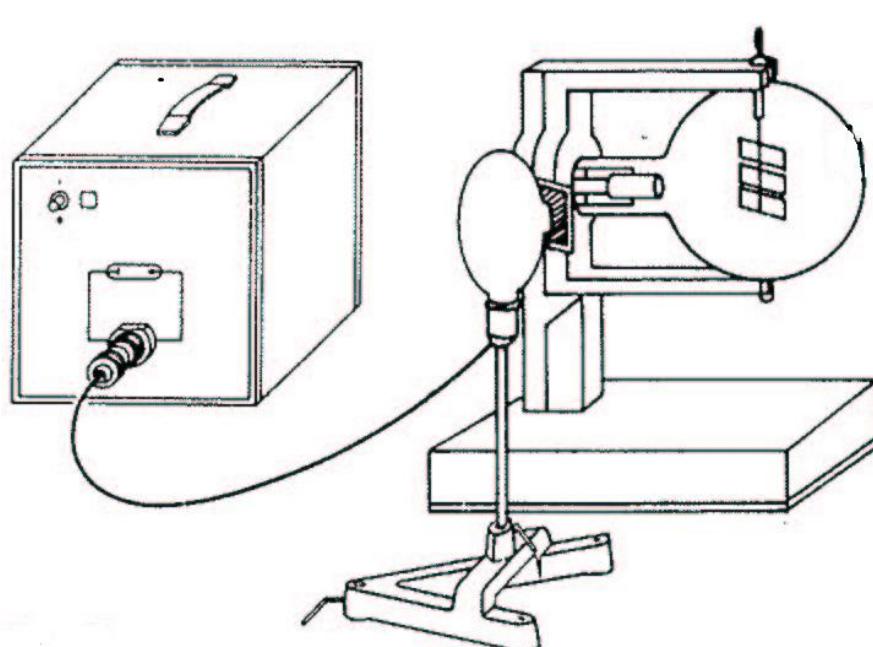
از وارد آوردن فشار بیش از حد بر روی بخش‌های گوناگون لامپ، کشیدن سیم‌های رابط، تکان شدید و به نوسان در آوردن لامپ هنگام روشن بودن گرم کن لامپ خودداری کنید.

✓ آزمایش بایستی در اتفاق تاریک انجام شود

انجام این آزمایش دو مرحله دارد:

مرحله اول فلورسانس و فسفرسانس با تابش فرابنفش

مداری مطابق شکل زیر بیندید:



۱- لامپ جیوه

۲- جاب لومنیسانس

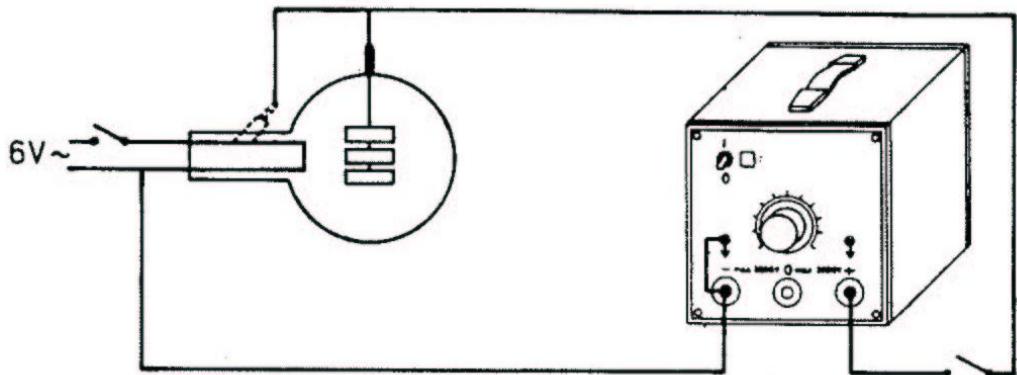
۳- فیلتر ماوراءبنفش

لامپ جیوه را روشن کنید. پس از چند دقیقه آن را خاموش کرده و آن‌چه را می‌بینید، یادداشت کنید. سپس پالایه فرابنفش را جلوی لامپ جیوه قرار دهید و لامپ را روشن کنید. پس از خاموش کردن لامپ آن‌چه را می‌بینید یادداشت کرده و با بخش پیش مقایسه کنید.

مرحله دوم آزمایش:

پدیده فلورسانس با تابش الکترونی

مداری مطابق شکل زیر بیندید:



(۱) حباب لومینسانس (۲) منبع تغذیه با ولتاژ بالا (۳) مبدل ۶ ولت و ۳۰ آمپر

منبع تغذیه با ولتاژ بالا را روشن کرده و با دقت تمام، ولتاژ را آرام افزایش دهید تا لومینسانس را ببینید ($1kV$). آنچه می‌بینید را با آنچه در مرحله اول آزمایش دیده‌اید، مقایسه کنید. دوباره منبع تغذیه را روشن کرده و این‌بار آهن‌ربا را به لامپ نزدیک کنید، و آنچه می‌بینید یادداشت کنید و دلیل آن را بنویسید. جهت میدان مغناطیسی را مشخص نمایید.

آزمایش را دوباره انجام داده و با افزایش ولتاژ تا $3kV$ تغییراتی که می‌بینید یادداشت نمایید.

