



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده فیزیک

دستور کار آزمایشگاه فیزیک پیشرفته ۱

تهیه و تنظیم: گروه تجربی دانشکده فیزیک

مهر ۱۳۹۰

فهرست آزمایش‌ها

۱. پذیرفتاری پارامغناطیس ۱
۲. شکاف انرژی نیمه‌هادی‌ها ۱۰
۳. تشعشع ترمیونیک ۱۶
۴. اثر زیمن عادی ۲۸
۵. آشنایی با مایکروویو ۴۱
۶. تخلیه الکتریکی در گازها ۵۲
۷. میکروسکوپ نشر میدانی (FEM) ۶۳
۸. آشنایی با پدیده فلورسانس و فسفرسانس ۷۲

پذیرفتاری پارامغناطیس

تعیین گشتاور مغناطیسی مؤثر یون منگنز (Mn^{++})

هدف آزمایش

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی محلول محتوی یونهای مغناطیسی، تعیین گشتاور مغناطیسی مؤثر آنها و مطالعه میزان مغناطیس شدن مایع در اثر ازدیاد غلظت یونهای پارامغناطیسی

وسایل آزمایش

- ۱- آهنربای الکتریکی با قطبهای مخروطی به سطح مقطع 0.5 cm^2 و فاصله هوایی 7 mm
- ۲- منبع تغذیه ولتاژ مستقیم به ولتاژ ماکزیمم 70 ولت و جریان ماکزیمم 5 آمپر
- ۳- میکروسکوپ اندازه‌گیری که بخشی از دستگاه است.
- ۴- آمپر متر
- ۵- ترازوی معمولی
- ۶- نمک پارامغناطیس (کلرور منگنز به فرمول $Cl_2Mn, 4H_2O$) و آب مقطر به میزان لازم
- ۷- لوله شیشه‌ای U شکل و دو عدد استوانه مدرج
- ۸- چراغ رومیزی

تئوری آزمایش

هر مولکول یک گشتاور مغناطیسی m_i دارد که عبارت است از گشتاورهای مغناطیسی اسپینی و مداری الکترونهای مختلف مولکول. پدیده پارامغناطیس نتیجه این امر است که این گشتاورهای مولکولی تمایل دارند خود را با جهت میدان مغناطیسی اعمال شده همسو کنند. گشتاور دو قطبی مغناطیسی در واحد حجم را مغناطش (M) گویند که در یک ماده همسانگرد و خطی با میدان مغناطیسی خارجی (H) با رابطه زیر مربوط می‌شود:

$$M = \chi H \quad (1)$$

کمیت χ را پذیرفتاری مغناطیسی ماده گویند که یک کمیت بدون بعد است (در هر دو دستگاه cgs و SI بدون بعد است) که برای مواد پارامغناطیس مثبت و برای مواد دیامغناطیس منفی خواهد بود. نکته ۱: در کتابهای راهنما χ را مستقیماً درج نمی کنند بلکه به صورت پذیرفتاری جرمی یا مولی تعریف می کنند:

$$\chi = \chi_{mass} d$$

$$\chi = \chi_{mole} \frac{d}{A}$$

که d چگالی جرمی ماده و A وزن مولکولی است.

نکته ۲: عملاً در تمام منابع پذیرفتاری مغناطیسی برحسب یكاهای گاوسی داده می شوند اما پذیرفتاری در این دو دستگاه با رابطه زیر به هم مربوط می شود:

$$\chi = 4\pi\chi' \quad , \quad \chi_{mass} = 4\pi \times 10^{-3} \chi'_{mass}$$

که علامت پریم مربوط به کمیت در دستگاه گاوسی است.

در مایع محتوی یونهای پارامغناطیس هر یون معادل یک دو قطبی مغناطیسی (m) است و اینها وقتی در میدان خارجی قرار بگیرند تلاش می کنند خود را با میدان هم جهت کنند. انرژی پتانسیل (U) یک دو قطبی در میدان خارجی B برابر است با:

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{B} \quad (2)$$

برآیند کل گشتاور مغناطیسی در امتداد میدان برابر است با:

$$M_z = Nm \langle \cos \theta \rangle \quad (3)$$

N تعداد یونهای مغناطیسی موجود در واحد حجم و $\langle \cos \theta \rangle$ متوسط $\cos \theta$ در توزیع حاکم به هنگام تعادل حرارتی است. طبق قانون توزیع بولتزمن احتمال نسبی وجود یک یون در عنصر زاویه فضایی $d\Omega$ متناسب است با $\exp(-U/kT)$ در نتیجه:

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int e^{-\beta U} \cos \theta d\Omega}{\int e^{-\beta U} d\Omega}$$

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} 2\pi \sin \theta \cos \theta e^{-\beta m B \cos \theta} d\theta}{\int_0^{2\pi} 2\pi \sin \theta e^{-\beta m B \cos \theta} d\theta}$$

با تغییر متغیر به صورت $\cos \theta = S$ ، $mB/kT = X$

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int e^{-SX} S dS}{\int e^{-SX} dS} = \frac{d}{dX} \ln \int_{-1}^1 e^{SX} dS = \frac{d}{dX} \ln(e^X - e^{-X}) - \frac{d}{dX} \ln X$$

$$\langle \cos \theta \rangle = \coth X - \frac{1}{X} \equiv L(X) \quad (4)$$

$L(X)$ را تابع لانژون می گویند.

در یک میدان مغناطیسی قوی و دمای کم خواهیم داشت: $mB \gg kT$ ، سیستم کاملاً اشباع می شود بدین معنی که تمام دو قطبی ها با میدان مغناطیسی هم جهت می شوند.

نکته ۳: در درجه حرارت های معمولی (دمای حدود ۳۷۳ کلوین) و میدان مغناطیسی ۰/۱ تسلا، با توجه به اینکه گشتاور مغناطیسی m یک الکترون حدود 10^{-23} است. در نتیجه:

$$X = mB / kT = 10^{-23} \times 0.1 / (1.38 \times 10^{-23} \times 373) \approx 10^{-24} / (500 \times 10^{-23}) \approx \frac{1}{5000} \ll 1$$

در نتیجه می شود $\coth X$ را بسط داد:

$$\coth X \approx \frac{1}{X} + \frac{X}{3} + \dots \quad (5)$$

با توجه به رابطه ۴ و ۵:

$$L(X) = \langle \cos \theta \rangle \approx \frac{X}{3} \quad (6)$$

و از روی رابطه ۳ و ۶ می شود M را حساب کرد.

$$M_z = Nm \langle \cos \theta \rangle = Nm \frac{X}{3} = \frac{Nm^2 B}{3kT} \quad (7)$$

در نتیجه می توان پذیرفتاری مغناطیسی را محاسبه نمود.

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{\frac{Nm^2 B}{3kT}}{\frac{B}{\mu_0}} = \frac{Nm^2 \mu_0}{3kT} \equiv \frac{C}{T} = \frac{Nm}{H} \quad (8)$$

C را ثابت کوری می نامند.

محاسبه $(\bar{m})m_{eff}$ یون منگنز Mn^{++} به طریق کوانتوم مکانیکی:

با استفاده از مفاهیم مکانیک کوانتومی می توان گشتاور مغناطیسی یک اتم یا یون را در فضای تهی از

$$\bar{m} = \gamma \bar{J} = -\frac{g\mu_B}{\hbar} \bar{J} \quad \text{روی رابطه زیر به دست آورد:}$$

که γ را نسبت ژیرومغناطیسی گویند و g ضریب شکافتگی طیف نمایی است که توسط رابطه مدار و اسپینی است.

\vec{J} اندازه حرکت زاویه‌ای کل است که مجموع اندازه حرکت های g برای یک اتم آزاد توسط معادله لاندیه محاسبه می‌شود:

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

μ_B مگنتون بور است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} (SI) \quad , \quad \left[\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc} (cgs) \right]$$

حال برای محاسبه m به رابطه‌های زیر توجه کنید:

$$\vec{m} = -\frac{g\mu_B}{\hbar} \vec{J}$$

$$J |jlm\rangle = ?$$

$$J^2 |jlm\rangle = \hbar^2 j(j+1) |jlm\rangle$$

بنابراین:

$$\vec{m} = \frac{g\mu_B}{\hbar} \vec{J} = \frac{g\mu_B}{\hbar} \sqrt{\hbar^2 j(j+1)} = g\mu_B \sqrt{j(j+1)}$$

حال به سراغ یون منگنز می‌رویم. تراز آخر یون منگنز $3d^5$ است و ۵ الکترون در لایه d خود دارد. گشتاور زاویه‌ای این ۵ الکترون بین ۲- و ۲+ است و جمع گشتاورهای زاویه‌ای صفر می‌شود:

$$m_1 = \sum 2 + 1 + 0 + (-1) + (-2) = 0$$

شود اما چون اسپین آنها هم جهت است، با هم جمع می‌شود در نتیجه: $s = 5 \times 0.5 = 5/2$

$$j = l + s = s = \frac{5}{2}$$

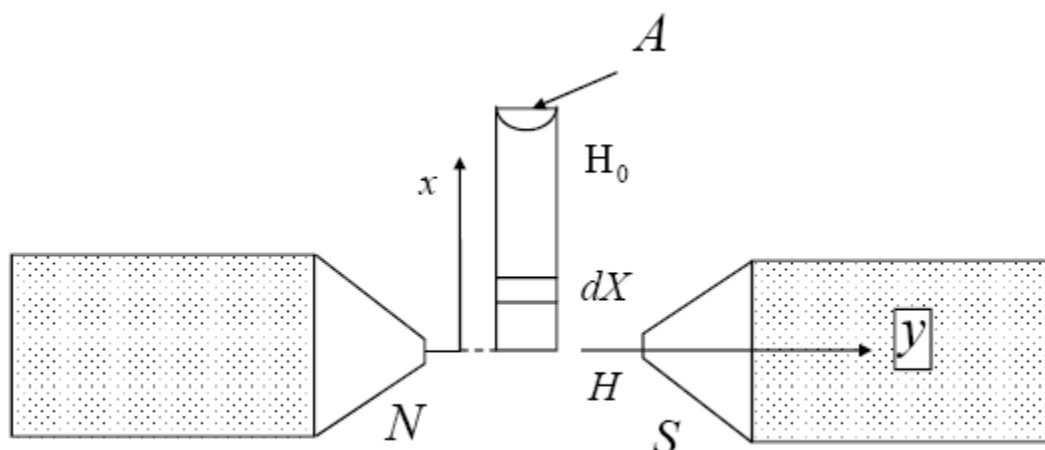
g برای منگنز حدود ۲ است و در نتیجه گشتاور مغناطیسی آن به دست می‌آید:

$$\vec{m} = 2 \sqrt{\frac{5}{2} \left(\frac{5}{2} + 1 \right)} \mu_B = 5.92 \mu_B$$

محاسبه گشتاور مغناطیسی $(\vec{m})_{eff}$ ، یون منگنز به طور تجربی:

برای اینکه بتوانیم پذیرفتاری و به تبع آن گشتاور مغناطیسی یک ماده مغناطیسی را محاسبه کنیم باید بتوانیم نیروی وارد به ماده را هنگامی که در یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت قرار می‌گیرد محاسبه کنیم.

محلولی حاوی یونهای پارامغناطیسی منگنز را در یک لوله U شکل می‌ریزیم و مطابق شکل آنرا در میدان مغناطیسی غیریکنواخت قرار می‌دهیم.



انرژی ذخیره شده در واحد حجم در میدان مغناطیسی B توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{2} H \cdot B = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (9)$$

که $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ ضریب تراوایی مغناطیسی ماده است.

