آزمایشگاه فیزیک پیشرفته

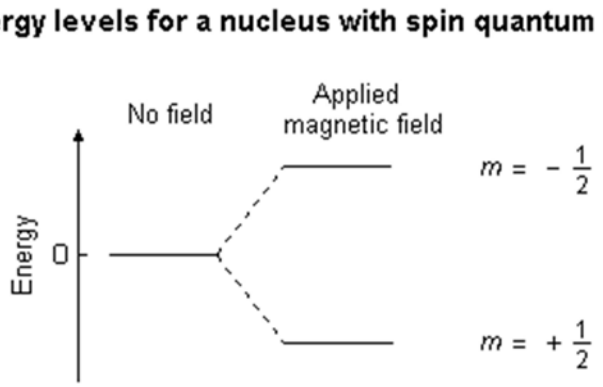
آزمایش تشدید اسپین الکترون

اهداف آزمایش

۱- بررسی پدیده تشدید اسپین الکترون**Electron Spin Resonance,ESR**
۲- اندازه گیری نسبت یا ضریب ژیرومغناطیس **(gyromagnetic ratio)**
۳- وابستگی دامنه‌ی سیگنال و پهنای خط به فرکانس تشدید

۱. مقدمه

برهمکنش اسپین با میدان مغناطیسی و شکافتگی ترازهای آن یکی از موضوعاتی است که از دهه ۵۰ به بعد مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در حالت کلی یک ذره یا مولکول با اسپین s در میدان مغناطیسی به $2s+1$ تراز انرژی شکافته می‌شود شکل (۱). یکی از پارامترهای مهم در میزان شکافتگی قدرت میدان مغناطیسی است و با افزایش قدرت میدان، میزان شکافتگی افزایش می‌یابد.

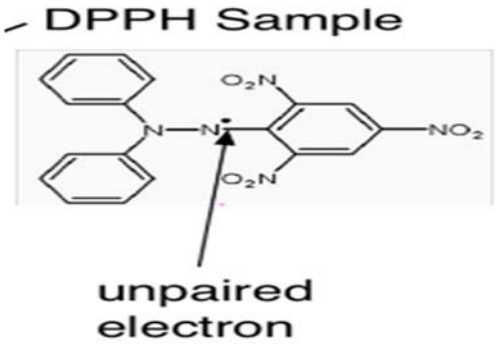


شکل (۱)

این شکافتگی در میدان‌های مغناطیسی معمولی (چند تسلا) در حدود انرژی امواج فرکانس رادیویی و ریز موج است. یعنی با تابش امواج الکترومغناطیس به ماده در این حوزه فرکانسی می‌توان فرایند جذب و همان تشدید اسپین الکترون را مشاهده کرد. نتایج این آزمایش می تواند اطلاعات ذی‌قیمتی را درباره ساختار اتم‌ها و مولکول‌ها فراهم کند.

۲. اصول آزمایش

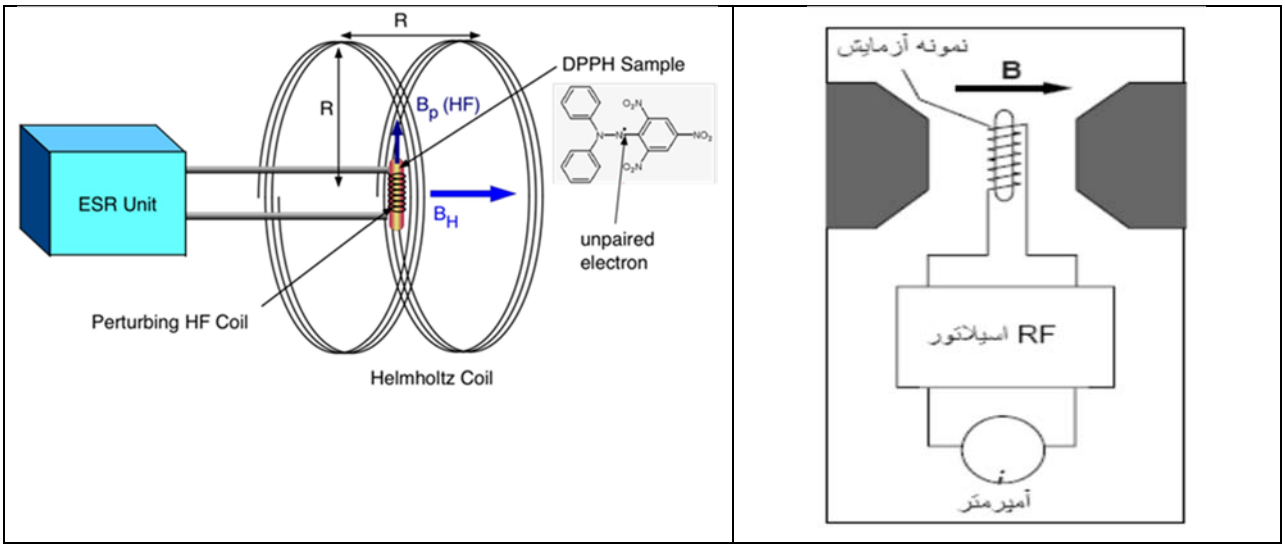
ماده‌ی مورد نظر دی فنیل پیکریل هیدرازیل (DDPH) نام دارد. این ماده دارای فرمول شیمیایی $C_{18}H_{12}N_5O_6$ است که ساختار آن در شکل (۲) آمده است. این ماده داری یک الکترون منفرد می‌باشد. در اغلب مواد الکترون‌های آزاد سریعاً با مولکول‌های اطراف واکنش می‌دهند اما در این ماده به علت برهمکنشی که با سه حلقه بنزن و سه گروه نیترو دارد به نسبت پایدار بوده و می‌توان برای آزمایش مورد نظر از آن استفاده کرد.