آزمایش شماره‌ی ۱۰

بررسی گذارهای فاز با میکروسکوپ نوری

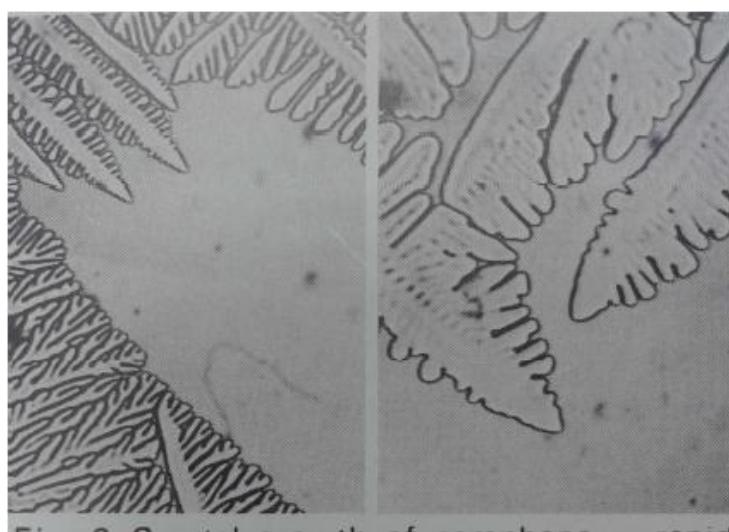
هدف آزمایش: دیدن گذارهای فازی گوناگون میان فازهای جامد، مایع و گاز و بررسی وابستگی گونه‌ی بلور تشکیل شده به آهنگ‌های گرمایش یا سرمایش.

زمینه نظری آزمایش:

ویژگی‌های فیزیکی مواد با تغییر فاز تغییر می‌کنند. یکی از این ویژگی‌ها، ویژگی نوری است. این ویژگی را می‌توان با میکروسکوپ پلاریزان بررسی کرد. میکروسکوپ پلاریزان دستگاهی ساده و در دسترس برای انجام برخی اندازه‌گیری‌های نوری است. در این دستگاه نور قطبیده‌ی خطی به نمونه تابانده و چرخش صفحه‌ی قطبش اندازه‌گیری می‌شود. تحلیل این چرخش، اطلاعاتی درباره‌ی ویژگی نوری نمونه مورد آزمایش در اختیار ما قرار می‌دهد. میکروسکوپ پلاریزان برای بررسی مواد با شکست دوگانه مانند بلور کلسیت مناسب است. کانی‌شناسان و زمین‌شناسان این دستگاه را به گستردگی برای شناسایی فازهای گوناگون یک نمونه‌ی طبیعی به کار می‌برند.

الف) تغییر فاز از مایع به جامد:

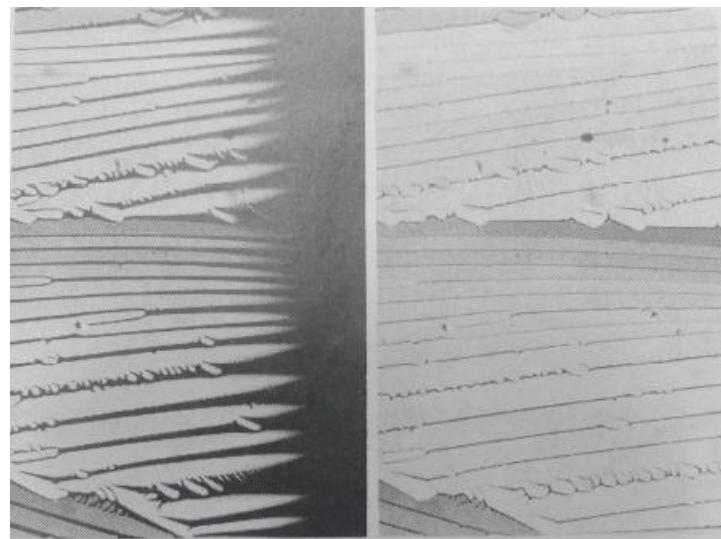
هنگامی که یک مذاب منجمد می‌گردد، مرز مایع-جامد می‌تواند با شکل‌های گوناگون ایجاد شود. بلور رشد یافته، می‌تواند به صورت صفحه‌ای (شکل ۱۳-g)، سلولی دندانه‌ای (شکل ۲ و ۳) یا نیزه‌ای (شکل ۴) باشد. در شکل (۱۳ a) نمونه‌ای از بلور رشد یافته‌ی دندانه‌ای که با نور پلاریزه به دست آمده، دیده می‌شود. فلزها بیشتر گرایش به رشد دندانه‌ای شکل دارند، در حالی که مولکول‌های بلند بیشتر گرایش به رشد صفحه‌ای دارند.



