

تشدید اسپینی الکترون

۱ اهداف آزمایش

(۱) مشاهده اثر تشدید اسپینی الکترون

(۲) مطالعه بستگی فرکانس تشدید به میدان مغناطیسی

(۳) اندازه گیری فاکتور لاند g

۲ تئوری آزمایش

در بیشتر مولکولها الکترونها پیوندی دارای اسپینهای غیرهمجهت هستند و لذا اسپین الکترونی محض و همینطور گشتاور مغناطیسی الکترونی در آنها وجود ندارد، نتیجه عملی این پدیده عدم وجود اثر متقابل بین اسپین الکترونها و میدان مغناطیسی خارجی است. اما برخی اتمها و مولکولها دارای یک و یا چند الکترون با اسپین همجهت بوده و لذا اثر میدان مغناطیسی خارجی بر روی آنها مشهود است. اینها همان مولکولهایی هستند که انتظار می رود اثر تشدید اسپین الکترون از خود بروز دهند. مولکولهای O_2 و NO_2 از این دسته مولکولها هستند که در طبیعت موجود می باشند. از سوی دیگر یونهای فلزات و کمپلکسهای آنها مانند Fe^{3+} و $[Fe(CN)_6]^{3-}$ دارای خاصیت فوق می باشند.

این اجسام پایدار بوده و توسط اثر تشدید اسپینی الکترون (ESR) قابل مطالعه‌اند. مواد پارامغناطیس ناپایدار معمولاً رادیکالهای آزاد یا آلومینهای رادیکالی نامیده می‌شوند که یا واسطه‌های یک واکنش شیمیایی هستند و یا از طریق تحت تابش x و یا فوق بنفش قرار دادن مولکول عادی بوجود می‌آیند. چنانچه عمر چنین رادیکالهایی از حدود 10^{-6} ثانیه بزرگتر باشد آنگاه به روش تشدید اسپین الکترون قابل مطالعه‌اند. حال در اینجا تئوری آزمایش را با تفصیل بیشتر بیان می‌کنیم.

به هر اسپین الکترون یک گشتاور مغناطیسی مرتبط است. اگر فرض کنیم الکترون یک بار الکتریکی چرخان است که به عنوان یک جریان حلقوی در نظر گرفته می‌شود می‌توان به آن یک گشتاور مغناطیسی نسبت داد و به خاطر منفی بودن بار الکترون گشتاور مغناطیسی در خلاف جهت اسپین عمل می‌کند. رابطه بین اسپین الکترون S و گشتاور مغناطیسی الکترون μ_S به صورت زیر بیان می‌شود

$$\mu_s = \frac{g_s \mu_B}{\hbar} S \quad (1)$$

که در آن μ_B مگنتون بوهر است. نسبت مقدار گشتاور مغناطیسی به اندازه حرکت زاویه‌ای در مقیاس اتمی به صورت

$$g_s = \frac{\mu_s \mu_B}{S \hbar} \quad (2)$$

تعریف می‌شود که در آن

$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2 m c} \quad (3)$$

و m جرم در حال سکون الکترون است. برای اسپین الکترون، فاکتور g نمی‌تواند توسط روابط کلاسیکی توجیه شود و تنها به کمک مکانیک کوانتمی نسبتی قابل فهم می‌باشد که مقدار آن با یک فاکتور تصحیح حدود $1/10$ درصد برابر ۲ می‌باشد که با تجربه در توافق است. برای استخراج فرمول تشدید، نتایج مکانیک کوانتمی که در آن اندازه حرکت زاویه‌ای مداری L از رابطه $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$

بدست آمده، مورد استفاده قرار گرفته است. l عدد کوانتومی اندازه حرکت مداری است. همچنین مولفه قابل مشاهده اندازه حرکت در یک جهت خاص (مثلاً z) به صورت $L_z = m\hbar$ است که در آن m عدد کوانتومی مغناطیسی و z جهت میدان مغناطیسی است. برای اندازه حرکت مداری با یک عدد کوانتومی مداری l مقدار m باید صحیح باشد و مقادیر $0, \pm 1, \dots, \pm l$ به خود می‌گیرد و تعداد کل حالت‌های m برابر با $2l + 1$ حالت می‌باشد. بردار اندازه حرکت اسپینی همان قاعده اندازه حرکت زاویه‌ای مداری را دنبال می‌کند به طوری که

$$S_z = m_s \hbar, \quad m_s = -S, \dots, +S \quad (4)$$

عدد کوانتومی اسپین مغناطیسی تنها مقادیر $\pm \frac{1}{2}$ را به خود می‌گیرد و لذا تنها با امکان دو حالت اسپینی گشتاور مغناطیسی الکترون که با اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی جفت شده است دارای دو حالت خواهد بود. از

$$\mu = -g_s \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{S}, \quad S_z = \pm \hbar/2 \quad (5)$$