شکل (۲)

در واقع مولکول این ماده، گشتاور زاویه‌ای صفر ($L=0$) دارد و تنها یک الکترون جفت‌نشده دارد. بنابراین، به ازای مقدار مفروضی از میدان مغناطیسی خارجی، تنها یک فرکانس تشدید منفرد دارد. این ویژگی، تحقیق برخی از اصول پایه‌ای تشدید اسپینی الکترون را ممکن می‌سازد.

نمونه در اینجا درون یک سیم‌پیچ که به اسیلاتور RF متصل است، قرار دارد. حال ماده مورد نظر را در یک میدان مغناطیسی یکنواخت B_H که توسط عبور جریان از پیچه های هلمهولتز تولید می شود، قرار می‌دهیم شکل (۳). سپس با کمک یک اسیلاتور تابشی با فرکانس رادیویی (RF) بر آن اعمال کرده و آن‌را به وضعیتی در می‌آوریم تا انرژی جذب کند. بدلیل کوچک بودن اختلاف انرژی ترازها برای میدان های معمولی ، تابش مورد نیاز در حد فرکانس رادیویی است.



شکل (۳)

اسیلاتور RF جریان متغیری را در سیم‌پیچ مذکور برقرار می‌کند و بنابراین میدان مغناطیسی کوچک‌تری B_P (از میدان مغناطیس یکنواخت DC) را در جهت عمود بر میدان DC اعمال می‌کند.

الکترون‌های آزاد درون نمونه‌ی آزمایش دارای گشتاور دوقطبی مغناطیسی μ_S هستند که با گشتاور زاویه‌ای ذاتی‌اش، اسپین، رابطه‌ی زیر را دارد:

$$\mu_S = g_S \mu_B \frac{S}{\hbar}$$

که g_S مشخصه ثابتی برای الکترون است. (gyromagnetic factor) ، μ_B مگنتون بور= $\frac{e\hbar}{2m_e}$ ، S اسپین الکترون و $\hbar$ ثابت پلانک است.

گشتاور دوقطبی مغناطیسی این الکترون با میدان مغناطیسی DC برهم‌کنش می‌کند. الکترون بر اساس طبیعت کوانتومی‌اش تنها می‌تواند در دو جهت باشد، بنابر این در برهم کنش با میدان ترازهای هم انرژی(در غیاب میدان) به دو تراز با تفاوت انرژی کوچک شکافته می‌شوند.(شبیه پدیده‌ی زیمان). انرژی تراز ها برا بر است با $E_0 \pm \frac{g_S \mu_B}{2}$ B ، که E_0 انرژی الکترون قبل از اعمال میدان مغناطیسی است. در اینصورت اختلاف انرژی میان این دو حالت جهت‌گیری برابر $g_S \mu_B B$ است که B نیز اندازه‌ی میدان مغناطیسی است. (رابطه‌ی $\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ = انرژی پتانسیل دوقطبی مغناطیسی را به خاطر آورید).

تشدید زمانی رخ می‌دهد که اسیلاتور RF در فرکانس f به نحوی تنظیم شود که انرژی فوتون‌های تابشی hf، برابر با اختلاف انرژی میان دو حالت مجاز الکترون‌ها در حضور میدان مغناطیسی باشد. بنابراین الکترون‌هایی که در حالت انرژی پایین‌تر باشند هریک می‌توانند یک فوتون جذب کنند و به تراز بالاتر بروند (شکل ۱).