به خاطر میدان مغناطیسی، انرژی یون‌ها تغییر می‌کند (چرا که یون‌ها سعی می‌کنند خود را با میدان هم جهت کنند) و این باعث می‌شود انرژی پتانسیل سیستم افزایش پیدا کند. هم جهت شدن یونها باعث می‌شود که به هم‌دیگر نیرو وارد کنند و یک‌دیگر را دفع کنند. متعاقباً ارتفاع محلول جابجا می‌شود. به همان میزان ارتفاع هوای طرف دیگر لوله U شکل نیز تغییر می‌کند. تغییر انرژی پتانسیل را می‌توان توسط رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\delta U = V \left(\frac{1}{2} \mu H^2 - \frac{1}{2} \mu_{air} H^2 \right) \quad (10)$$

که V حجم جابجا شده است و برابر است با $A dx$ در نتیجه می‌توان نیرویی را که باعث این تغییر ارتفاع شده است محاسبه کرد:

$$F_x = \frac{dU}{dx} = \frac{1}{2} A H^2 \mu_0 (\chi - \chi_{air}) = \frac{1}{2} A \frac{B^2}{\mu_0} (\chi - \chi_{air}) \quad (11)$$

از طرف دیگر این نیرو باید از طریق گرانش (یا همان فشار هیدرواستاتیکی) به تعادل برسند یا به عبارتی هم‌دیگر را خنثی کنند. نیروی هیدرواستاتیکی ناشی از فشار هیدرواستاتیکی $(\rho g h)$ برابر است با:

$$F = (\rho - \rho_{air}) g dx A \quad (12)$$

با مساوی قرار دادن طرفین رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$(\chi - \chi_{air}) = \frac{(\rho - \rho_{air})gdx}{\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}} \quad (13)$$

با داشتن تغییر ارتفاع، چگالی محلول، میدان مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی هوا می توان پذیرفتاری یونهای منگنز (χ) را محاسبه کرد.

آزمایش:

1. ابتدا شیشه U شکل و استوانه‌های مدرج را با آب معمولی و سپس آب مقطر خوب بشویید و خشک کنید.

2 مقدار ۱۵ گرم کلرور منگنز ($Cl_2Mn, 4H_2O$) را داخل بشر ریخته و وزن کنید. سپس ۱۰ CC آب مقطر به استوانه مدرج حاوی نمک اضافه نمایید و استوانه را به آرامی تکانه دهید تا نمک به خوبی حل شود. محلولی که به این طریق بدست می‌آید محلول با غلظت وزنی ۰.۶٪ شود.

3 وزن مخصوص محلول‌ها را اندازه بگیرید. (برای اینکار باید ظروف شیشه‌ای را شسته و خشک نمایید).

نکته: می‌دانید که وزن مخصوص، نسبت جرم ماده به جرم آب هم حجم آن است.

4. لوله U شکل را بین دو قطب مغناطیسی قرار دهید به قسمی که سطح محلول بین دو قطب آهنربا قرار گیرد.

5. پایه میکروسکوپ را بوسیله ترازوی که بر روی آن نسب شده افقی کنید. میکروسکوپ را برای دیدن سطح آب درون لوله میزان کنید. برای مشاهده بهتر می‌توانید از لامپی که در پشت لوله قرار می‌دهید استفاده کنید. سطح مایع را با رتیکول میکروسکوپ (و یا به طور چشمی) در محل مشخصی تنظیم کنید و ارتفاع مربوط را بخوانید.

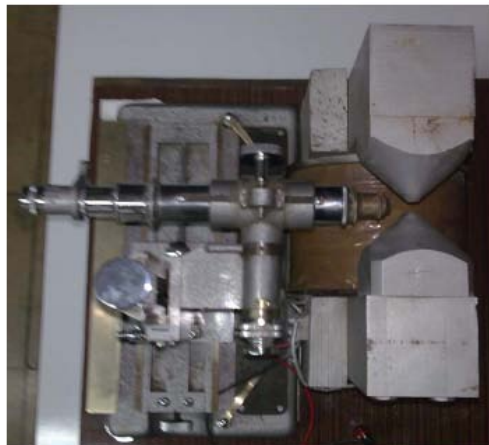
6. منبع جریان را به دستگاه وصل کنید و در یک قسمت مدار آمپرمتری قرار دهید تا جریانی را که به آهنربای الکتریکی وارد می شود نشان دهد. لوله U شکل در بین دو قطب و میکروسکوپ در مقابل لوله باید قرار بگیرد.

7. پس از اعمال جریان عبوری به آمپر متر جریان بگذرانید. سطح مایع بالا می‌آید. میکروسکوپ را در امتداد پایه قایم مدرج بوسیله پیچی که بر بالای آن نصب شده است حرکت دهید تا سطح قوسی مایع دوباره به همان وضع سابق بر خط افقی میکروسکوپ مماس گردد. باز هم ارتفاع مربوطه را بخوانید. برای جریانهای مختلف ارتفاع را خوانده یادداشت کنید.

8. تمام کارهای مربوط به بندهای ۱ تا ۷ را برای محلولی با غلظت وزنی ۰.۳٪ نیز تکرار کنید.

9. برای بدست آوردن محلول با غلظت وزنی ۰.۳٪ به کل محلول ۰.۶٪، ۲۵ CC آب مقطر اضافه کنید.

10 لوله U شکل را با آب معمولی و بعد با آب مقطر بشویید. پس از اینکه اطمینان حاصل گردید داخل شیشه از ناخالصی‌های مغناطیسی کاملاً پاک شده است. آنرا مجدداً از آب مقطر پر کنید و مراحل فوق را برای آب مقطر نیز تکرار کنید. به سمت حرکت آب نیز توجه کرده آنرا تعیین کنید.



خواسته‌های آزمایش

برای هر دو ترکیب (غلظت‌های مختلف) با رسم منحنی تغییرات dx بر حسب B^2 ، شیب منحنی را به دست آورید. با تعیین شیب منحنی و با استفاده از رابطه ۱۳ پذیرفتاری مغناطیسی مایعات فوق را محاسبه کنید. سپس با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی محلولها، ممان مغناطیسی مؤثر یون منگنز را به دست آورید.

توجه کنید که رابطه جریان و میدان مغناطیسی به صورت مقابل می باشد: $B=4200I$ که در آن B بر حسب گوس و I بر حسب آمپر می باشد

برخی مقادیر ثابت:

$\chi_{air} = 3.6 \times 10^{-7}$	پذیرفتاری هوا
$\chi_{water} = -0.91 \times 10^{-8} \text{ kgm}^{-3}$	پذیرفتاری آب
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$	تراوایی مغناطیسی
$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	عدد آووگادرو
$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$	ثابت بولتزمن
$\rho_{air} = 1.2 \text{ kg / m}^3$	چگالی هوا

به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۱. بوسیله این آزمایش چگونه می توان نوع پذیرفتاری یک محلول را تعیین نمود؟
۲. آیا می توان پذیرش دیامغناطیسی آب را در نتیجه آزمایش منظور نکرد؟

۳. آیا می‌شود در رابطه ۱۳ از χ_{air} و ρ_{air} صرف‌نظر کرد؟
۴. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش آیا می‌تواند قضاوت کنید که آیا گشتاور مغناطیسی مؤثر به غلظت یونها مغناطیسی بستگی دارد یا نه؟
۵. آیا در یک میدان مغناطیسی یکنواخت این آزمایش امکان‌پذیر است؟
۶. چگونه می‌توان گشتاور مغناطیسی یک ماده فرومغناطیس را بوسیله روش فوق اندازه گرفت؟
۷. برای اندازه‌گیری گشتاور مغناطیسی و مغناطیس شدن چه روشهای دی گری پیشنهاد می‌کنید؟
۸. چرا در چرخه آهنربا شدن یک فرومغناطیس مقداری انرژی تلف می‌شود؟ آیا در مو رد این آزمایش نیز مقداری انرژی تلف می‌شود؟
۹. اثر پدیده موینگی چه می‌شود؟

مراجع

۱. ریتس، جان، میلفورد، فودریک ج. مبانی نظریه الکترومغناطیس، ۱۹۷۹، ترجمه: صمیمی، جلال و ...
۲. کیتل، چارلز، فیزیک حالت جامد، چاپ سوم، ۱۳۸۰، ترجمه: پورقاسی، اعظم و ...
3. Sakurai, J. J. "Modern Quantum Mechanics", 1994.
4. <http://www.answers.com/topic/density-of-air>

آزمایش شکاف انرژی نیمه هادیها

هدف آزمایش

تعیین ضریب تغییرات دمائی مقاومت و شکاف انرژی نیمه هادی خالص

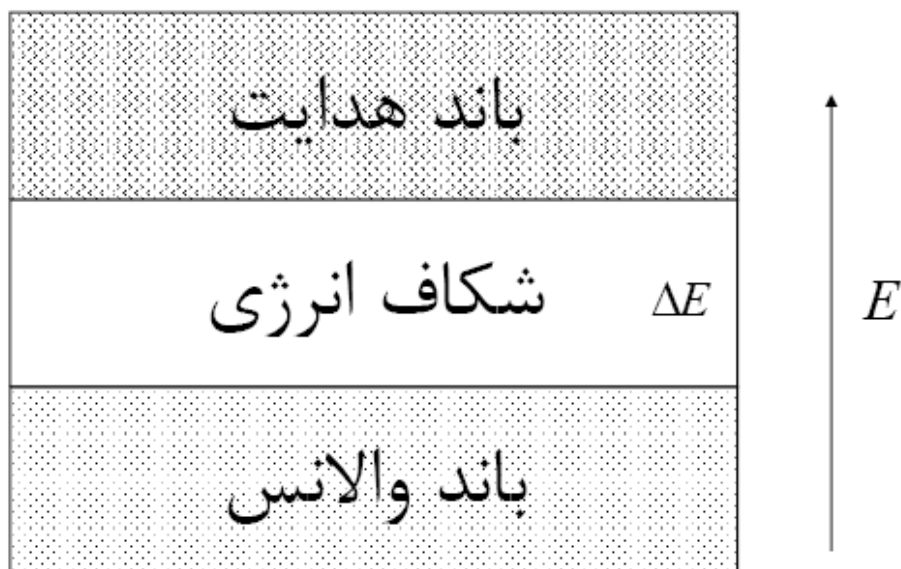
تئوری آزمایش

مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) برای یک ماده برابر مقاومت الکتریکی یک مکعب واحد آن است (جریان از یک سطح مکعب به سطح مقابل آن می‌رود). واحد معمولی آن $(\Omega - cm)$ یا $(\Omega - m)$ می‌باشد اگرچه در مورد مقاومت کم از واحد $(\mu\Omega - cm)$ یا در موارد مقاومت زیاد $(M\Omega - cm)$ نیز استفاده می‌شود. هدایت الکتریکی σ برابر $1/\rho$ می‌باشد. مقاومت الکتریکی مواد و به خصوص جامدات، در علوم کاربردی دارای اهمیت فراوان می‌باشد. نه تنها مقدار ρ بلکه بستگی آن به دما، ساختمان و مقدار خلوص آن نیز حائز اهمیت است، بر این اساس می‌توان ماده را به سه نوع تقسیم کرد: هادیها، نیمه هادیها و عایقها.