شکل‌های ۲ و ۳: سردسازی سریع و کند (بلور کامفین)

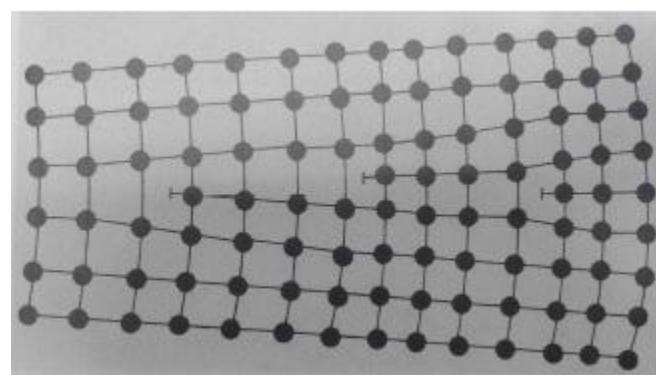
یک استثنا در این میان کامفین است که به شکل دندانه‌ای رشد می‌کند. پس نماینده‌ی خوبی برای بلور فلزهاست. در فهرست مثال‌هایی که در این آزمایش هست، اغلب رشد بلور بسیار ناهمسانگرد است. جهت رشد

بلور در جهت گرادیان دمایی است. شکل مرز مایع-جامد به آهنگ سرمایش مایع و شیب دمایی بستگی دارد. هرچه آهنگ سرمایش مایع بزرگ‌تر باشد، بلورهای کوچک‌تری تشکیل می‌شود. در نتیجه ریزساختارهای آن مرتب‌تر خواهد شد. این موضوع در مقایسه‌ی شکل ۳ و ۴ که با بزرگنمایی یکسان عکس‌برداری شده است، به روشنی دیده می‌شود.



شکل‌های ۴ و ۵: مرزهای دانه‌ای با زاویه‌ی کم در محلول نفتن و اسید سوبریک.

معمول‌ترین کاستی که در بلورهای دوبعدی ایجاد می‌شود، مرزدانه است. شکل ۶ نمایش طرحواره‌ای از این کاستی با زاویه‌ی کوچک است که در رفتگی نامیده می‌شود. (شکل ۴ چگونگی پدید آمدن مرزهای دانه‌ای از این نوع را در فرایند انجماد نشان می‌دهد. (شکل ۵) همان بخش از تصویر، پس از اتمام تبلور نشان می‌دهد که تمایز میان مرزهای دانه‌ای مختلف به روشنی دیده می‌شود. شکل بلور به سرعت سرد کردن مایع یا گرادیان دمایی نیز وابسته است. هرچه سرعت سرد شدن مایع بیشتر باشد، بلورها کوچک‌تر تشکیل می‌شوند. ساختار آن‌ها نیز یکپارچه‌تر و مرتب‌تر خواهد شد.



شکل ۶: مرزدانه با زاویه‌ی کم

(ب) تغییر فاز از مایع به مایع بلوری

فاز بلور مایع، فازی است که از دیدگاه ماکروسکوپی چگالی آن به عنوان مایع کم، اما از دیدگاه میکروسکوپی، پیوند بلوری آن محکم‌تر از آن است که مایع فرضش کرد. اگر ماده‌ای به ظاهر مایع مانند MBBA در نور پلاریزه دیده شود (شکل ۱۳)، به خاطر تاثیر رنگ ساختارهای مولکولی منظمی دیده می‌شود. این پدیده نشان‌دهنده حساسیت نوری و ناهمسانگردی بلور است. شکل (d) گذار فاز از مایع معمولی به مایع بلوری را نشان می‌دهد.

ج) تغییر فاز از جامد به جامد

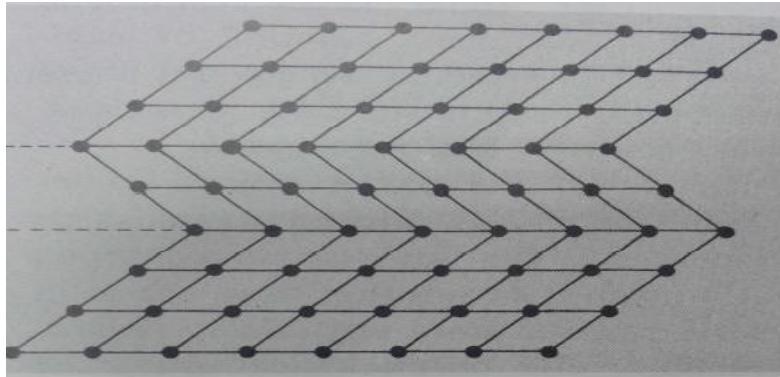
اگر نیترات آمونیوم تا بالاتر از دمای ذوب آن (170°C) گرم شود و سپس سرد گردد، نخست به بلوری با ساختار مکعبی متبلور می‌شود. این ساختار ویژگی اپتیکی ویژه‌ای ندارد. به عبارت دیگر در گذر از پلارویدهای متقاطع، سیاه به نظر می‌رسد. گذار فاز در دمای حدود 45°C کم‌تر از دمای ذوب رخ می‌هد. در این دما، شبکه از حالت مکعبی به شش گوشی تغییر می‌کند. شبکه شش گوشی ویژگی اپتیکی دارد و با رنگ‌های روشن قابل تشخیص است. در (شکل ۱۳b) حالت بلور در مرز میان دو ساختار دیده می‌شود. اگر نیترات آمونیوم سردتر شود، ساختارهای بلوری بیشتری در نور پلاریزه دیده می‌شود. افزون بر گذار فاز عادی که با پدیده‌ی پخش کنترل می‌گردد، تغییر فاز همیار نیز وجود دارد. این تغییر به صورت ناگهانی رخ می‌دهد. گذار فاز مارتزیتی در فولاد از نمونه این نوع تغییر فاز است. در این گذار فاز، مناطق ماکروسکوپی ساختار بلوری، به طور همزمان تغییر می‌کنند. ترکیب مناسبی از نفتین و اسید سوبریک، این گذار فاز را نشان می‌دهد. البته گذار فاز در این ترکیب از حالت مایع به جامد است ولی به خوبی تغییر فاز همیار جامد به جامد را نشان می‌دهد. در (شکل ۷) تبلور این ماده دیده می‌شود. هرچه این ترکیب سردتر شود، پشت زمینه‌ی سیاه آن روشن می‌شود (شکل ۸). فرایند انجماد سریع است به سختی دیده می‌شود.