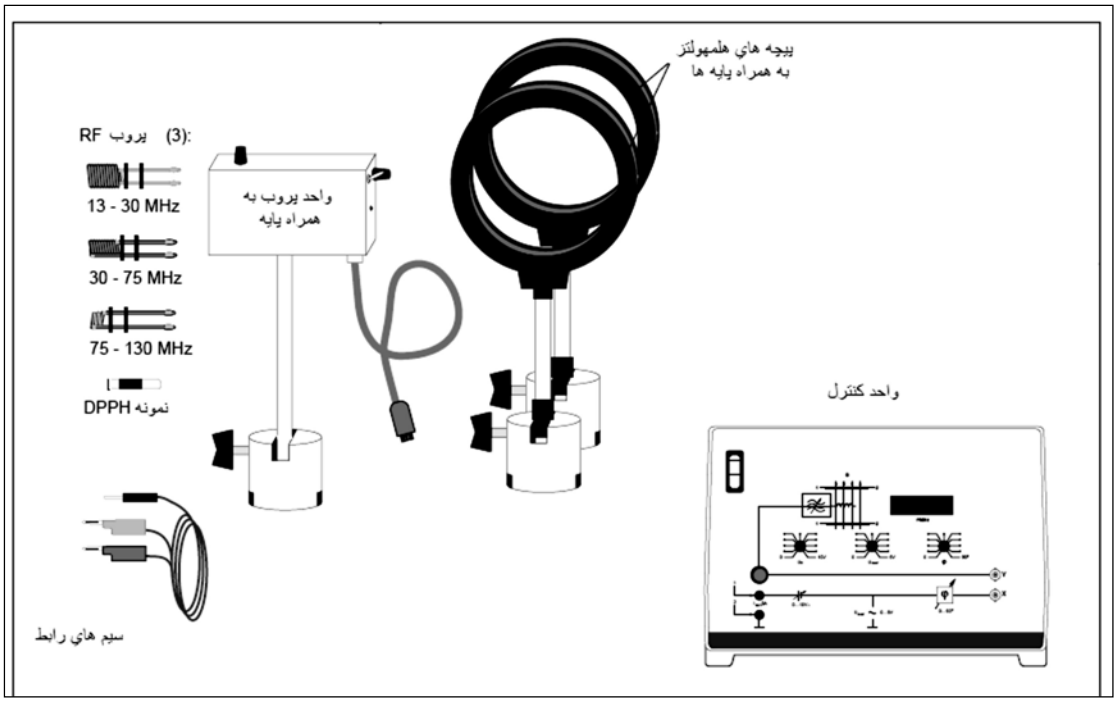
این جذب فوتون (که معادل کاهش شار مغناطیسی است) بر گذردهی مغناطیسی نمونه‌ی آزمایش تأثیر می‌گذارد. (منظور از گذردهی مغناطیسی یا تراوایی یا نفوذپذیری مغناطیسی همان ضریب μ در رابطه‌ی $\vec{B} = \mu(H)\vec{H}$ است. این μ را با گشتاور مغناطیسی اشتباه نگیرید.) که این تأثیر به نوبه‌ی خود القای سیم‌پیچ (یا خودالقا؛ L) را تغییر داده. به بیان دیگر جذب فوتون‌ها در درون سیم پیچ، منجر به کاهش شار مغناطیسی درون آن می‌شود و این کاهش بر اساس رابطه‌ی $U = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، ولتاژی را درون سیم‌پیچ القا می‌کند. نتیجه، تغییری قابل مشاهده در جریان درون سیم‌پیچ و اسیلاتور است.

بنابراین شرط تشدید برابر است با

$$h\nu = g_S \mu_B B \qquad (۲)$$

۳. معرفی اجزای دستگاه ESR

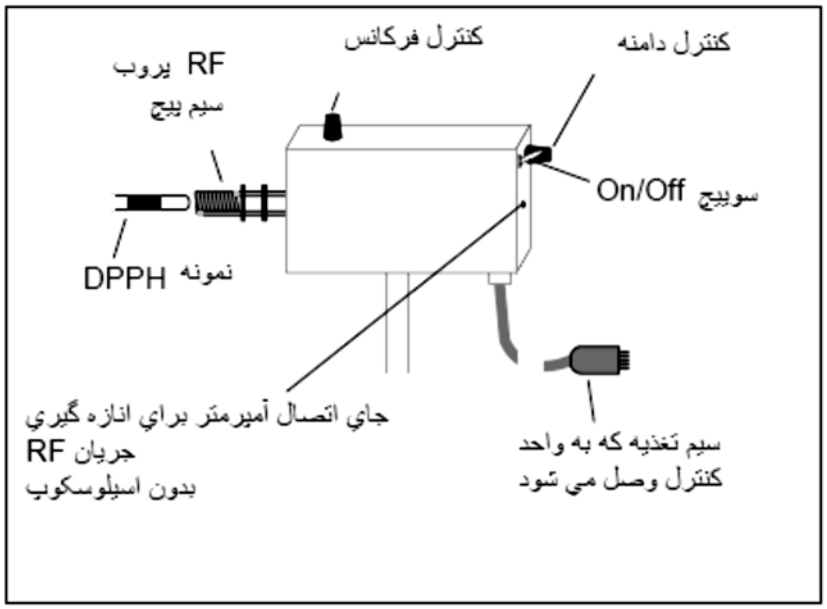
شکل ۴ دستگاه و قطعات مورد نیاز برای آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۴: تجهیزات اصلی دستگاه ESR (به جز اسیلوسکوپ و آمپرمتر)