در عایقهای جامد در دمای صفر کلوین بالاترین باند انرژی اشغال شده، یعنی باند والانس، با الکترونها کاملاً پر شده است و هیچ حالت خالی و یا الکترون اضافی وجود ندارد، باند بعدی که قابل پر شدن است اما هنوز اشغال نشده است را می‌تواند باند هدایت در نظر گرفت ولی این باند از بالاترین باند والانس از لحاظ انرژی حدود چندین الکترون ولت بالاتر است. وقتی هیچ میدان الکتریکی بکار نرود، الکترونهای باند والانس به تساوی در تمام جهات حرکت می‌کنند و هیچ جریانی وجود نخواهد داشت؛ وقتی میدان اعمال میشود اصل طرد پائولی مانع از آن می‌شود تا الکترونها اندازه حرکت و انرژی خود را تغییر بدهند. از آن جا که تمام حالات کوانتومی موجود اشغال شده اند حداکثر جفتهای الکترون می‌توانند با هم تبادل حالت کنند که این امر نیز سبب ایجاد جریان نمی‌شود. در دماهای معمولی توزیع توزیع بولتزمن نشان می‌دهد که عملاً هیچ الکترونی نمی‌تواند تحریک شده و از شکاف انرژی چندین الکترون ولتی گذشته و به باند مجاز بعدی برود. در دماهای نزدیک نقطه جوش ماده الکترونهای بیشتری می‌توانند تحریک شوند و عایق ممکن است در این حالت تجزیه شود. فلزات و اغلب آلیاژها مواد رسانای جامد می‌باشند. بخشی از بالاترین باند اشغال شده توسط الکترونها پر شده در این صورت برخی (حدود یک درصد در دمای اتاق) می‌توانند آزادانه حرکت کرده و مقدار اندازه حرکت و انرژی خود را با بالا رفتن به حالات کوانتومی اشغال نشده تغییر دهند. این نوع الکترونها در یک شبکه بی نقص بدون هیچ مزاحمتی حرکت می‌کنند یعنی $\rho = 0$ ، اما در واقعیت هیچ شبکه بلوری بی نقص وجود ندارد زیرا نوسانات حرارتی ذرات اتمی در هر دمای غیر صفر آن را

نامنظم می‌کند و علاوه بر آن وجود ناخالصی و نقایص حاصل از جابجایی اتمها در هر بلور ایجاد بی‌نظمی می‌کند و بنابراین مقدار ρ هیچ‌وقت صفر نمی‌شود. ρ برای یک هادی در $T=0k$ با مقدار محدودی شروع می‌شود، همان طوری که دمای T افزایش می‌یابد مقدار ρ اول به آهستگی و بعد تقریباً به صورت خطی با T زیاد می‌شود، در دماهای بالاتر ρ ممکن است سریعتر از T بالا برود (در بحث بالا حالت ابررسانایی در نظر گرفته نشده است) نیمه‌هادیهای خالص، عناصری مانند ژرمانیم یا سیلیکن و ترکیبات شیمیایی متفاوت آنها مثل عایقها هستند و یک باند والانس پر دارند با این تفاوت که باند مجاز بعدی فقط حدود یک الکترون ولت بالاتر است، در دماهای پایین ρ خیلی بزرگ است اما در دمای اتاق یا در دماهای بالاتر تعداد قابل توجهی از الکترونها به باند بالاتر می‌رسند در این جا الکترونها می‌توانند با آزادی حرکت کرده و حامل جریان باشند و به طور همزمان حالت اشغال نشده یا حفره‌ها در باند والانس باقی می‌مانند در نتیجه یک حفره به مانند یک بار مثبت $+e$ عمل می‌کنند که می‌تواند حرکت کرده و حامل جریان باشد (در حقیقت یک الکترون همسایع حفره را پر می‌کند و حالا محل حفره صرفاً با محل اولیه این الکترون جابجا شده است)، مقاومت یک چنین نیمه هادی به سرعت با ازدیاد دما کاهش می‌یابد.

نیمه هادیهای ناخالص دارای اتمهای ناخالص انتخاب شده می‌باشند، معمولاً این مقدار برابر چند قسمت در یک میلیون (ppm) است، یک اتم ناخالص دهنده (donor) دارای یک الکترون آزاد (یا قابل آزاد شدن) بیشتر از اتمهای ماده اصلی می‌باشد بنابراین در اینجا تعداد الکترون در حالات کوانتومی با انرژی قسمتی از یک الکترون. ولت بالای باند والانس وجود دارد یعنی در دمای معمولی الکترونهای آزاد موجود می‌باشند. این نوع نیمه هادی را نیمه هادی نوع n (از کلمه Negative) گونه می‌نامند، چون الکترونهای معمولی حاملهای بار منفی می‌باشند. یک اتم ناخالص قبول کننده Acceptor یک الکترون والانس کمتر از اتمهای حامل اصلی دارد و بنابراین سعی می‌کند یک الکترون از باند والانس پر شده خارج کند و در نتیجه یک حفره بجا می‌گذارد که حامل جریان است، این نیمه هادی از نوع p می‌باشد (از p positive است)، چون حاملهای جریان حفره‌ها هستند که دارای بار مثبت می‌باشند. هر دو نوع n و p دارای ρ های نسبتاً بزرگی هستند ولی کوچکتر از نیمه هادیهای خالص می‌باشند و به تغییرات دما هم حساسیت کمتری دارند.



شکل (۱): نمایش نوارهای ظرفیت و هدایت

وسایل الکترونیکی حالت جامد مثل دیودها و ترانزیستورها مجموعه ای از نیمه هادیهای نوع n و p می باشند. ضریب دمایی مقاومت در نیمه هادیها منفی و بزرگ می باشد. بررسی این خاصیت نیمه هادی اجازه تعیین پهنای شکاف انرژی آن را می دهد. ضریب دمایی مقاومت به این صورت تعریف می شود:

$$\alpha = (\Delta R / R_0) \times \Delta T^{-1}$$

ΔT مقدار تغییر دما، ΔR مقدار تغییر مقاومت و R_0 مقاومت در یک دمای معین است. حاملهای بار در یک نیمه هادی خالص توسط تحریک حرارتی الکترونها از باند والانس به باند هدایت به وجود می آیند. رابطه مقاومت ρ برای یک نیمه هادی خالص به شکل زیر است:

$$\rho = A \exp(\Delta E / 2kT) \quad \Omega - cm$$

در اینجا:

A تابعی آهسته از دما می باشد. ΔE عرض شکاف انرژی بین باند والانس و باند هدایت است. k ثابت بولتزمن و T درجه حرارت برحسب کلوین است. شبیه رابطه بالا را می توان برای مقاومت در دمای T، $R(T)$ ، به صورت زیر نوشت:

$$R(T) = R_0 \times \exp(\Delta E / 2kT)$$

بنابراین با تقریب خوبی می توان شکاف انرژی ΔE را برای یک نیمه هادی خالص از روی شیب منحنی $\ln(R(T) / R_0)$ برحسب $1/T$ محاسبه نمود:

$$\Delta E = +2kT \times \ln[R(T) / R_0]$$

آزمایش

قطعه دربردارنده نیمه هادی دارای مقاومتی است که می توان آن را با استفاده از اهمتر دیجیتال به دست آورد.

روش آزمایش

در نظر داشته باشید که قسمتی از قطعه مزبور شکننده است. از این رو از زدن ضربه یا ایجاد فشار زیاد بر آن خودداری کنید.

قطعه دربردارنده نیمه هادی را با دقت زیاد در داخل کوره قرار دهید.

پروپ اندازه گیر دما را با دقت در داخل کوره قرار دهید، به طوری که در نزدیکی نیمه هادی قرار گیرد، سپس آن را به ترمومتر دیجیتالی متصل کنید. ترمومتر دیجیتالی را روشن کرده و دمای محیط را یادداشت کنید.

توجه کنید که هرگز نباید دمای نیمه هادی از 100°C تجاوز کند، در صورتی که متوجه شدید که دمای آن از این حد بیشتر می شود، بلافاصله آن را از کوره خارج کنید.

مدار را بسته و مقاومت مربوط به دمای محیط را به دست آورید.

واریاک را روشن کرده و بر روی مقدار 80 V قرار دهید، سپس با افزایش تدریجی دمای کوره، به طور متناوب، مقدار مقاومت R_1 را برحسب دمای کوره T در جدول یادداشت کنید.

هنگامی که دمای کوره به نزدیکی 100°C می رسد واریاک را روی درجه صفر برده خاموش کنید و اندازه گیری را تا دمای 100°C ادامه دهید.

حال از روی نتایج به دست آمده می توانید منحنی $R=R(T)$ را رسم کنید.

خواسته های آزمایش

- از روی منحنی ضریب تغییرات دمایی مقاومت (α) را به دست آورید و آن را با ضریب مربوط به اجسام زیر مقایسه کنید:
مس، آلومینیوم، پلاتین، جیوه، منیزیم.
 - در صورت امکان مقاومت مخصوص نیمه هادی را در دمای اتاق به دست آورده و با مقاومت مخصوص اجسام زیر مقایسه کنید:
شیشه پیرکس، روغن پارافین، کربن (گرافیت)، گوگرد زرد، برن (BORON)، مس، جیوه، برنج (Brass)، و آلیاژ INCONEL X.
- از اجسام بالا کدام را هادی، نیمه هادی یا عایق طبقه بندی می کنید؟

۳. شکاف انرژی نیم هادی را با رسم منحنی $\ln(R/R_0)$ بر حسب $1/T$ برای دو وضعیت افزایش و کاهش دما به کمک منحنی آزمایش محاسبه کرده و با هم مقایسه کنید. کدامیک از مقادیر شکاف انرژی صحیحتر است. چرا؟

مراجع

در مورد نیمه هادیهای خالص و بستگی مقاومت آنها به شکاف انرژی

1. Introduction to Solid State Physics, by: C. Kittel

مربوط به تغییرات مقاومت نیمه هادیها بر حسب دما

2. Methods of Experimental Physics, Vol 1, Estermann (Ed.)

در مورد رسم کننده‌ها X-Y

3. Basic Electronics for Scientists, by: J.J Brophy

در مورد مقاومت مخصوص، ضریب مقاومت فلزات، مقاومت مخصوص آلیاژها مقاومت مخصوص

عایقها و مقاومت مخصوص عناصر

4. CRC Handbook of Chemistry & Physics

در مورد شکاف انرژی نیمه هادیها

5. Experiments in Modern Physics by: A. C. Melissinos

آزمایش تشعشع ترمویونیک

هدف آزمایش

مطالعه تشعشع ترمویونیک الکترون از یک فلز گرم، اندازه‌گیری تابع کار فلز و بررسی تجربی معادله ریچاردسون - داشمن و لانگ مایر و مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر روی جریان و تعیین e/m .

تئوری آزمایش

برای اولین بار توماس ادیسون در ۱۸۸۳ ساطع شدن الکترون را از یک فلز داغ کشف نمود. بدین دلیل، این اثر را به یاد ادیسون، اثر ادیسون یا اثر تشعشع ترمویونیک گویند. با آنکه تفسیر فیزیکی این پدیده سالها (تا پدیدار شدن فیزیک جدید و مکانیک کوانتومی) طول کشید، اما علیرغم آن خیلی زود کاربردهای عملی پیدا نمود.

تعدادی از ویژگیهای مهم فلزات به ویژه فلزات ساده را می‌توان برحسب مدل الکترون آزاد تعبیر نمود. براساس این مدل، الکترون‌هایی که به طور سستی مقید به اتمهای تشکیل دهنده فلز هستند، می‌توانند در حجم فلز آزادانه به هر سو حرکت نمایند. الکترون‌های والانس اتم، الکترونهای رسانایی اند. در این مدل از نیروهای بین الکترونهای رسانایی و هسته‌های یونی صرف‌نظر می‌گردد. تجربه نشان داده است که الکترونها رسانایی در یک فلز می‌توانند مسیر مستقیمی چندین برابر فواصل اتمی را آزادانه حرکت نمایند، بدون آن که تحت اثر برخورد با سایر الکترونهای رسانایی و یا هسته‌های یونی منحرف گردند. در یک نمونه از فلز خالص در دماهای پایین، مسافت پویش آزاد میانگین الکترون‌های آزاد می‌تواند 10^8 برابر فاصله بین اتمی (بیش از یک سانتیمتر) باشد.