شکل ۷-۸: انتقال فاز مارتزیت، انجماد ناگهانی مذاب باقی‌مانده سوبریک اسید و نفتن

ترکیب نفتین و اسید سوبریک گذار فاز مشترک نمایشی و کاذب است. در مقایسه با این ترکیب، ترکیب سالول و اسید سوبریک گذار فاز همیار واقعی دارند. این پدیده را دوقلوزایی می‌نامند. در این گذار فاز، ساختار بلوری

تغییر اساسی مانند گذار مارتنتزیتی ندارد، بلکه جابجایی صفحات بلوری روی همدیگر انجام می‌شود. به هنگام پدیده‌ی دوقلوزایی جابجایی نقص شبکه ایجاد می‌شود. در (شکل ۹) پدیده‌ی دوقلوزایی را می‌بینید. بخش‌های بلوری با جهت‌گیری شبکه‌ای یکسان، در بالا و پایین لایه‌ی دوقلوزایی، صفحه‌های شبکه را نشان می‌دهند. تغییرات صفحه‌ها، بازتابی از تغییرات و پیشروی صفحه شبکه لایه‌ی مزبور می‌باشد. صفحات بالا و پایین همانند همدیگر هستند.

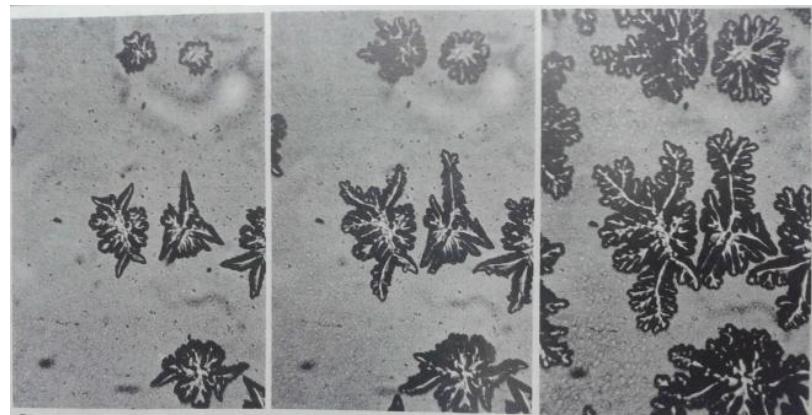


شکل ۹: لایه‌ی میانی تغییر فاز دوقلوزایی

نام نهادن گذار دوقلوزایی به خاطر همین موضوع است. صفحات شبکه در بعد سوم (عمود بر صفحه‌ی تصویر) کاملاً شبکه‌ی بی نقص می‌باشند. وقتی ترکیب سالول و اسید سوبریک آغاز به انجام نمود، نخست فازی بی‌حال دوقلویی ایجاد می‌شود (شکل h1۳). با کمی سرد کردن، حالت دوقلو به صورت خودبه‌خودی ایجاد می‌شود. مرزهای دوقلوزایی با نوارهای موازی در (شکل ۱۳^a) دیده می‌شود. با بیشتر سرد کردن، نوارها، نقص‌های شبکه و حالت دوقلوزایی دوباره ناپدید می‌شوند و حالتی مانند (شکل h1۳) پدیدار می‌شود. فاز دوقلو در دمای بالا و پایین برگشت‌پذیر است. اگر دما تا نزدیکی دمای ذوب بالا برود، تغییر فاز خواهیم داشت و ساختار بلوری دوباره تغییر می‌کند. شروع این تغییر فاز را در (شکل k1۳) می‌بینید. این فاز جدید حتی اگر دوباره سرد شود، پایدار است. فازی که در شکل (۱۳^a) و (K1۳) دیده شد با تغییر دما تکرار نمی‌شود. برای این منظور می‌بایست دوباره ذوب و منجمد نمود. این پدیده‌ی جالب بیانگر آن است که ساختارهای شبکه‌پایدار موجودند. سالول و اسید سوبریک در حالت شبکه پایدار منجمد شده و ساختار پایدار آن تنها با تحریک حرارتی کافی ایجاد می‌شود.