۱.۳. واحد پروب (probe یا کاوه)

واحد پروب (شکل ۵) قلب دستگاه ESR است. این واحد شامل اسیلاتور RF، یک تقویت‌کننده‌ی سیگنال کـه درون آن تعبیه شده و یک تقسیم‌کننده‌ی فرکانس با نسبت ۱۰۰۰ به ۱ است. این تقسیم‌کننده فرکانس ممکن می‌سازد فرکـانس RF، که در محدوده‌ی MHz است را با استفاده از یک فرکانس‌سنج استاندارد، در محدوده‌ی kHz اندازه‌گیری کند.

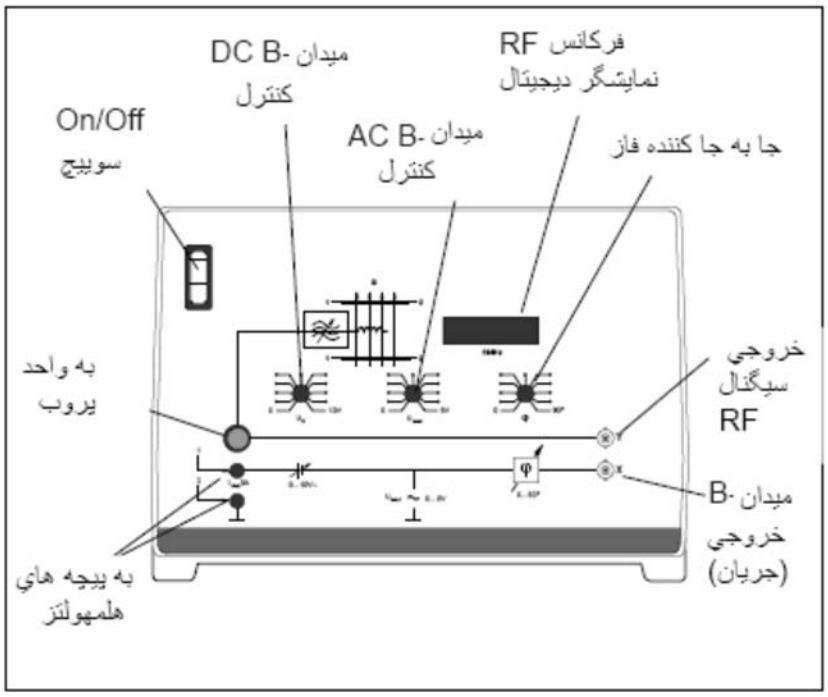


شکل (۵)

فرکانس و دامنه‌ی سیگنال RF را، با استفاده از دکمه‌های نشان داده شده در شـکل مـی‌تـوان کنتـرل کـرد. محـدوده‌ی فرکانس‌هایی را که اسیلاتور تأمین می‌کند به این بستگی دارد که کدام یک از پروب‌های (سیم پـیچ) RF اسـتفاده شـده باشند؛ زیرا بخشی از القای (یا خودالقا) پروب ناشی از القای مدار اسـیلاتور اسـت کـه سـیم‌پـیچ نیـز جزئـی از آن اسـت. محدوده‌ی فرکانس برای هر پروب (یا سیم‌پیچ) در شکل ۴ نشان داده شده است. واحد پروب باید توسط رابـط بـه واحـد کنترل، که تمامی ولتاژهای لازم را تأمین می‌کند، متصل شود.

۲.۳. واحد کنترل

واحد کنترل، اکثراً ابزارهای لازم را، جهت به کارگیری واحد پروب، تأمین می‌کند. صـفحه‌ی کنتـرل جلـویی در شـکل ۶ توضیح داده شده است.