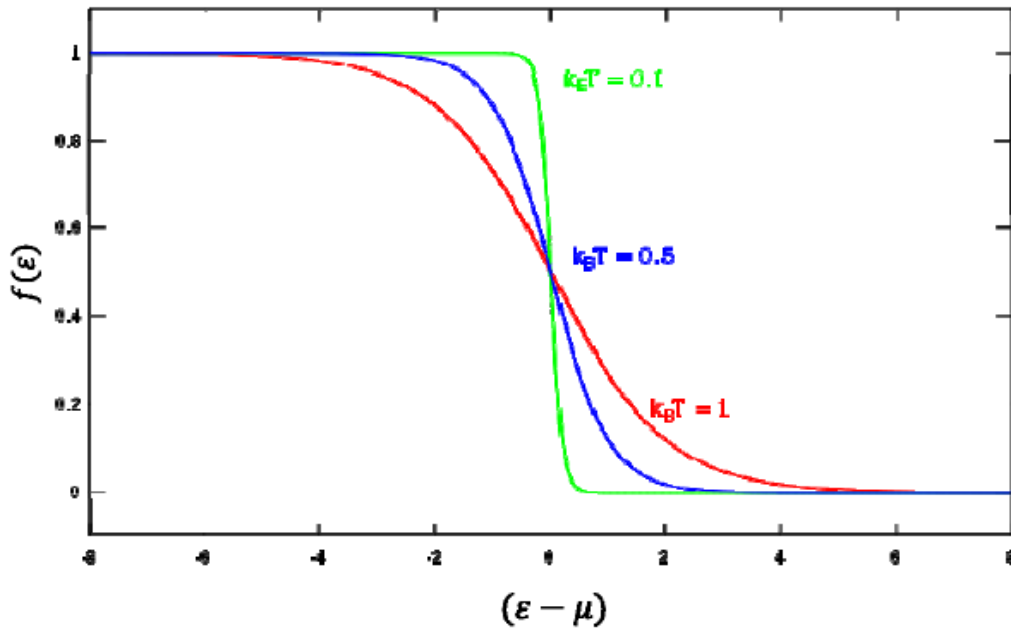
الکترون‌های آزاد فلز در دمای $T=0K$ را می‌توان یک گاز فرضی در نظر گرفت که از انرژی صفر تا حد انرژی فرمی E_f با دانسیته یکنواخت توزیع شده اند. منظور از گاز فرمی الکترونهای آزاد، گازی از الکترونهای آزاد و اندرکنش ناپذیر در محیط فلز است که دانسیته آن 10^{22} - 10^{23} الکترون در سانتیمتر مکعب بوده و از اصل طرد پائولی تبعیت می‌کند. (شکل ۱) با ازدیاد دما توزیع الکترون‌ها به هم خورده و توزیع انرژی الکترونها براساس تابع توزیع فرمی - دیراک خواهد بود (شکل ۱). لذا احتمال یافتن الکترون با انرژی E از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/KT} + 1} \quad (1)$$

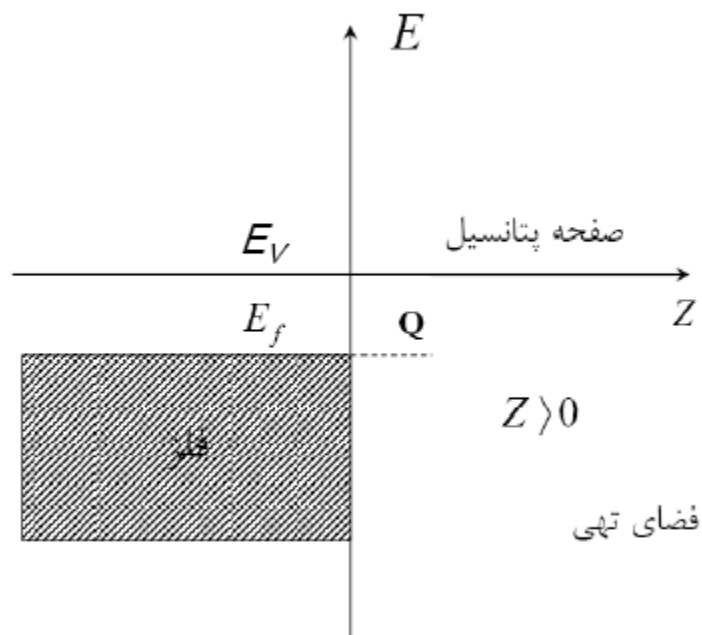
که μ پتانسیل شیمیایی و E انرژی در دمای T است. شکل ۲ انرژی الکترون‌های در فلز در دمای $T=0$ را نشان می‌دهد. می‌توان نشان داد در $T=0$ پتانسیل شیمیایی با انرژی فرمی برابر است.

نشر میدانی Field Emission

با توجه به شکل (۲)، اگر الکترون بخواهد از سطح فلز خارج شود، باید حداقل انرژی $E_V - E_f = \phi$ کسب کند که در آن E_V تراز انرژی خلا و E_f تراز انرژی فرمی است (ϕ را تابع کار فلز گویند). در این صورت الکترون در داخل یک سد پتانسیل به ارتفاع ϕ گرفتار است. حال اگر یک الکترون را در سطح صفحه فلز در نظر بگیریم. نیروی جاذبه‌ای بین بار تصویری و الکترون وجود خواهد داشت.



شکل (۱)



شکل (۲)

این بار تصویری بدین جهت که باید در $z \geq 0$ پتانسیل در معادله لاپلاس و شرایط مرزی صدق نماید، ظاهر می‌شود. در این صورت نیروی جاذبه عبارت است از:

$$F = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 z^2} \quad (2)$$

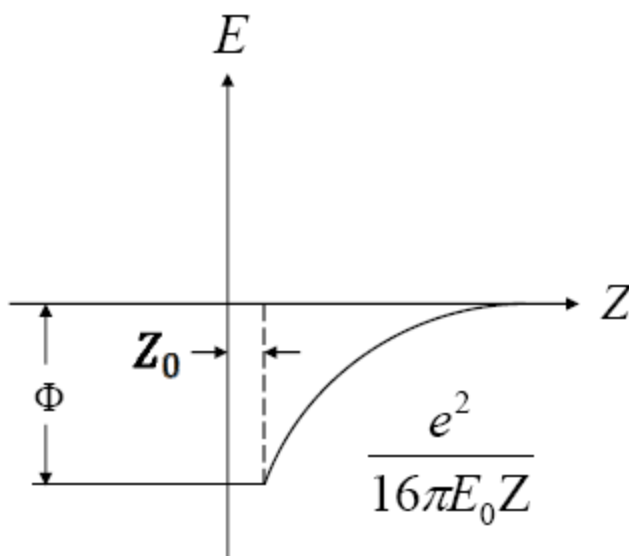
در نتیجه $V = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 z}$ پتانسیل خواهد بود و شکل ۲ به شکل واقعی تری در خواهد آمد (شکل ۳).

در تقریب اول برای محاسبه جریان فرض می‌کنیم الکترونیایی که از سطح فلز خارج می‌شوند، دارای ممتموم P_z باشند که بر پتانسیل موجود فائق می‌آیند. در این صورت

تعداد کل الکترونیایی که دارای تکانه‌ای بین \bar{p} و $\bar{p} + d\bar{p}$ هستند عبارت است از:

$$N(P)d^3P = \frac{2}{h^3} f(E)d^3P \quad (3)$$

(Z_0 فاصله‌ای است که پتانسیل بدلیل وجود الکترونها و جزئیات ساختاری سطح غیر صفر است)



شکل (۳)

اگر از برخورد الکترونها با سطح فلز صرف نظر شود، تعداد کل الکترونیایی که با ممتموم P_z در واحد زمان به سطح فلز می‌رسند، مساوی تعداد کل الکترون‌ها با ممتمومی بین \bar{p} و $\bar{p} + d\bar{p}$ ضربدر مؤلفه سرعت آنها در جهت z خواهد بود.

$$v_z = \frac{P_z}{m} \quad ; \quad N(P)v_z d^3P = \frac{2}{mh^3} P_z f(E) d^3P \quad (4)$$

اگر تعداد کل الکترونها رسیده به سطح فلز را در بار الکترون ضرب کرده و بر روی تمام مقادیر ممکن P_x و P_y (از $-\infty$ تا $+\infty$) و P_z (از $-\infty$ تا یک مقدار حداقل P_{0z}) جمع کنیم (وجود سد

پتانسیل مبین مقدار مثبت P_{0z} است)، مقدار چگالی جریان الکترون ها که از سطح فلز خارج می شوند، بدست خواهد آمد. اما در محاسبه چگالی جریان، در تقریب اول داریم:

$$f(E) \approx e^{(E_f - E)/KT} \quad (5)$$

و با جایگزینی رابطه فوق و $E = (P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)/2m$ و جایگذاری P_z در فرمول (۴) و انتگرال گیری خواهیم داشت،

$$J = \left[\frac{4\pi meK^2}{h^3} \right] T^2 \exp \left[\left(E_f - \frac{P_0^2}{2m} \right) / KT \right] \quad (6)$$

که $\frac{P_0^2}{2m} = E_s$ و $E_s - E_f = \phi$ (انرژی الکترونها هنگامی که الکترونها در سطح فلز قرار دارند) می باشند. ب توجه به تعاریف فوق

$$J_e = \left[\frac{4\pi emK^2}{h^3} \right] T^2 e^{-\phi/KT} \quad (7)$$

رابطه فوق را چگالی جریان اشباع یا معادله ریچاردسون - داشمن می نامند.

$$A_R \equiv \frac{4\pi emK^2}{h^3} = 120 \quad A - cm^{-2} - K^{-2} \quad (8)$$

که A_R را ضریب ریچاردسون می نامند. در این صورت خواهیم داشت:

$$J_e = A_R T^2 e^{\phi/KT} \quad (9)$$

در عمل چون ϕ خود تابعی از دما بود (چرا؟) و سطح فلز یکنواخت نیست کمیت A_R کمتر از ۱۲۰ است. تابعیت ϕ به دما به صورت زیر است:

$$\phi = \phi_0 + \alpha T \quad (10)$$

که α ضریب حرارتی تابع کار مؤثر و ϕ_0 کمیتی است ثابت وابسته به جنس فلز، که تابع کار ریچاردسون می نامند، از آنجاییکه لامپ مورد استفاده استوانه ای است جریان عبارت است از:

$$d_a = 0.125mm \quad l = 14.5mm \quad I = \pi dlJ \quad (11)$$

که l طول کاتد و d_a قطر آن است از سوی دیگر با تعریف

$$A = \pi d_a l A_R \quad (12)$$

جریان اشباع به شکل زیر درمی آید

$$I_0 = AT^2 e^{-\phi/KT} \quad (13)$$

و در نتیجه

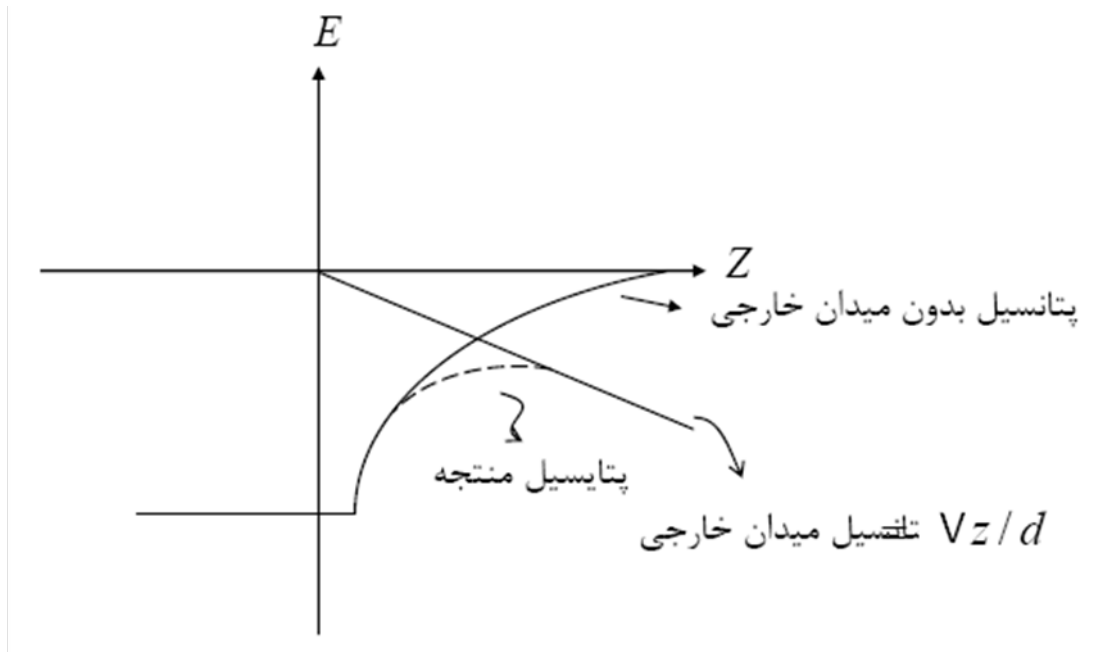
$$\frac{1}{K} = 11600 \quad , \quad \ln \frac{I_0}{T^2} = \ln A_R - \frac{\phi}{kT} \quad (14)$$

که با ترسیم منحنی $\ln \frac{I_0}{T^2}$ بر حسب $\frac{1}{T}$ می توان مقادیر A_R و ϕ را بدست آورد.