مولفه z گشتاور مغناطیسی عبارتست از

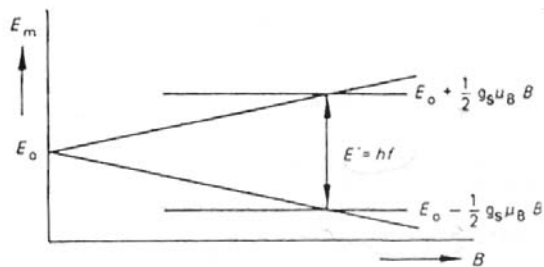
$$\mu_z = \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B \quad (6)$$

و انرژی پتانسیل مغناطیسی E_m به صورت

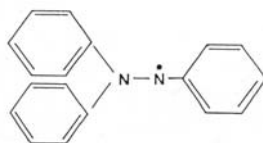
$$E_m = \mu \cdot \mathbf{B} = \mu_z B \quad (7)$$

تعریف می‌شود. در اثر میدان، انرژی الکترون (E_0) در حضور میدان به دو سطح زیر جدا می‌شود

$$E_m = E_0 \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B B \quad (8)$$



شکل (۱)



شکل (۲) : مولکول DPPH

این پدیده در شکل (۱) مشاهده می شود. هنگامی که انرژی فوتون بازتابشی، $E = h\nu$ ، برابر با انرژی مغناطیسی باشد جذب تشدید رخ می دهد و آنگاه می توان نوشت

$$h\nu = g_s \mu_B B \quad (۹)$$

۳ روش آزمایش

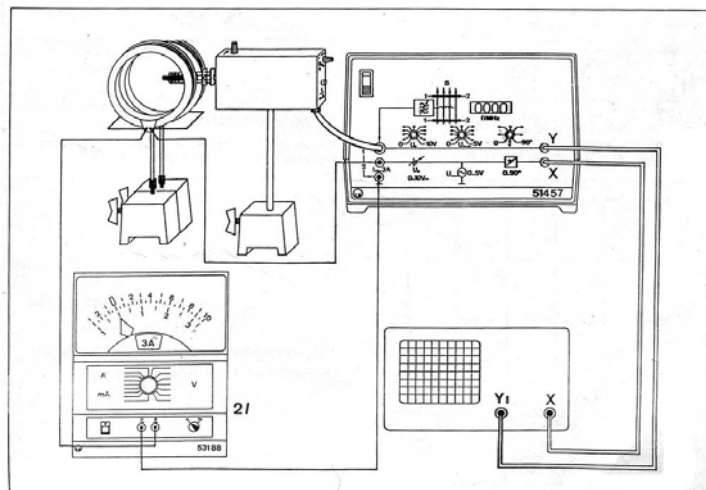
در این آزمایش یک سیستم اسپین الکترون پارامغناطیس -DIPHENYL-PICRYL-HYDRAZYL (DPPH) در یک سیم پیچ با فرکانس تشدید بالا از یک میدان DC انرژی تشدید را جذب می کند. این به یک تغییر قابل اندازه گیری در امپدانس تشدید منجر می شود. ترکیب آلی DPPH یک کمپلکس است که در آن الکترون غیر زوجی روی یکی از اتمهای نیتروژن ظاهر می شود (به شکل (۲) نگاه کنید). الکترونهاى نمونه DPPH که در آنها اندازه حرکت زاویه ای مداری صفر است ($l = 0$) بسیار مناسب برای آزمایش تشدید اسپین الکترون می باشد.

برای انجام آزمایش ابتدا نمونه را داخل یک میدان مغناطیسی AC فرکانس بالا (در سیم پیچ مدار تشدید) قرار داده و مجموعه حاصل را (نمونه + سیم پیچ مدار تشدید) در داخل یک میدان مغناطیسی DC قرار می دهیم. در طی تشدید (انرژی فوتونهاى تابشی برابر است با اختلاف انرژی بین دو موقعیت پایدار ممکن اسپین) انرژی فرکانس بالا جذب شده و منجر به تغییر مقاومت ظاهری مدار تشدید می شود. در مراحل اندازه گیری تشدید اسپین الکترون فرکانس امواج تابشی تغییر داده نمی شود ولی شدت میدان مغناطیسی خارجی تغییر می کند. بواسطه مدولاسیون میدان مغناطیسی DC در طی عمل تشدید یک تغییر مقاومت ایجاد شده و اثر آن روی صفحه اسیلوسکوپ ظاهر می شود به طوری که روی محور قائم اسیلوسکوپ ولتاژ متناسب با دامنه میدان فرکانس بالا و روی محور افقی اسیلوسکوپ ولتاژ متناسب با میدان سیم پیچهای هلمهولتز ظاهر می شود.