شکل (۶)

در واقع واحد کنترل سه کارکرد دارد:

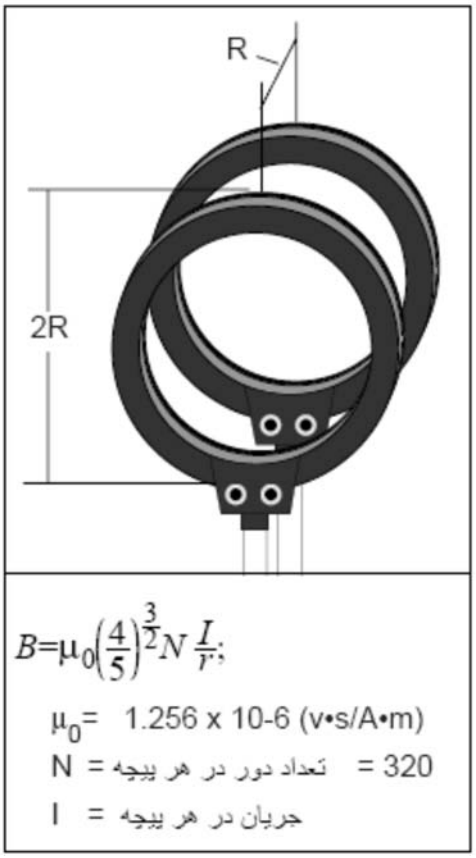
۱- ولتاژهای لازم را، برای راه‌اندازی واحد پروب و پیچه‌های هلمهولتز، تأمین می‌کند.

۲- با یک نمایش‌گر دیجیتال مقادیر فرکانس‌های RF را که واحد پروب تولید کرده است، نشان می‌دهد.

۳- خروجی‌های لازم را، برای اسیلوسکوپ دوکاناله، ارائه می‌کند. یک خروجی، متناسب با جریان در اسیلاتور RF است و برای مشاهده‌ی پالس‌های تشدید به‌کار می‌رود. خروجی دیگر، متناسب با جریانی است که پیچه‌های هلمهولتز را تغذیه می‌کند و بیان‌گر میدان مغناطیسی (خارجی) است.

توجه: یک تأخیر فاز ذاتی میان جریان در پیچه‌های هلمهولتز و سیگنال ولتاژی که به اسیلوسکوپ می‌دهیم ، وجود دارد. این شیفت به دلیل (خود) القای پیچه‌ها است. واحد کنترل، شامل یک جابه‌جاکننده‌ی فاز است که اجازه می‌دهد این تأخیر جبران شود؛ تا بتوان میدان مغناطیسی و پالس‌های تشدید را، به همراه رابطه‌ای مناسب میان فازهایشان، مشاهده کرد.

۳.۳. پیچه‌های هلمهولتز



شکل (۷)

پیچه‌های هلمهولتز میدان مغناطیسی بسیار یکنواختی را تأمین می‌کنند تا نمونه، جهت اندازه گیری ESR ، تحت تأثیر آن قرار بگیرد. این پیچه‌ها باید به طور موازی به هم متصل شوند (چه از لحاظ هندسی و چه از لحاظ الکترونیکی). به گونه‌ای که فاصله‌ی میانشان برابر با شعاع باشد(شکل ۷). در این حالت میدان مغناطیسی در منطقه‌ی مرکزی بین دو پیچه، بسیار یکنواخت و برابر با مقداری است که در شکل ۷ نشان داده شده است.

یکنواخت بودن میدان بدین معنا است که اگر محور Z را در راستای محور پیچه‌ها بگیریم $\frac{\partial B}{\partial z}=\frac{\partial^2 B}{\partial z^2}=0$؛ (برای پرداخت بیشتر به این مسئله، رجوع کنید به کتاب الکترودینامیک گریفیتس، ویرایش سوم، مسأله‌ی ۵۹-۵ .)

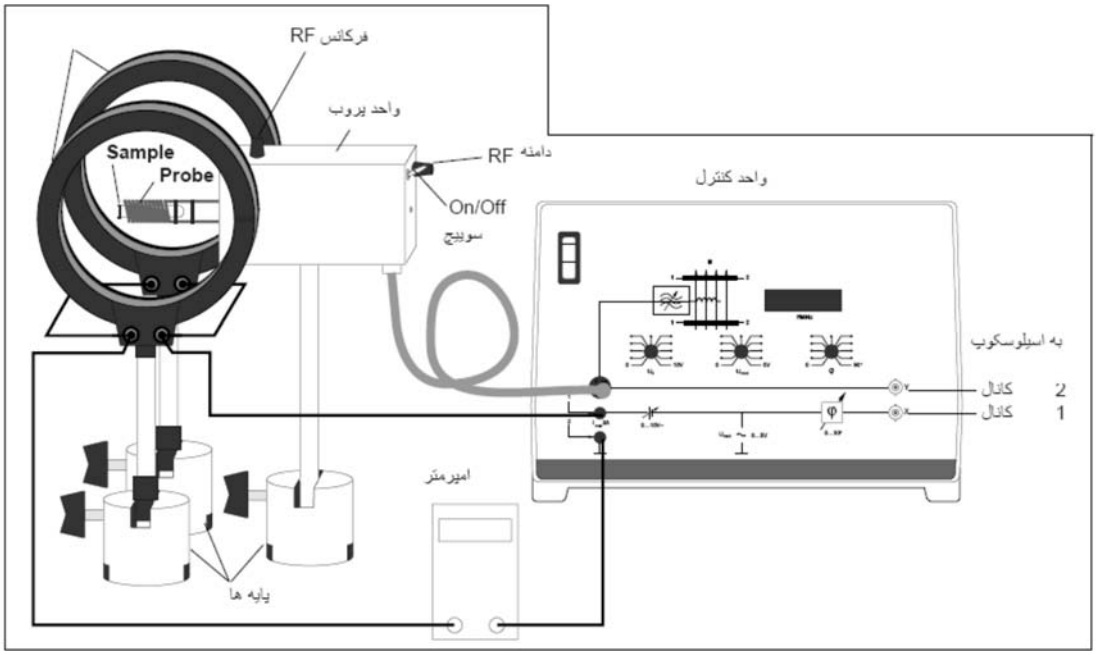
نکته مهم: جریان هر یک از پیچه‌ها نباید بیش از ۳ آمپر شود. بنابراین جریان کل نباید بیش از ۶ آمپر شود.