اگر میدان الکتریکی بین آند و کاتد اعمال شود، پتانسیل الکترون کاهش می یابد. (شکل ۴). در این صورت دانسیته جریان اشباع افزایش می یابد و می توان نشان داد که معادله آن به صورت

$$J = J_0 \exp[0.44\sqrt{E}/T] \quad (15)$$

که $E=V/d$ برحسب V/m و r_a فاصله بین آند و کاتد است. این پدیده به پدیده شاتکی موسوم است.

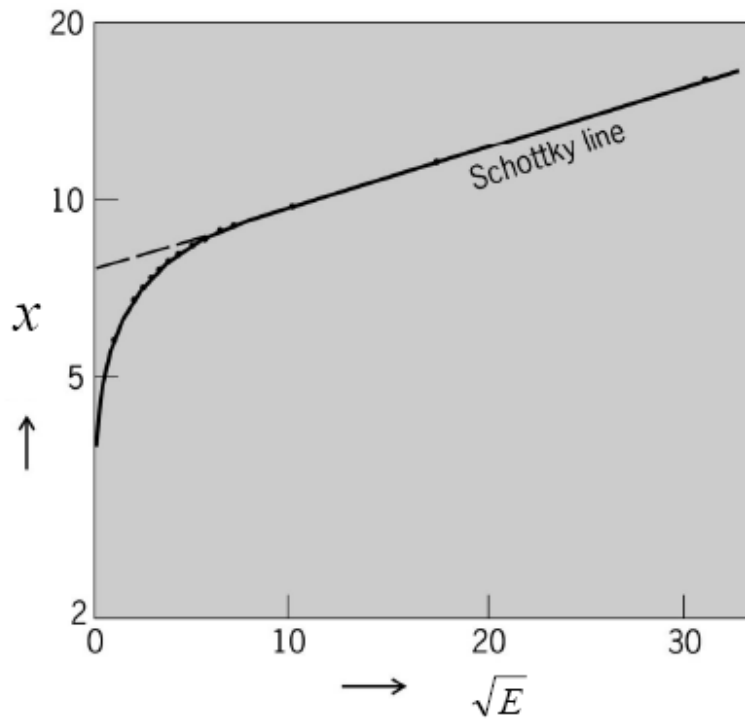


شکل (۴)

حال با استفاده از رابطه اخیر خواهیم داشت

$$\ln \frac{I}{T^2} = \ln A - \frac{\phi / K + 0.44\sqrt{E}}{T} \quad (16)$$

منحنی تغییرات $x=1$ برحسب \sqrt{E} در شکل ۵ آمده است.



شکل (۵)

پدیده تونل زنی (Tunneling effect)

هنگامی که میدان الکتریکی بین آند و کاتد افزایش یابد (میدانی بزرگتر از 10^6 V/m) ضخامت دیواره پتانسیل الکترون‌ها به مقدار بسیار زیادی کاهش یافته و الکترون‌ها براساس پدیده کوانتومی تونل از سطح فلز خارج می‌شوند. دانسیته جریان براساس این پدیده عبارت است از:

$$J = \alpha' E^2 e^{-\beta' E} \quad (17)$$

که α' و β' مقادیر ثابتی بوده و بستگی به جنس فلز دارند. به عنوان مثال برای فلز تنگستن

$$\alpha' = 1.26 \times 10^5 \text{ A/V}^2, \quad \beta' = 2.76 \times 10^{10} \text{ V/m}$$

می‌باشند.

قانون چاپلید - لانگ مایر و یا اثر بار فضایی (Space Charge Effect)

در بخش قبل مشاهده شد که بر اثر گرم کردن کاتد فضای باری در اطراف سطح فلز (کاتد) ایجاد می‌شود. حال اگر پتانسیل مثبتی نسبت به کاتد ایجاد کنیم جریانی از الکترون به آند خواهد رسید. این بخش را به بررسی این جریان اختصاص داده‌ایم. برای بررسی پدیده فقط فرض های زیر را بکار می‌بریم:

الف: سرعت الکترون بر روی کاتد صفر است.

ب: الکترون‌ها تنها تحت اثر میدان الکتریکی بین آند و کاتد سرعت می‌گیرند.

ج: الکترون‌ها در طول مسیر حرکتشان با ذرات دیگر اندرکنشی ندارند.

اگر پتانسیل اعمال شده بین آند و کاتد V باشد انرژی کسب شده توسط الکترون عبارت است از:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (18)$$

و دانسیته جریان

$$J = -\rho v \quad \rightarrow \quad \rho = -J \left(\frac{m}{2eV} \right)^{1/2} \quad (19)$$

از آنجایی که پتانسیل $V(x)$ در هر نقطه دلخواه بین دو قطب، معادله پواسون را ارضا می‌کند لذا،

$$\nabla^2 V(\vec{x}) = -\rho / \epsilon_0 = \frac{J}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2eV} \right)^{1/2} \quad (20)$$

و چون J تابع x نیست (چرا؟) و لامپ مورد آزمایش دارای تقارن استوانه‌ای است بعد از کمی محاسبه میتوان نشان داد که دانسیته جریان عبارت است از:

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} r_a^{-2} \beta^{-2} V_a^{3/2} \quad (21)$$

که در آن r_a فاصله آند تا کاتد، V_a پتانسیل آند و β ضریب تصحیح می‌باشند. معادله فوق به معادله چایلد - لانگ مایر معروف است.

برای لامپ دو قطبی مورد آزمایش (GRD7) جریان بعد از جایگزینی کمیات متناظر مشخصات لام عبارت خواهد بود از:

$$(22)$$

$$I(mA) = 14.65 \times 10^{-3} \frac{l}{R} V_a^{3/2}$$

که در آن $r_a=3.25$ mm شعاع آند، $l=14.5$ mm طول آند و $\beta^{-2} \approx 1$ می‌باشند.

شرط ماگنترون

وقتی میدان مغناطیسی B در جهت محور لامپ استوانه‌ای برقرار گردد نیروی لورنتس بر الکترون‌ها وارد می‌شود:

$$\vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -e\vec{E} - \frac{e}{c} \vec{v} \times \vec{B}$$

اگر E در جهت شعاع و B در جهت محور باشد در این صورت:

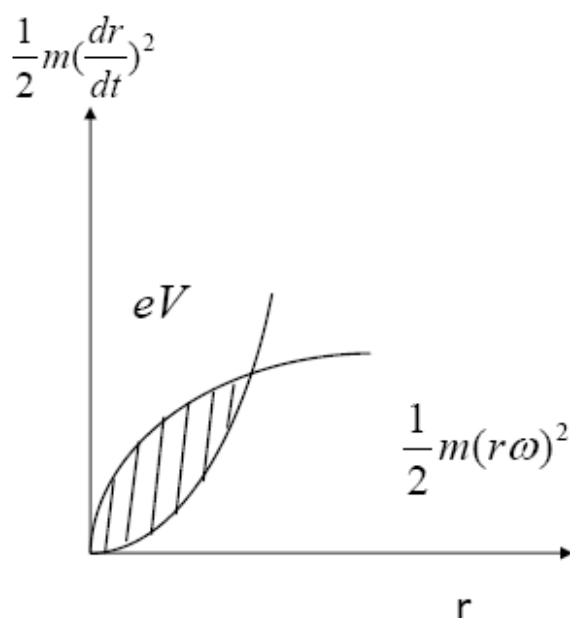
$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -eE - m\omega_0^2 r$$

در این رابطه $\frac{eB}{2mc} = \omega_l$ به فرکانس لارمور مشهور بوده است پس از انتگرال گیری رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = eV - \frac{1}{2} m (r\omega_l)^2$$

جمله اول انرژی پتانسیل الکتریکی و جمله دوم انرژی پتانسیل جانب مرکز است. برای الکترونی که به سمت آند می رود اگر پتانسیل الکتریکی بیش از پتانسیل جانب مرکز باشد به آند رسیده و جذب می شود. اگر برای $r=r_a$ پتانسیل جانب مرکز بیشتر از پتانسیل الکتریکی باشد در اینصورت جریان

لامپ قطع می شود پس: $B = \frac{2m_e c}{er_a} \left(\frac{2e}{m_2} V_a \right)^{1/2}$ در شکل ۶ مناطق هاشورزده نماینگر انرژی جنبشی است.



شکل (۶)

دستور آزمایش

مدار شکل ۷ را ببندید. I_a جریان مربوط به آند است و V_a ولتاژ آنرا نشان خواهد داد. از طرفی جریان گذرنده از فیلامان لامپ برای بدست آوردن دمای آن بکار می رود. برای همین منظور منحنی جریان نسبت به دمای فیلامان $I_f(T)$ ضمیمه شده است. میلی آمپر متر روی رنج 10mA قرار می گیرد و در صورت لزوم می توان رنج آنرا تغییر داد. با استفاده از رابطه ریچاردسون - داشمن

$$I_0 = AT^2 e^{-\phi/kT}$$

و بنابراین

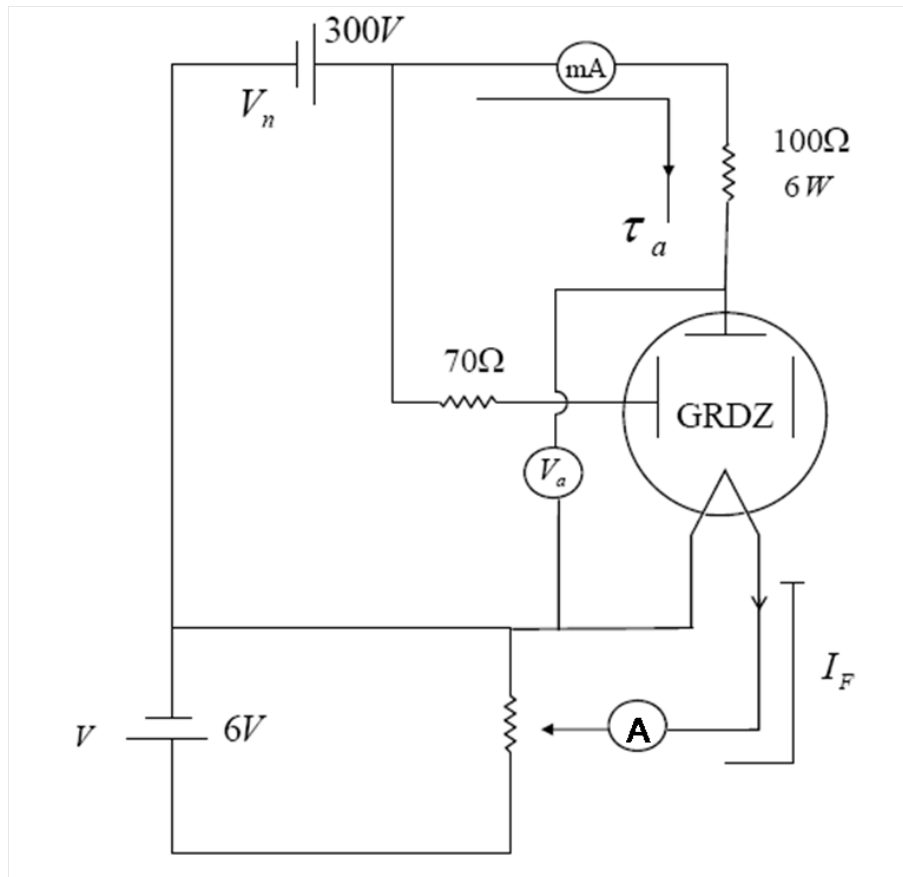
$$\ln \frac{I_0}{T^2} = \ln A - \frac{\phi}{kT}$$

I_0 جریان اشباع است که توسط میلی آمپر متر اندازه گرفته می شود و برحسب آمپر در فرمول قرار می گیرد. T_0 دمای مطلق است که از منحنی $I_f(T)$ به دست می آید. K ثابت بولتزمن و برابر

$$K = 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{k^0}$$

می باشد و در ضمن داریم:

$$A = d_a \pi A_R = 5.69 \times 10^{-6} A_R \quad A k^{-2}$$



شکل (۷)

بنابراین با رسم منحنی $\left(\ln \frac{I_0}{T^2} \right)$ بحسب $\frac{1}{KT}$ می توان ϕ تابع کار و ثابت A_R را بدست آورد. از

طرفی بنابر رابطه چایلد - لانگ میر برای لامپ مورد استفاده

$$(mA) = I_a = 14.65 \times 10^{-3} \frac{l}{r_a} V_a^{3/2} \quad I = J.A$$

که در آن $r_a = 3.25mm$ و $l = 14.5mm$ و ضریب B بدین صورت تعریف می شود

$$14.65 \times 10^{-3} \frac{l}{r_a} \equiv B$$

$$B = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} (r_a^{-2} \beta^{-2}, A) \times 10^3 \quad A \equiv 2\pi r_a \quad \beta^{-2} \approx 1$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$$

در این رابطه I جریان غیر اشباع است. بنابراین با رسم منحنی $I(V_a^{3/2})$ ضریب زاویه B بدست خواهد آمد.