فرکانس تشدید ν تابعی از شدت میدان تشدید B است. این وابستگی به طور تجربی اندازه گیری شده و با نتایج تئوری قابل مقایسه است.

آماده سازی سیستم:

سیم پیچهای هلمهولتز را به صورت موازی ببندید. فاصله بین دو سیم پیچ را برابر با شعاع سیم پیچها قرار دهید ($r = 6/8 \text{ cm}$) و مدار را مطابق شکل (۳) ببندید. جریانی که آمپر متر در این مدار نشان می دهد دو برابر جریان داخل سیم پیچهاست. چرا؟



شکل (۳)

قبل از شروع آزمایش اسیلوسکوپ را به صورت زیر تنظیم کنید.

$$Y1 : AC : 0.5 V/cm$$

$$X : AC : 2 V/cm$$

برای تنظیم نقطه مبدا مرکز بالاترین خط روی اسیلوسکوپ را در نظر بگیرید.

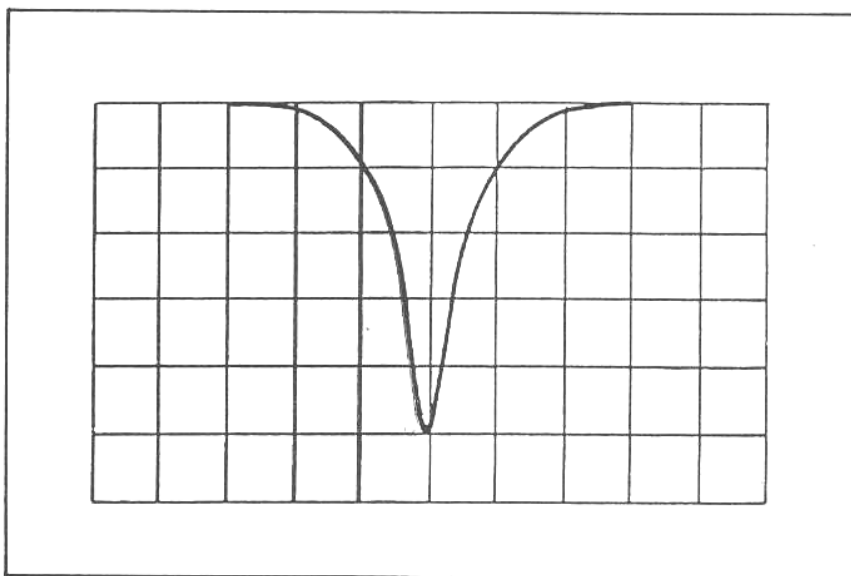
انجام آزمایش:

۱- سیم پیچهای E ، F ، G را که در آنها فرکانسها به ترتیب جدول زیر تغییر می کند مطابق

شکل (۳) در جای خود قرار دهید.

نوع سیم پیچ	محدوده فرکانس
E	۱۳-۳۰ MHz
F	۳۰-۷۵ MHz
G	۷۵-۱۳۰ MHz

۲- نمونه DPPH را در داخل سیم پیچ قرار دهید.



شکل (۴)

۳- اگر دامنه میدان AC سوار شده بر میدان مغناطیسی DC خیلی کوچک است میدان مغناطیسی DC را بتدریج افزایش دهید تا اثر تحریک روی صفحه اسیلوسکوپ ظاهر شود. فرکانس نوسان ساز را افزایش دهید به طوری که خط تشدید خودش را به سمت راست اسیلوسکوپ جابجا کند.

۴- با افزایش میدان مغناطیسی DC خط تشدید را دوباره تنظیم کنید طوری که نسبت به $x = 0$ تقارن داشته باشد.

۵- فرکانس ν و جریان مستقیم I را که با B متناسب است اندازه بگیرید. اگر مقدار جریان در سیم پیچ مشخص باشد آنگاه B به صورت زیر مشخص می شود

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{n}{r} \cdot I \quad (10)$$

که در آن n تعداد دور سیم پیچ و r شعاع سیم پیچ و I جریان در هر سیم پیچ است. که در اینجا

$$\mu_o = 1/2566 \times 10^{-6} \text{ Vs/Am}$$

$$n = 320$$

$$r = 68 \text{ mm}$$

ولذا داریم

$$B_{(mT)} = 4/23 I_{(A)} \quad (11)$$

حال به ازاء هر μ یک مقدار متناظر برای B بدست می آید. از سویی بنا بر رابطه (۹) داریم

$$\nu = \frac{g_s \mu_B B}{h} \quad (12)$$

که معادله یک خط راست است که ضریب زاویه آن $g_s \mu_B / h$ است. μ_B و h را به ترتیب برابر با $9/273 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ و $6/625 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$ بگیرید و به کمک روش کوچکترین مربعات مقدار g_s را بیابید.