۴. تنظیمات دستگاه

۱.۴. برای مشاهده ESR در حالت اسیلوسکوپ دو کاناله به ترتیب موارد زیر انجام شود (شکل (۸)):

۱- مطابق شکل ۸ ، پیچه‌های هلمهولتز را به واحد کنترل متصل کنید (پیچه‌ها باید به طور موازی متصل شوند). یک آمپرسنج نیز به طور سری به پیچه‌ها وصل کنید تا جریان آن‌ها را تحت نظر بگیرید.

۲- پیچه‌های هلمهولتز را به نحوی قرار دهید که موازی، روبروی هم و در یک جهت مغناطیسی (قانون دست راست) قرار بگیرند و فاصله‌ی شان تقریباً برابر با شعاعشان باشد.



شکل (۸)

نکته‌ی مهم: اجازه ندهید جریان در هر یک از پیچه‌ها از ۳ آمپر فراتر رود.

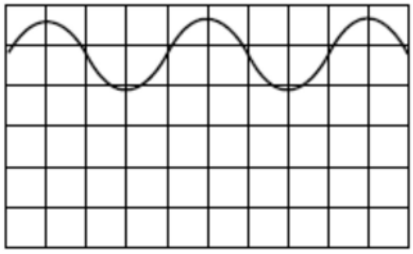
۳- خروجی X واحد کنترل را به کانال ۱ اسیلوسکوپ (A)، متصل کنید و تنظیم‌های زیر را انجام دهید:

حساسیت (sensitivity): (V/div) ۲ یا ۱

سرعت جاروب کردن صفحه (sweep Rate) : (ms/div) ۵ یا ۲

۴- U_{mod} را روی صفر قرار دهید؛ (پیچ یا دکمه‌ی وسطی در واحد کنترل). سپس U_0 را (پیچ یا دکمه‌ی سمت چپ،) به آرامی از صفر تا ۱۰ ولت تغییر دهید و منحنی اسیلوسکوپ را مشاهده کنید. این منحنی باید واضح و خط مستقیم باشد که نشان‌گر مولفه‌ی DC جریان در پیچه‌های هلمهولتز است. (در واقع U_0، جریان DC که به پیچه‌های هلمهولتز می‌رود را کنترل می‌کند. سپس U_0 را دوباره روی صفر قرار دهید.)

۵- U_0 را تقریباً تا میانه‌ی مقیاسش بپیچانید. سپس U_{mod} را به طور ساعت‌گرد بچرخانید تا مولفه‌ی AC جریان در پیچه‌های هلمهولتز افزایش یابد. حال منحنی روی اسیلوسکوپ باید یک موج هموار سینوسی که متناظر با میدان مغناطیسی AC سوار شده بر میدان DC است،نمایش دهد (شکل ۹). بدین ترتیب میدان مغناطیسی ثابت را با عبور جریان ثابت DC و یک جریان AC که با فرکانس (۶۰ Hz) مادوله (Modulated) شده از پیچه هلمهولتز، تامین می‌کنیم.



شکل (۹)

۶-خروجی Y واحد کنترل را به کانال ۲ اسیلوسکوپ (B) وصل کنید. تنظیمات کانال ۲ را این گونه قرار دهید:

حساسیت (sensitivity) : (V/div) ۰/۵ یا ۱

۷- واحد پروب را به واحد کنترل وصل کنید (همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است.

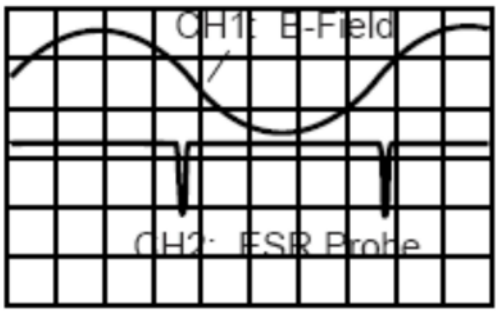
۸- پروب RF ، با تعداد دور متوسط را در داخل واحد پروب تعبیه کنید و نمونه‌ی DPPH را درون سیم‌پیچ پروب قرار دهید.