۵) تغییر فاز از جامد به گاز و از گاز به جامد

بلورها را می‌توان از حالت مذاب، محلول و بخار ایجاد می‌شود. بلورهایی که در فاز بخار، متبلور می‌شوند، بلور تضعید نامیده می‌شوند. این نوع بلور از لحاظ خلوص و کیفیت بهتر از دیگر بلورهای است. برای نشان دادن فرایند تضعید (فرازش)، مقداری کام芬 را بر روی لامل قرار می‌دهیم. (مقدار زیاد کام芬، با گرمای کمی بخار می‌شود). در لبه‌های لامل که خنک‌تر است، بلور رشد می‌یابد. در تغییر فاز از جامد به گاز و از گاز به جامد، فاز مایع رخ نمی‌دهد. حالات تغییر فاز کام芬 در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۰، ۱۱، ۱۲: رشد بلور تضعیف کامفین



b13: گذار حالت نیترات آمونیوم، جامد به جامد (مکعبی به شش گوشی)



a13: رشد بلور دندانه‌ای (اسید سوبریک-سالول)



d13: بلور مایع MBBA (تغییر از مایع به مایع)



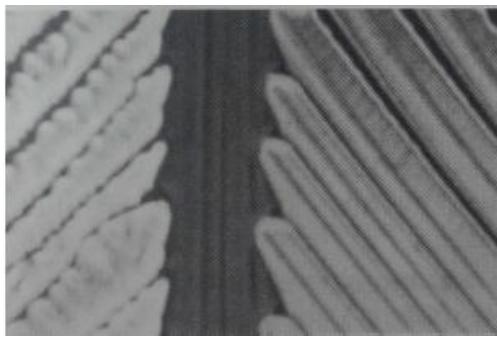
c13: بلور مایع MBBA



f13: رشد بلور صفحه‌ای (سالول) سرد کردن سریع



e13: رشد بلور صفحه‌ای (سالول) سرد کردن آرام



h13: فاز شبیه پایدار اسید سوبریک-سالول



g13: نخست سرد کردن سریع و سپس آرام (سالول)



k13: انتقال به فاز پایدار در اسید سوبریک-سالول



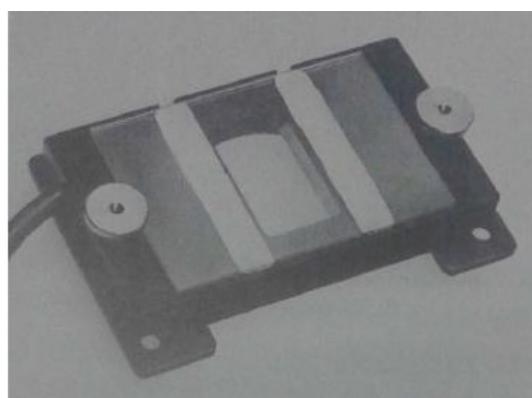
l13: فاز شبیه پایدار با حالت دوقطبی (اسید سوبریک-سالول)

ابزار آزمایش:

میزچهی گرمکن، مواد گوناگون (مانند سوبریک اسید، آمونیوم نیтрат، کامفین، سالول و MBBA)، پلاریزور و آنالیزور، لامل بزرگ و کوچک، منبع تغذیه ۴۲ ولت-۰/۵ آمپر، میکروسکوپ با بزرگنمایی ۴۰ تا ۱۰۰ برابر و آمپرسنج.

میزچهی گرمکن:

برای گرم کردن نمونه‌ها، میزچهی گرمکن به کار می‌رود. جنس آن معمولاً از رسانای الکتریکی شفاف مانند SnO₂ یا ITO است.



میزچهی گرم کن

اگر جریان الکتریکی از این لایه بگذرد، اتلاف اهمی میزچه، نمونه را گرم می کند. در لایه‌ی نازک SnO_2 گرمای مناسبی را ایجاد می نماید. پلاریزور به صورت ورقه‌ی تیره رنگ است. آنالیزور در نگهدارنده‌ای دایروی به اندازه‌ی چشمی میکروسکوپ قرار دارد.

نکته: برای جابجایی مواد به کار برد شده در این آزمایش نیازی به ابزار ویژه‌ای نیست.

آزمایش:

میزچه‌ی گرمکن را روی میزچه‌ی میکروسکوپ قرارداده و با سیمه‌های رابط به مولتی‌متر و منبع تغذیه وصل کنید. توجه کنید که منبع تغذیه خاموش باشد و آمپرسنج به صورت سری متصل باشد. گزینش گرمولتی‌متر را بر روی جریان متناوب تنظیم کنید. پلاریزور را ببروی لامپ میکروسکوپ و آنالیزور چشمی را ببروی چشمی میکروسکوپ بگذارید. بدین ترتیب یک میکروسکوپ پلاریزان خواهید داشت. لامپ میکروسکوپ را روشن کنید.

نکته: برای جلوگیری از آسیب دیدن پلاریزور، آن را به گونه‌ای قرار دهید که به گرمکن و لامپ میکروسکوپ نزدیک نباشد.

یکی از نمونه‌ها را بر روی میزچه‌ی گرمکن قرار داده و با صفر کردن جریان منبع تغذیه، آن را روشن کنید. اکنون جریان را به آرامی افزایش دهید. جریان را روی مقدار 0.05 آمپر به مدت 2 دقیقه بگذارید. نمونه را با میکروسکوپ بینید. اگر تغییر فاز صورت نگرفت، جریان را روی 0.1 آمپر قرار دهید و 2 دقیقه صبر کنید. اگر تغییر فاز هنوز صورت نگرفته، این کار را با 0.15 آمپر و 0.20 آمپر نیز انجام دهید تا تغییر فاز را بینید. هرچه می‌بینید به دقت یادداشت نمایید.