[سؤال: با در دست داشتن منحنی $I(V_a)^{3/2}$ چه کمیت‌هایی قابل محاسبه‌اند.]

۱ - پس از بستن مدار و کنترل آن توسط دستیار آزمایشگاه منبع V_f فیلامان را در حالت مینیمم قرار داده و روشن کنید و سپس آنرا با استفاده از ولت سنج بر روی 6V تنظیم کنید. رئوستای موجود در مدار، جریان فیلامان را تنظیم می‌کند با استفاده از آن جریان فیلامان I_f را برابر 1.7 آمپر اختیار کنید. در حالیکه منبع ولتاژ V_a در حالت مینیمم است آنرا روشن کرده و با تغییر آن مقادیر V_a را تا 150 ولت افزایش داده و I_a (mA) را اندازه‌گیری کنید. سپس با تغییر I_f به 1.8A ، 1.9A آزمایشات را تکرار نمایید.

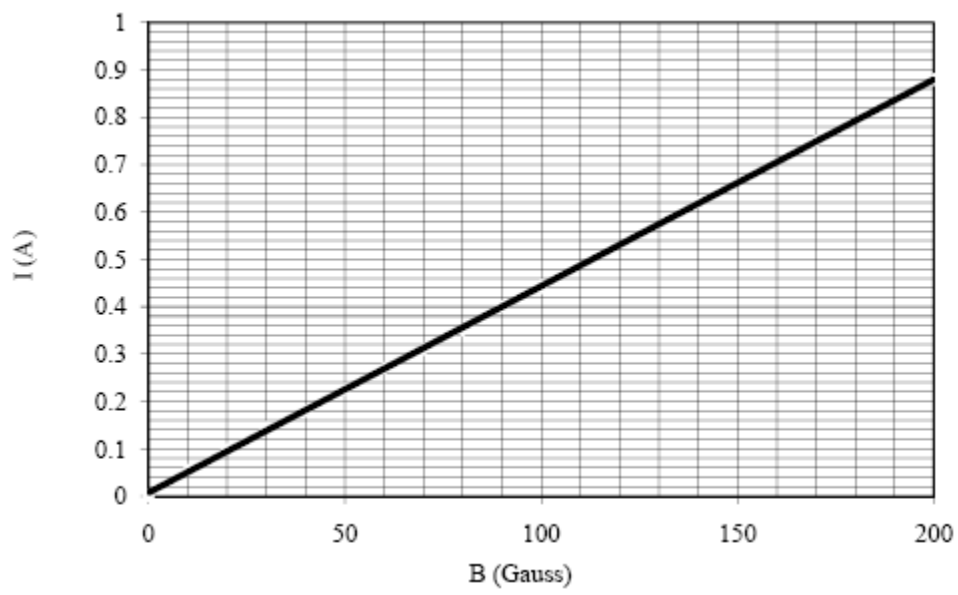
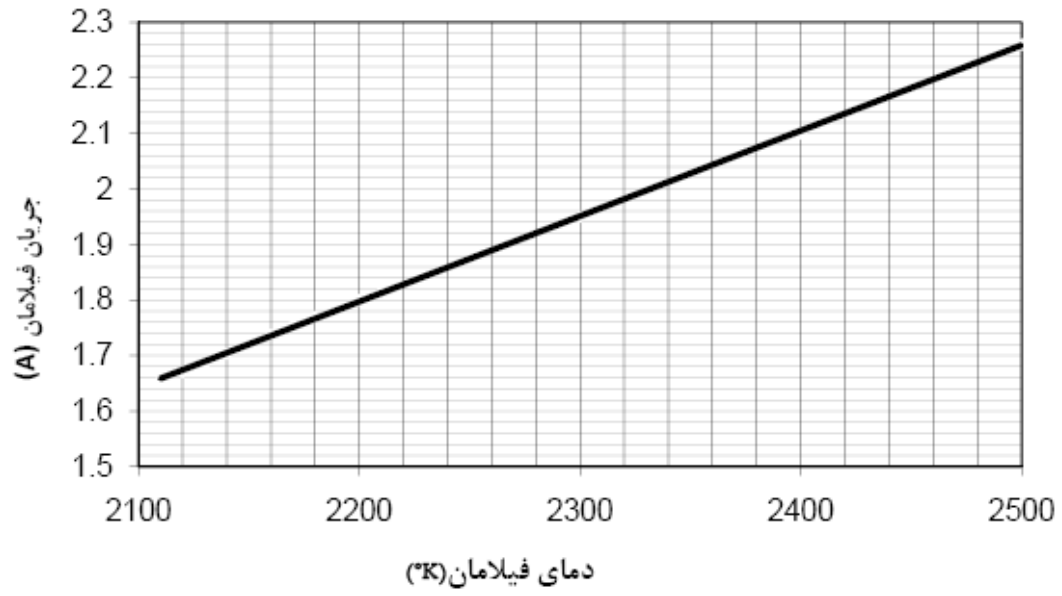
۲ - سولونوئید را روی لامپ قرار دهید و دو سر آن را از طریق امپرسنج 10 آمپر متصل روی دستگاه به منبع ولتاژ DC ، 50V وصل نمایید و آنرا در حالت مینیمم (پیچ تنظیم کاملاً در جهت خلاف عقربه‌ها چرخیده باشد) روشن کنید (ولتاژ آند را $V_a=20V$ و جریان فیلامان را $I_f=1.8A$ اختیار کنید).

جریان سولونوئید را بتدریج زیاد کنید و مقدار جریان سولونوئید برحسب I_a را تا نزدیک صفر یادداشت کرده و از طریق منحنی مربوطه میدان مغناطیسی اعمال شده به لامپ را بدست آورید . به همین صورت برای مقادیر مختلف V_a تا 40V آزمایش را تکرار کنید. ($V_a=20,25,30,35,40$) سپس آزمایش را برای $I_f=2A$ تکرار کنید.

خواسته‌های آزمایش

۱. منحنی I_α برحسب V_a را رسم نمایید سپس با استفاده از منحنی جریان فیلامان برحسب دما که ضمیمه شده است دمای هر جریان را بر روی منحنی یادداشت نمایید.
۲. منحنی $\ln(I_0/T^2)$ برحسب $\frac{1}{T}$ رسم کنید و ضریب ثابت A_R و تابع کار ϕ را بدست آورید.
۳. منحنی I_a برحسب $V_a^{3/2}$ را رسم کنید و با استفاده از آن نسبت $\frac{e}{m}$ را محاسبه کنید.
۴. نسبت $\frac{e}{m}$ را از آزمایش ۲ به دست آورد.

۵. با مقایسه مقادیر بدست آمده و مقدار واقعی $\frac{e}{m}$ خطای آزمایش‌ها را تعیین کنید.



آزمایش اثر زیمن عادی

هدف آزمایش

مشاهده اثر زیمن عادی و تعیین ثابت $\frac{e}{m}$ با استفاده از شکافتگی خط قرمز $\lambda_0 = 643.8$ نانومتر طیف لامپ کادمیم در یک میدان مغناطیسی.

تئوری آزمایش

حالت‌های کوانتومی را می‌توان با استفاده از سه اندیس n ، l و m تعیین نمود، بطوری که $m = -l, \dots, l$ و $l = 0, 1, 2, \dots$ می‌باشند. برای یک پتانسیل کولمبی، انرژی این حالات علیرغم اینکه بستگی به n و l دارد اما از m مستقل است از اینرو می‌توان گفت: $2l+1$ حالت انرژی با اعداد کوانتومی یکسان n و l در عدد کوانتومی m دارای تبهگنی می‌باشند. از دیدگاه مکانیک کلاسیک تقارن گروه پتانسیل کولمبی را می‌توان عامل ایجاد تبهگنی دانست زیرا جهت‌های مختلف چرخش الکترون بدور هسته مقدار انرژی آنها را تغییر نمی‌دهد. حال فرض می‌کنیم که در ناحیه‌ای که در آن اتم قرار دارد میدان مغناطیسی B ایجاد شود. تحت این شرایط انتظار داریم که الکترون‌ها و هسته تحت تأثیر این میدان قرار گیرند. در این مبحث ما تنها الکترونی را در نظر می‌گیریم که منفرد بوده و در خارج از لایه قرار گرفته باشد برهمکنش میدان مغناطیسی با این الکترون برای هر حالت کوانتومی تغییر انرژی ΔE را سبب خواهد شد:

$$\Delta E = m\mu_0 B \quad \mu_0 = \frac{e\hbar}{2mc} = 0.579 \times 10^{-14} \text{ MeV / gauss}$$

بنابراین انرژی هر کدام از این حالتها علاوه بر n و l به m نیز بستگی خواهد داشت و تبهگنی از بین خواهد رفت.

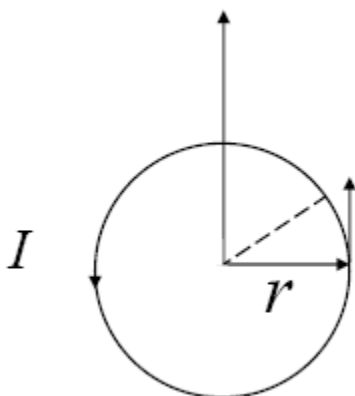
برای توضیح بیشتر این مطالب معادل کلاسیک آنرا در نظر می‌گیریم:

اندازه جریان حاصل از چرخش الکترون حول مدار بسته بصورت زیر بدست می‌آید:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} \quad (1)$$

در رابطه بالا T پریود حرکت الکترون و ω فرکانس زاویه‌ای مدار است. هرگاه شعاع چرخش الکترون

a



شکل (۱). ممان مغناطیسی ناشی از جریان یک سیم بسته

باشد آنگاه $v = a.\omega$ می‌گردد و ممان مغناطیسی حاصل از چرخش الکترون برابر $\mu = \frac{I}{c}.A$ می‌گردد که A سطح بسته حلقه دایروی و برابر $A = \pi a^2$ می‌باشد. لذا:

$$\mu = \frac{I}{c}.A = \frac{e\omega}{2\pi c} \pi a^2 = va. \frac{-e}{2c}$$

و چون اندازه حرکت زاویه‌ای الکترون، $L = m_e.v.a$ می‌باشد در نتیجه می‌توان μ را بصورت زیر نوشت:

$$\bar{\mu} = \frac{-e}{2m_e c} . \bar{L} \quad (2)$$

طبقه اصل بور اندازه حرکت الکترون دارای مقادیری منفصل است:

$$\bar{L} = l\hbar \hat{u}$$

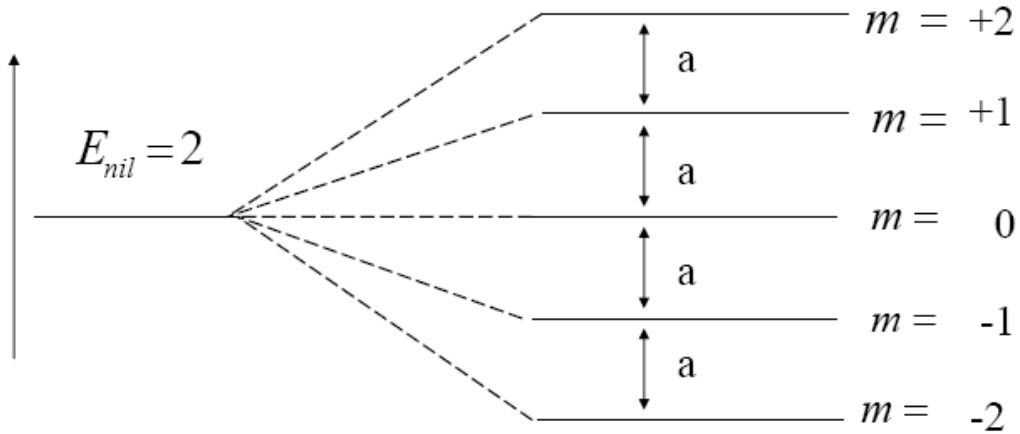
\hat{u} برداریکه در امتداد \bar{L} می‌باشد. از طرفی در یک میدان مغناطیسی همگن انرژی دو قطبی مغناطیسی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = -\bar{\mu} . \bar{B} = \frac{e}{2m_e c} \bar{L} . \bar{B} \quad (3)$$

و چون سمت‌گیری \bar{L} نسبت به \bar{B} کوانتومی است لذا تنها مقادیر $l, l+1, \dots, l-1, l$ را اختیار خواهد نمود، از اینرو انرژی یک حالت کوانتومی خاص با اندیسهای m, l و n را که در یک میدان مغناطیسی قرار ارد می‌توان با رابطه زیر نشان داد:

$$E_{nlm} = E_{nl} + m\mu_0 B \quad \mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_e C} \quad (4)$$

شکل (۲) ترازهای انرژی مربوط به عددهای کوانتومی n و $l=2$ را قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.