۹- واحد پروب را با قرار دادن سوئیچ On/Off روی موقعیت (I) روشن کنید. سپس پیچ کنترل دامنه را (روی واحد پروب) تا وضعیت میانه‌اش بچرخانید.

۱۰- اکنون باید فرکانس‌سنج، روی واحد کنترل، فرکانس نوسان‌های RF را نمایش دهد. پیچ کنترل فرکانس را ، بـر روی واحد پروب، به گونه‌ای تنظیم کنید که خروجی تقریباً MHz ۵۰ را تولید کند.

۱۱- U_{mod} را تقریباً روی چهارمین موقعیت بالای صفر قرار دهید. (تقریباً در موقعیت ساعت ۱۱)

۱۲- U_0 را از صفر تا مقدار میانی‌اش افزایش دهید تا جریان در هریک ازپیچه‌های هلمهولتز تقریباً یـک آمپـر شـود. حال منحنی‌های روی اسیلوسکوپ باید مانند شکل ۱۰ به نظر آیند. منحنی کانال ۱ جریان پیچـه‌هـای هلمهـولتز را نشان می‌دهد که متناسب با میدان مغناطیسی (خارجی) است. منحنی کانال ۲ اختلاف ولتاژ دوسـر اسـیلاتور RF را نشان می‌دهد که دو پالس روی آن نمایانگر جذب تشدیدی‌اند. اگـر شـما هـیچ پـالس تشـدیدی را نمـی بینیـد، بـه آهستگی U_{mod} یا فرکانس RF را آن‌قدر کم و زیاد کنید که پالس‌های مذکور را ببینید.



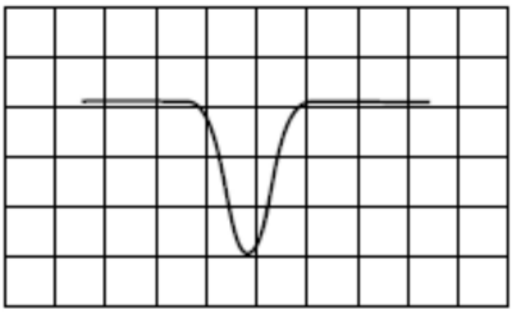
شکل (۱۰)

۱۳- منحنی‌های شما ممکن است آن طور که در شکل ۱۰ است، متقارن نباشند. این به علت (خود) القای پیچه‌های هلمهولتز است که جریان عبوری از خود را متأثر می‌کنند و بنابراین فاز میدان مغناطیسی تولید شـده از فـاز اعمـالی بر پیچه‌ها وامی‌ماند. می‌توان این تأخیر را با تنظیم φ، جابه‌جاکننده‌ی فاز (Phase Shifter) ، جبران کرد تا ایـن که منحنی‌ها متقارن شوند. وقتی منحنی‌ها متقارن باشند، به طور صحیحی رابطه‌ی میان میدان مغناطیسـی مادولـه شده (میدان مغناطیسی DC +میدان مغناطیسی AC) و پالس‌های تشدید را باز می‌نمایانند.

۲.۴. مشاهده ESR در حالت X-Y اسیلوسکوپ:

اغلب ESR را در حالت X-Y مشاهده می‌کنند. برای این منظور پیچه اسیلوسکوپ را در حالت X-Y قرار دهید. در این حالت جابه‌جایی افقی در منحنی نمایان‌گر اندازه‌ی میدان مغناطیسی میان پیچه‌های هلمهولتز است. جابه‌جایی عمودی بیان‌گر سیگنالی است که از واحد پروب می‌آید.

مانند پیش دو پالس تشدید مشاهده می‌کنید؛ زیرا میدان مغناطیسی (خارجی) دوبار از مقدار صحیح، در هر دوره‌ی تناوب، می‌گذرد. با تنظیم جابه‌جاکننده‌ی فاز (phase shifter)، دو پیک (کمینه‌ی پالس) را می‌توان روی هم منطبق کرد. منحنی حاصل همانند شکل ۱۱ ظاهر خواهد شد.



شکل (۱۱)

۵. انجام آزمایش برای محاسبه ثابت g

۱- دستگاه را بر طبق بخش پیش در حالت X-Y قرار دهید.

۲- فرکانس RF و جریان DC ورودی به پیچه‌های هلمهولتز را آن‌قدر تغییر دهید تا پالس‌های تشدید را بیابید.

۳- جابه‌جاکننده‌ی فاز را آن‌طور تنظیم کنید که پالس‌های تشدید نسبت آن منحنی از اسیلوسکوپ که نمایان‌گر جریان پیچه‌ها است،متقارن شود.