توجه: تغییر زیاد و آنی ولتاژ باعث شکسته شدن صفحه‌ی شیشه‌ای میزچه‌ی گرمکن می شود.

نکته: اگر دما بالاتر از 200°C برود، محافظ پلاستیکی پیرامون میزچه‌ی گرمکن آسیب می‌بیند. بنابراین دقت کنید که زمان روشن بودن میزچه‌ی گرمکن طولانی نشود. توجه کنید که بالاترین دمای مورد نیاز 169°C (دمای ذوب آمونیوم نیтрат) است و به دمای‌های بالاتر نیازی نیست. در صورتی که دوربین همراه دارید با گذاشتن لنز دوربین ببروی چشمی میکروسکوپ، از مراحل ذوب فیلم و عکس بگیرید. در این آزمایش تغییر فاز به خوبی دیده می شود. آنالیزور را قبل از ذوب شدن و در حال ذوب شدن بچرخانید. آنچه می‌بینید، به دقت یادداشت کنید. وقتی تمام قسمت‌های ماده ذوب شد، منبع تغذیه‌ی میزچه‌ی گرمکن را خاموش کنید. طبق دستور هر قسمت از آزمایش آن را سرد کنید.



الف) تغییر فاز از مایع به جامد

لامل محتوی کامفین را بردارید. بر روی میز چه گرمکن قرار داده و طبق روشی که گفته شد، گرم کنید. با دیگر آن را با سرعت سرد کنید. (می‌توانید برای نمونه پنجره را باز کنید تا خنک شود). تمام مراحلی که گفته شد به طور کامل انجام داده و یادداشت نمایید.

ب) تغییر فاز از مایع به بلوری

لامل محتوی MBBA را بردارید. بر روی میز چه گرمکن قرار داده و طبق روشی که گفته شد، گرم کنید. با ذوب شدن نمونه، آن را گذاشته تا سرد شود. تمام مراحلی که گفته شد به طور کامل انجام داده و یادداشت نمایید.

ج) تغییر فاز از جامد به جامد

لامل محتوی نیترات آمونیوم را بردارید. بر روی میز چه گرمکن قرار داده و طبق روشی که گفته شد، گرم کنید. با ذوب شدن نمونه، آن را گذاشته تا کمی سرد شود. (در دمای حدود 45°C کمتر از دمای ذوب) حال دوباره آن را سردتر کنید. تمام مراحلی که گفته شد به طور کامل انجام داده و یادداشت نمایید. لامل محتوی ترکیب سالول-اسید سوبریک را بردارید. بر روی میز چه گرمکن قرار داده و طبق روشی که گفته شد، گرم کنید. با ذوب شدن نمونه، آن را گذاشته تا کمی سرد شود. سعی کنید حالات (شکل h13 و h13) را بینید.

اینک دوباره آن را سردتر کنید. آیا (شکل h13) دوباره تشکیل می‌شود؟

اینک دوباره آن را گرم کنید تا به نزدیکی نقطه ذوب برسد. در این مرحله شکل دیگری ایجاد می‌شود. دوباره آن را سرد کنید. آیا شکل ایجاد شده تغییر می‌کند؟ برای ایجاد (شکل h13 و h13) از نمونه باید چه کار کنیم؟ چرا؟

تمام مراحلی که گفته شد به طور کامل انجام داده و یادداشت نمایید. آزمایش را برای لامل محتوی سالول و لامل محتوی اسید سوبریک جداگانه انجام دهید. سالول را یکبار سریع و یکبار به آرامی سرد کنید.

آیا بلور سالول و اسید سوبریک جدا گانه با ترکیب آنها یکسان است؟ تفاوت و شبهات آنها را بنویسید.

د) تغییر فاز از جامد به گاز و از گاز به جامد

برای نشان دادن فرایند تضعیف، مقداری کامفین را بر روی لامل قرار داده و بر روی میز چهی گرمکن گذاشته و همانند روشهای که گفته شد، گرم کنید. (مقدار زیاد کامفین، با گرمای کمی بخار می‌شود). در لبه‌های لامل که خنک‌تر است، بلور رشد می‌یابد. آیا شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ را در زیر میکروسکوپ می‌بینید؟

پرسش‌ها:

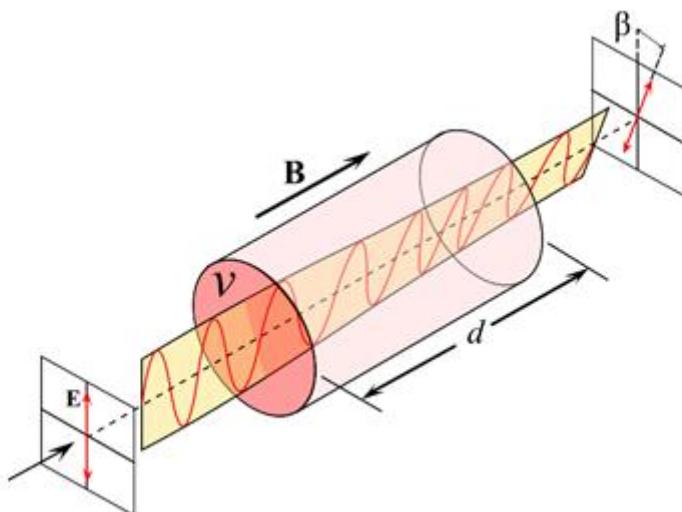
- ۱- چرا هر قسمت بلوری مانند کامفین رنگ متفاوتی دارد؟
- ۲- چرا هر قسمت بلوری مانند کامفین با چرخاندن قطبندی چشمی رنگ هر قسمت تغییر می‌کند؟
- ۳- از نظر اپتیکی، اگر جلوی پرتوی نور دو پلاریزور عمود برهم قرار بگیرند، پرتوی نور کاملاً رد نمی‌شود. چرا با چرخاندن آنالیزور، در بلوری مانند کامفین در همه‌ی زاویه‌ها پرتوی نور بیرون می‌آید؟ توضیح دهید.
- ۴- در مورد چگونگی تغییر فاز مارتزیتی در فولادها، روش‌های ایجاد و سودمندی آن بنویسید.
- ۵- می‌توانید چند نمونه از گذار فازهای مواد نام ببرید؟ آیا چگونگی سرد کردن ماده بر روی ویژگی‌های آنها موثر است؟

آزمایش شماره‌ی ۱۱

بررسی اثر چرخش فارادی

هدف: تعیین ضریب وردہ‌ی شیشه

در سال ۱۸۴۵ مایکل فارادی دریافت که وقتی یک تکه شیشه در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، از دیدگاه ویژگی نوری فعال می‌شود. برای دیدن اثر فارادی، نور باید موازی با جهت میدان مغناطیسی تابانده شود $\mathbf{B} \parallel \mathbf{k}$. که به این حالت، هندسه‌ی فارادی گفته می‌شود، شکل (۱).



شکل ۱: نگاره‌ی چگونگی چرخش صفحه‌ی قطبش یک موج قطبیده تخت در گذر از یک محیط فعال نوری در یک میدان مغناطیسی همان‌گونه که پرتو نور قطبیده خطی در راستای میدان کاربستی پیش می‌رود، صفحه‌ی قطبش می‌چرخد. میزان این چرخش (β) با میدان مغناطیسی کاربستی (B) و مسافتی که نور در ماده پیش می‌رود (L) متناسب است:

$$\beta \propto BL \quad (1)$$

برای تبدیل این تناسب به تساوی، از ضریبی به نام ثابت وردہ ۷ بهره می‌گیرند که مقدار چرخش به ازای یکای میدان و یکای طول است.

$$\beta = vBL \quad (2)$$

ضریب وردہ به جنس ماده، بسامد و دما بستگی دارد و یکای آن در SI برابر rad/Tm (رادیان بر تسلا × متر) است. اثر چرخش فارادی در مواد بی‌نظم و بلورین؛ جامدها، مایع‌ها و گازها دیده شده است، جدول (۱).

اثر فارادی یک اثر فرد است، یعنی اگر یک بار نور در یک راستا از محیط بگذرد و پس از بازتاب از یک آینه مسیر رفته را بازگردد، مقدار زاویه‌ی چرخش دو برابر می‌شود. به عبارت دیگر برهم نهی می‌شود و از همین ویژگی برای بزرگ کردن زاویه‌ی چرخش بهره گرفته می‌شود. همین ویژگی آن را از فعالیت طبیعی نوری

محیط (که زوج است) متمایز می‌کند. اگر ضریب شکست محیط برای قطبش دایره‌ای راست گرد n_+ و برای قطبش چپ گرد n_- باشد می‌توان چرخش فارادی را به شکل: $\theta = \omega L / 2c(n_+ - n_-)$ نوشت.

جدول ۱: ضریب ورده‌ی شماری از مواد.

	V (minutes/Gauss cm)	V (rad/Tesla m)
Fluorite	9E-4	8.07421E-8
Diamond	0.012	1.07656E-6
Crown gla	0.015 - 0.025	1.3457E-6
Flint gla	0.030 - 0.050	2.6914E-6
Sodium ch	0.036	3.22968E-6
Water	0.0131	1.17525E-6
Quartz	0.0166	1.48924E-6
NH4Fe(SO4)	-5.8E-4	-5.20338E-8
Air	6.27E-6	5.62503E-10
CO2	9.39E-6	8.42409E-10

ابزارهای آزمایش:



نگاره‌ای از مایکل فارادی

۱. لیزر سبز دیودی
۲. ترانس اثر فارادی
۳. منبع تغذیه مستقیم ۳۳ ولت / ۳ آمپر
۴. تیغه فعال اپتیکی - یکی
۵. پلاریزور مدرج - یکی
۶. آنالیزور با دقت ۰/۱ درجه - یکی
۷. جک آزمایشگاهی ۲ تا
۸. ریل اپتیکی ۲۵ سانت ۲ تا
۹. سره اپتیکی ۳ تا
۱۰. صفحه تصویر - یکی

چگونگی انجام آزمایش:

۱. دستگاه را مانند شکل (۲) بیندید و برای اندازه گیری پرده را برداشته و به جای آن یک فتو مقاومت بگذارید.
۲. زاویه‌ی میان پلاریزور و آنالیزور را 45° تنظیم کنید.
۳. بلندی نمونه (L) را اندازه بگیرید و آن را به گونه‌ی مناسبی میان دو فک آهنربای الکتریکی بیندید.
۴. اینک پرتو لیزر را به گونه‌ای تنظیم کنید که بر روی فتوسل فرود آید و پس از کاربست ۵۰ ولت به آن، شدت جریان آن (I_0) را یادداشت کنید.
۵. اینک با افزایش جریان سیم پیچ‌ها (I_B)، شدت فرودی را در جدول ۱ یادداشت کنید.