(بدون وجود میدان)

تحت تاثیر میدان

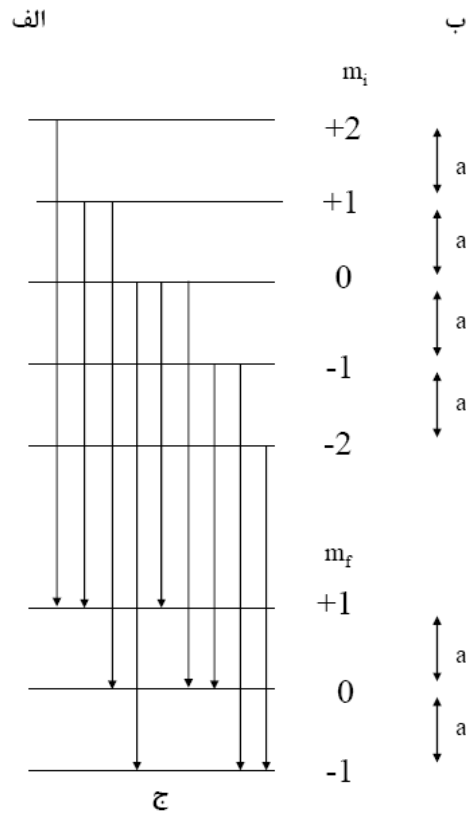
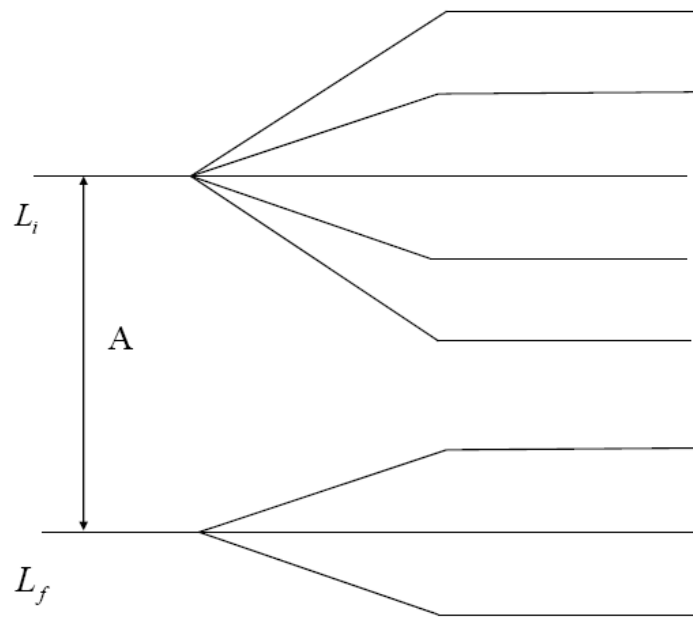
شکل (۲). شکافت ترازهای انرژی $l=2$ که تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی به پنج تراز با فواصل مساوی تبدیل می‌گردد.

همانطوری که از شکل ۲ مشهود است فواصل بین ترازها همگی یکسان و برابر $\mu_0 B$ می‌باشد. حال گذار از تراز n_i, l_i, m_i به تراز n_f, l_f, m_f را در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که مثلاً $l_f=1$ و $l_i=2$ باشد. نمودار شکل ۳ ترازهای انرژی را بدون حضور میدان، (۳.الف) و تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی، (۳.ب) را نشان می‌دهد. با توجه به قضیه ویگنر - دکارت قواعدگذار چنین بدست می‌آیند.

$$\Delta l = \pm 1 \quad (۵)$$

$$\Delta m = 0, \pm 1 \quad (۶)$$

با توجه به این قواعد، روابط (۵) و (۶)، گذارهای مجاز در شکل ۳.ج به نمایش درآمده است.



شکل (۳) شکافت ترازهای انرژی تحت تأثیر میدان مغناطیسی. (الف) ترازهای اولیه $l=2$ و نهایی $l=1$ بدون وجود میدان. (ب) شکافت ترازهای پس از اعمال میدان. جنبه گذار ممکن بین هشت زیر تراز اولیه و نهایی.

اگر فاصله شکافت انرژی حاصل در ترازهای اولیه برابر a و نهایی برابر b و اختلاف انرژی در تراز بدون وجود میدان A باشد در اینصورت اندازه انرژی آزاد شده در گذار از $i \rightarrow f$ می توان بصورت

$$E_i - E_f = A_{if} + m_i a - m_f b \quad (۷)$$

بیان کرد. در جدول (۱) اختلاف انرژی ۹ گذار شکل ۳ ج نشان داده شده است. علامت * مربوط به گذارهایی است که وقوع آنها امکانپذیر نمی‌باشد.

جدول ۱. گذارهای ممکن از $l_i=2$ به $l_f=1$ و انرژیهای مربوطه

m مربوط به تراز نهایی	m مربوط به تراز اولیه				
	+2	+1	0	-1	-2
+1	A+2-b	A+a-b	A-b		
0	x	A+a	A	A-a	
-1	x	x	A+b	A-a+b	A-2a+b

مادامی که میدان مغناطیسی B ثابت باشد شکافهای انرژی حاصل مساوی می‌مانند و همچنین رابطه زیر برقرار می‌باشد.

$$a = b = \mu_0 B$$

از اینرو با توجه به معادله (۷) تنها سه اختلاف سطح در انرژی وجود خواهد داشت:

$$E_i - E_f = A + a(m_i - m_f) = A + a\Delta m$$

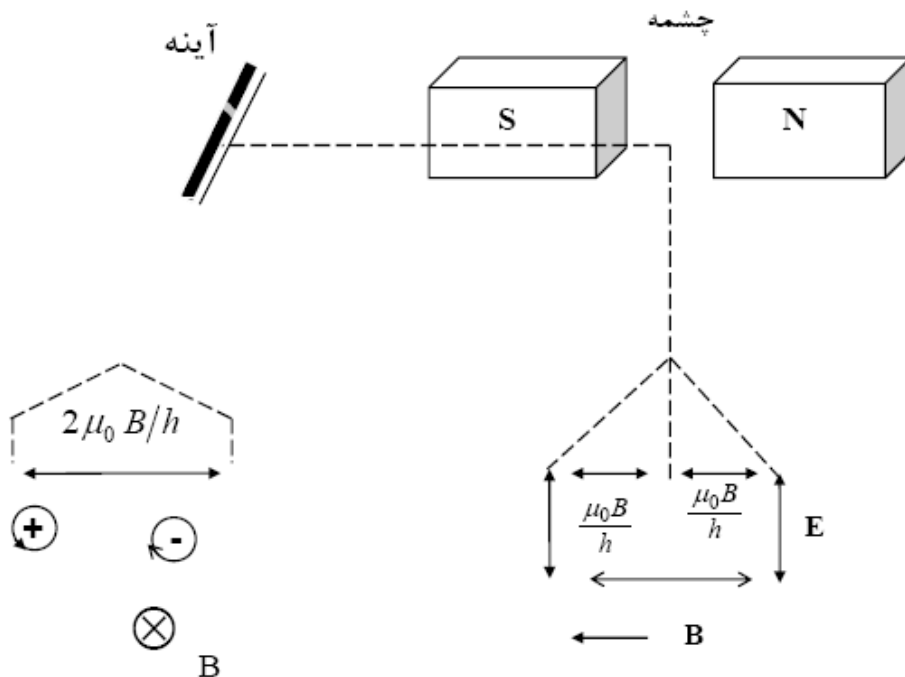
اما بنابر رابطه (۶) Δm فقط می‌تواند یکی از مقادیر +۱، ۰، -۱ را اختیار نماید لذا خط منفرد طیف

$$v = \frac{A}{h} \text{ به سه مؤلفه با اجزاء}$$

$$v_0 = \frac{A - \mu_0 B}{h}, \quad v_0 = \frac{A}{h}, \quad v_+ = \frac{A + \mu_0 B}{h} \quad (۸)$$

تبدیل می‌شود.

مطابق شکل (۴) هنگامیکه در جهتی عمود بر خطوط میدان مغناطیسی طیفهای گسیل شده از یک چشمه واقع در میدان نگریسته شود مؤلفه مرکزی در جهت میدان و دو مؤلفه کناری عمود بر آن قطبیده خواهند شد و در صورتیکه در امتداد خطوط میدان به آن نگاه کنیم دو مؤلفه کناری با قطبشی دایروی بچشم خواهند خورد و مؤلفه مرکزی حذف خواهد گردید زیرا میدانهای برداری E و B همواره عمود بر جهت انتشار قرار دارند. خط طیف $\Delta m = +1$ قطبش دایروی راست گرد و $\Delta m = -1$ قطبش دایروی چپ گرد خواهند داشت. شکافت خط طیفی را به سه مؤلفه بر اثر تأثیر میدان مغناطیسی اصطلاحاً اثر زیمنان عادی، می‌گویند.



شکل (۴). قطبش و اجزاء مختلف طیفهای اثر زیمن عادی در جهاتی عمودی و موازی خطوط میدان مغناطیسی B

لازم به یادآوری است که روابط و فرمولهای بدست آمده در این قسمت در دستگاه C.G.S می باشد و برای تبدیل آنها به دستگاه M.K.S کافیست که سرعت نور، c ، از مخرج حذف شود. در این آزمایش خط قرمز طیف لامپ کادمیم با طول موج $\lambda_0 = 643.8nm$ تحت اثر میدان مغناطیسی به سه مؤلفه، در صورتی که عمود بر خطوط میدان نگریسته شود، تجزیه می گردد. این طیف مربوط به گذار یکی از الکترونهاى لایه پنجم کادمیم، از تراز $l=2$ به تراز $l=1$ می باشد در هر دو تراز اسپین کل الکترون صفر می باشد و در نتیجه اندازه حرکت کلی الکترون، B بصورت اندازه حرکت زاویه ای خالص در خواهد آمد: تحت چنین شرایطی با در نظر گرفتن روابط (۸) اخ تلاف فرکانس دو طیف کناری را با طیف مرکزی می توان بدست آورد.

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E}{h} = \pm \frac{\mu_0}{h} \cdot B \quad (9)$$

با در دست داشتن میدان مغناطیسی B و تعیین $\Delta\nu$ می توان ضریب $\frac{\mu_0}{h}$ و از آن ثابت $\frac{e}{m}$ را بدست

آورد. برای تعیین $\Delta\nu$ نخست لازم است که $\Delta\lambda$ معین شود و سپس با داشتن اینکه $\Delta\nu = \frac{-c}{\lambda^2} \Delta\lambda$

می باشد می توان به سهولت $\Delta\nu$ را محاسبه نمود.