۴- تنظیم جریان DC را به نحوی اصلاح کنید که پالس‌های تشدید وقتی رخ دهند که مولفه‌ی AC جریان در پیچه‌های هلمهولتز، کمینه باشد.

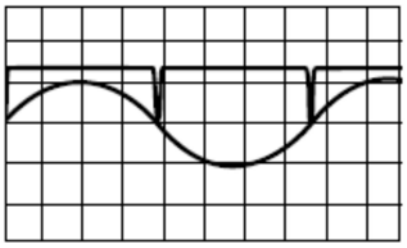
برای این کار:

الف- مطمئن شوید که کانال ۱ اسیلوسکوپ (مربوط به آن منحنی که جریان پیچه‌های هلمهولتز را نشان می‌دهد) در حالت AC باشد.

ب) با به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های اسیلوسکوپ ، ورودی کانال ۱ را زمین (ground) کنید. سپس منحنی مربوطه را روی خط صفر قرار دهید و آن‌گاه ورودی ۱ را از حالت زمین خارج کنید.

ج) حال، دوباره جریان DC را به نحو مناسب تنظیم کنید. همان‌طور که حتماً می‌دانید برای این کار باید به این توجه کنید که چگونه پالس‌های تشدید به هم نزدیک یا از هم دور می‌شوند. با این نکته جریان DC و اگر نیاز باشد، جابه‌جاکننده‌ی فاز (φ) را به نحوی همساز کنید تا پالس‌ها دقیقاً وقتی جریان AC در پیچه‌ها کمینه می‌شود، روی دهند. (به دقیق‌ترین وجه، این حالت وقتی صورت خواهد پذیرفت که موقعیت عمودی منحنی مربوط به کانال ۲ طوری باشد که پایین پالس‌های تشدید دقیقاً روی تراز صفر منحنی کانال ۱ باشد.)

با این تنظیم‌ها، منحنی‌های روی صفحه نمایش اسیلوسکوپ باید مانند شکل ۱۲ باشند. در این وضعیت همه چیز مهیا برای اندازه‌گیری ESR است. از آن‌جایی که جریان پیچه‌ها به نحوی تنظیم شده است که پالس‌های تشدید وقتی روی بدهند که جریان AC پیچه‌ها کمینه باشند، لذا جریان در داخل پیچه‌های هلمهولتز، در لحظه‌ی تشدید، دقیقاً برابر مقدار DC بیان شده توسط آمپرمتر است. فرکانس تشدید را نمایش‌گر دیجیتال در واحد کنترل نشان می‌دهد.



شکل12
صفحه اسیلوسکوپ

۵- فرکانس RF و جریان DC را یادداشت کنید. سپس جریان را تغییر داده و فرکانس جدید را بیابید. این کار را برای چندین مقدار فرکانس انجام دهید و سپس پروب RF را تغییر دهید و مشاهدات را برای هر سه پروب RF انجام دهید.

۶- اندازه‌ی میدان مغناطیسی بین پیچه‌های هلمهولتز (با استفاده از قانون بیوساوار) از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

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

۷- حال می‌توانید عامل g را برای الکترون نمونه‌ی DPPH با رابطه‌ی $h\nu = g_S \mu_B B$ تعیین کنید.

خواسته‌های آزمایش

۱- رابطه‌ی v بر حسب B را به‌دست آورید.

۲- مقداری عددی gs را از طریق روش کمترین مربعات یا با استفاده از نرم افزارهایی مانند Excel یا Table Curve به‌دست آورید.

۳- درباره‌ی عدد به‌دست آمده و تفاوتش با مقدار اصلی آن که برابر ۲/۰۰۳۶ است، بحث کنید.

۴- چه‌قدر میدان مغناطیسی زمین می‌تواند بر روی نتایج تأثیرگذار باشد؟

۵- عرض منحنی تشدید در حالت x-y به چیزی بستگی دارد؟

۶- در صورتی که بر میدان مغناطیسی DC پیچه‌های هلمهولتز میدان AC سوار نکنیم، با چه تکنیکی می‌توان اثر ESR را اندازه‌گیری کرد؟

۷- اساس کار تشدید اسپینی هسته (NMR) را به طور خلاصه شرح دهید و تفاوت‌ها و شباهت‌های آن را با ESR (تشدید اسپینی الکترون) در پاسخ خود ذکر کنید.

منابع:

1- Instruction Manual (ESR APPARATUS Model SE-9636)

2- Melissonos Adrian C.; Experiment in Modern Physics, Page 374. (ویرایش قدیمی)

3-Second Edition of above reference (2003), chapter 7.

4- Griffiths David J.; Introduction to Electrodynamics (Third Edition), chapter 5. www.pasco.com.