۶. ردیف آخر را پس از سنجه‌بندی میدان مغناطیسی که به دنبال می‌آید و از روی منحنی سنجه‌بندی پرکنید.



شکل ۲: چینش آزمایش اثر چرخش فارادی

۷. جریان فتوسل (I_{Ph}) را از (I_0) کم کنید و منحنی تغییرات آن را بر حسب B رسم کنید.

۸. شب این خط بر پایه‌ی رابطه‌ی (۲) برابر L است. پس با توجه به بلندی نمونه، ضریب وردی (۷) و خطای آن را به دست آورید.

جدول ۱

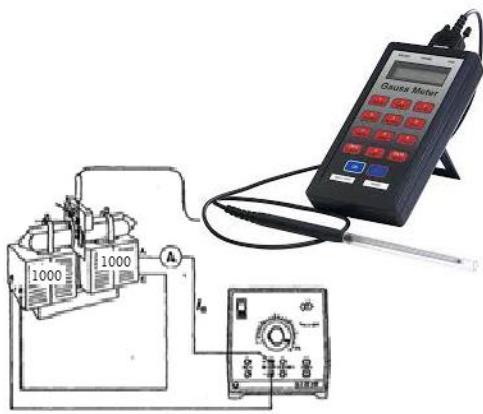
I_B	۱/۰۰	۲/۰۰	۳/۰۰	۴/۰۰	۵/۰۰	۶/۰۰	۷/۰۰	۸/۰۰	۹/۰۰
I_{Ph}									
$B(T)$									

سنجه‌بندی B بر حسب I_B

در این آزمایش میدان مغناطیسی کاربستی با یک آهنربای الکتریکی (با پیچه‌های ۱۰۰۰ دوری) ایجاد می‌شود و بایستی القای مغناطیسی B که این دستگاه ایجاد می‌کند را بر حسب جریان پیچه‌ها I_B سنجه‌بندی کرد. پیش از آن که نمونه را بیرون آورید، جای فک‌ها را با مداد نشانه‌گذاری کنید که پس از برداشتن آن، بتوانید همین فاصله‌ی فک‌ها را دوباره ایجاد کنید. توجه کنید که اگر فاصله‌ی فک‌ها کمتر یا بیشتر از آن‌چه در آزمایش داشته‌اید، باشد القای مغناطیسی به ترتیب بزرگتر و کوچک‌تر از آن‌چه داشته‌اید، بدست می‌آید. دستگاه را مانند شکل ۳ سوار کنید، و گمانه‌ی دستگاه تسلاسنج (یا گاوس‌سنج) را میان دوقطب آهنربای الکتریکی قرار دهید. مغناطش پسماند هسته‌های آهنربای الکتریکی را پیش از سنجه‌بندی آهنربا با کمک استاد درس وامغناطیده کنید. توجه کنید که در گمانه‌های هال آنالوگ، پیش از میدان آهنربای الکتریکی، خود گمانه با یک آهن‌ربای استاندارد سنجه‌بندی می‌شود. چنین دستگاهی در آزمایشگاه وجود دارد و می‌توانید آن را بیینید و با آن کار کنید. بدین منظور برای سنجه‌بندی میدان بر حسب جریان، گمانه هال را میان دوقطب قرار دهید. منبع تغذیه را

روشن کنید و میدان را به ازای جریان‌های گوناگون در جدول زیر یادداشت کنید. بدین منظور ولتاژ منبع تغذیه را افزایش دهید تا بیشنه جریان عبوری را به دست آوردید. **توجه: جریان نباید از ۱۰ آمپر بیشتر شود (بسیار مهم).** سپس بازه‌ی جریان را به گونه‌ای تقسیم کنید که جدول پر شود. در هر گام I_B را ۱ آفزايش دهید. نمودار B بر حسب I_B را رسم کنید. با این منحنی می‌توان میدان را به ازای هر جریان دلخواه به دست آورید. این منحنی را منحنی سنجه‌بندی (کالیبراسیون) می‌نامند.

یادآوری: با توجه به آن که افزایش جریان، قطب‌های آهن ریا را به سوی هم می‌کشد، برای جلوگیری از آسیب دیدن گمانه‌ی هال پیچ‌های نگهدارنده قطب‌ها را کاملاً سفت کنید و قطب‌ها را بیش از حد به هم نزدیک نکنید.



شکل ۳

$I_B \pm 0.01(A)$	۰/۵۰	۱/۵۰	۳/۵۰	۴/۵۰	۶/۵۰	۷/۵۰	۹/۵۰	۱۰/۵۰
$B(T)$								