در عمل برای بدست آوردن اختلاف طول موج $\Delta\lambda$ از صفحه لامر - گرکه استفاده می کنیم . این صفحه دارای ضریب تکبک بسیار بالایی می باشد و بین دو خط تداخلی مجاور به فاصله Δs با تغییر طول موج $\Delta\lambda$ رابطه زیر برقرار است:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \cdot \frac{(n^2 - 1)^{1/2}}{n^2 - 1} \quad (10)$$

در رابطه (10) n ضریب شکست صفحه لامر - گرکه و برابر $1.456V$ و d ضخامت صفحه لامر - گرکه و برابر 4.04 mm می باشد.

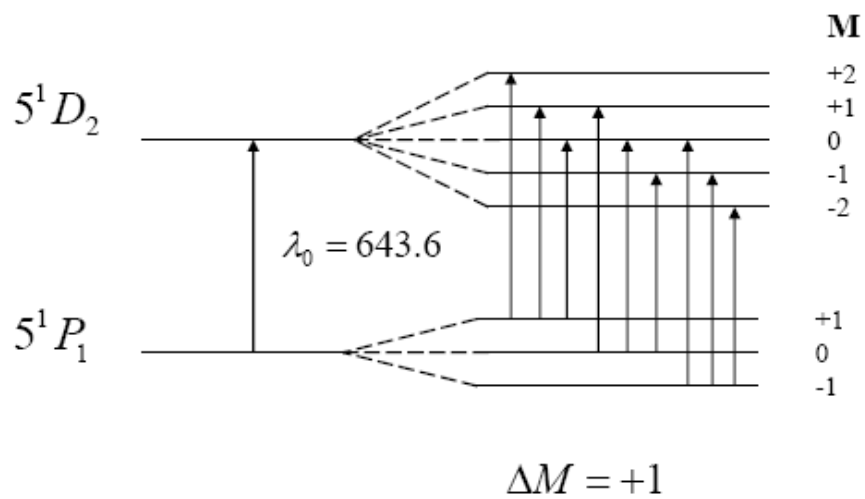
در رابطه 10 با کاهش اختلاف دو طول موج $d\lambda \rightarrow \Delta\lambda$ فواصل بین خطوط طیفی نیز کاهش خواهد یافت $ds \rightarrow \Delta s$ لذا:

$$d\lambda = \frac{ds}{\Delta s} \Delta\lambda$$

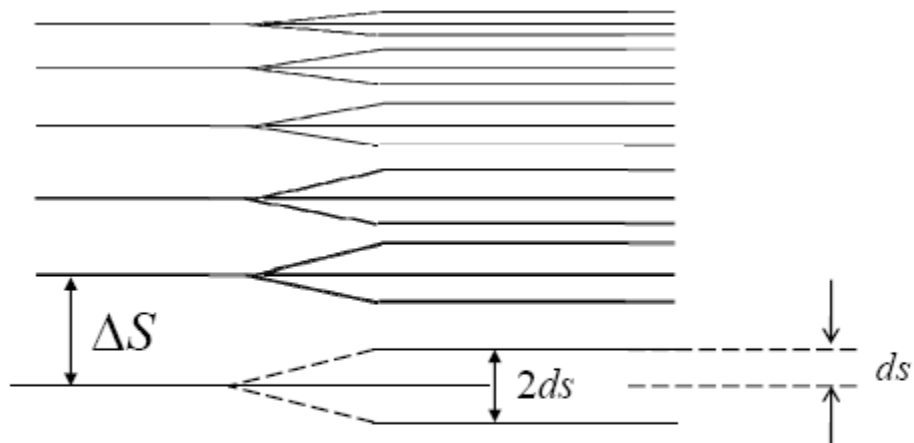
و یا با استفاده از رابطه (10):

$$d\lambda = \frac{ds}{\Delta s} \cdot \frac{\lambda^2 (n^2 - 1)^{-1.2}}{2d}$$

Δs و ds را می توان با استفاده از خطوط رتیکول چشمی تلسکوپ، (a) و ساعت میکرومتر، (b) در طول آزمایش تعیین نمود. شکل 5 خطوط طیفی مربوط به تفکیک خط قرمز کادمیم و طریقه اندازه گیری Δs و ds را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل (۵). (الف) نمایش ترازهای $5D_2^1$ و $5D_1^1$ در اتم کادمیم در حضور میدان مغناطیسی گذارهای $\Delta m = \pm 1.0$ (ب) اندازه گیری خطوط شکافته شده تحت اثر میدان مغناطیسی

وسایل آزمایش

۱. دستگاه زیمان شامل: یک جفت سیم پیچ با هسته آهنی و کفشک های مربوطه، لامپ کادمیم، قسمت توری، شامل: پایه نگاهدارنده، ساعت، چشمی، نورگیر پلاستیکی، قطبش گر، شیی به همراه لوله تلسکوپ فیلتر قرمز رنگ و صفحه لامر - گرکه، عدسی
۲. منبع تغذیه لامپ کادمیم
۳. آمپرسنج با توان اندازه گیری 20A
۴. منبع تغذیه جریان زید مستقیم با توانایی ایجاد جریان در حدود 15A
۵. سیستمهای رابط

چگونگی آرایش وسایل

مطابق شکل (۶) کفشکهای موجود در مقابل هم بر روی هسته سیم پیچ قرار دارند و لامپ کادمیم بصورت مماس بر سطوح کفشک طوری واقع شد ه که ش کاف نگاهدارنده آن به سمت اتصالات الکتریکی سیم پیچ متوجه باشد. لامپ کادمیم را به منبع تغذیه لامپهای طیفی متصل کرده و آنرا روشن کنید. در حدود پنج دقیقه برای گرم شدن لامپ زمان لازم است.

طریقه تنظیم سیستم نوری

فیلتر مرکزی را در مقابل لامپ کادمیم در موضع خود قرار داده و عدسی را طوری تنظیم کنید که نور بر روی آن در مقابل دریچه ورودی بیافتد. قطبشگر را بر روی تلسکوپ نصب کرده و نورگیر پلاستیکی را بر روی نگاهدارنده صفحه لامر - گرکه متصل نمایید بطوری که پرتوهای امتحانی نورهای زاید مسدود شوند.

با برداشتن چشمی (a):

الف) سیستم اپتیکی را به سمت چپ و راست آنقدر جابجا کنید که الگوی خطوط ظریف صفحه لامر - گرکه بچشم آید.

ب) ارتفاع پایه نگاهدارنده صفحه لامر - گرکه طوری میزان کنید که نور دریچه ورودی آنرا کاملاً بپوشاند. برای انجام این کار از پیچ موجود بر روی پایه استفاده کنید.

بندهای الف و ب را آنقدر تکرار کنید تا خطوط واضح و روشنی در بالا و پایین صفحه گرکه - لامر مشاهده گردد. سپس با قرار دادن چشمی تلسکوپ در مکان مربوطه آنرا برای واضح دیدن خطوط،

کانونی نمایید و با چرخش آن خطوط موبین را نیز برای انطباق بر روی خطوط طیفی میزان کنید . ساعت میکرومتر موجود بر روی دستگاه را با چرخش صفحه رویین بر روی صفر تنظیم نمایید. دو ترمینال وسطی سیم پیچ را به هم وصل نموه و با استفاده از دو ترمینال نهایی آمپرسنج و منبع تغذیه جریان زیاد، مدار بسته ای را بوجود آورید. دقت کنید که جهت جریان ورودی آمپرسنج و مدار با هم متناسب باشند. در این مدار دو سیم پیچ بصورت سری به هم متصل می شوند و آمپرسنج جریانی را که از متناسب باشند. در این مدار دو سیم پیچ بصورت سری به هم متصل می شوند و آمپرسنج جریانی را که از هر کدام از بویین ها عبور خواهد کرد نشان خواهد داد. در صورت نقایل برای اتصال موازی، کفایت ترمینال اول و سوم و ترمینال دوم و چهارم به هم متصل گردند.



شکل (۶). نحوه آرایش دستگاه زیمان

روش آزمایش

پس از آماده شدن قسمت نوری منبع جریان را در حالت حداقل روشن کرده و با افزایش تدریجی جریان چگونگی شکافتگی خطوط قرمز لامپ کادمیم را مشاهده نمایید. برای مقادیر خاص از جریان سیم پیچ با چرخش قطبشگر خطوط شکافته شده را حذف نموده و فاصله دو خط مجاور یک خط طیف را که در نظر گرفته اید، Δs را اندازه گیری نمایید . به همین طریق با

چرخش قطبش گر فاصله بین دو مؤلفه شکافته شده را برای خط طیف مذبور بدست آورده، $2ds$ و از آن ds را تعیین نمایید. (به شکل ۵ مراجعه شود).

در نظر داشته باشید که به علت فواصل زیاد، خطوط میانی برای اندازه گیری مناسب تر هستند. مقادیر مربوط به i ، مرتبه خط طیف، I جریان سیم پیچ، Δs فاصله دو خطوط مجاور و Δs فاصله خط شکافته شده را در جدول ثبت نمایید.

آزمایش را برای مقادیر مختلف I ، هفت بار دیگر تکرار نموده و B را محاسبه نمایید.

برای محاسبه خطای سیستماتیک دقت ابزار اندازه گیری را یادداشت کنید.

جدول اندازه گیری

i								
Δs								
ds								
I								

= دقت آمپرسنج

= دقت ساعت

= خطاهای احتمالی دیگر

خواسته های آزمایش

- با استفاده از نمودار B بر حسب I که در جزوه ضمیمه شده و با بر روی دستگاه نوشته شده است. میدان B مربوط به هر جریان را بدست آورده و در جدول ثبت نماید.
- با استفاده از نتایج آزمایشها و استفاده از روش کمترین مربعات مقدار $\frac{e}{m}$ را محاسبه کنید.
- با در نظر گرفتن خطاهای مربوط به ابزار، مقدار خطای سیستماتیک را محاسبه نمایید.
- در صورتی که بدانیم مقدار $\frac{C}{kg} = 1.7589 \times 10^{11} \frac{e}{m}$ است درصد خطای نسبی آزمایش $ش$ را بدست آورید.

۵. آیا نتایج بدست آمده از این آزمایش قابل قبول است، چرا؟

به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۱. برای تعیین مقادیر صحیح ds و یا Δs باید ضریب تبدیل مقادیر جابجایی نسبت به زوایای مربوطه در دست باشد، چرا در این آزمایش نیازی به دانستن مقدار عددی این ضریب وجود ندارد.

۲. آیا اگر مقدار اسپین کل برابر صفر نبود باز هم یک خط طیفی به سه مؤلفه تجزیه می شد؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۳. اثر زیمان چه کاربردهایی می تواند داشته باشد، نمونه‌هایی از آنرا که در صنعت و تکنولوژی کاربرد دارند ذکر نمایید.

آزمایش آشنایی با امواج مایکروویو

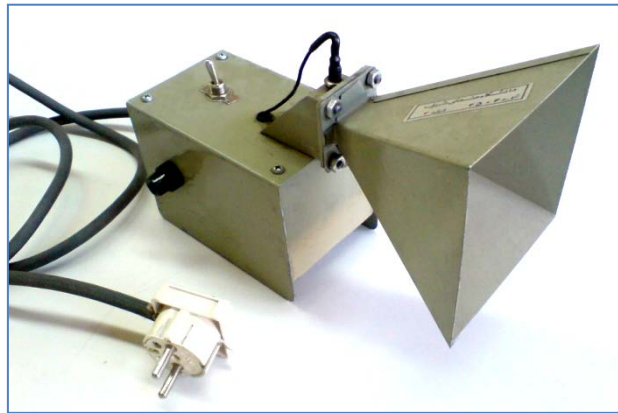
مقدمه

مطالعه پدیده‌های اپتیکی در محدوده‌ی فرکانس‌های مایکروویو دارای این امتیاز است که استفاده از طول موج سه سانتیمتری مایکروویو، ابعاد آزمایش را نسبت به آزمایشات نور مرئی بزرگتر می‌کند و در نتیجه کار اندازه‌گیری راحت‌تر می‌شود. اندازه‌هایی که در آزمایش‌های اپتیکی حدود میکرومتر هستند به سانتیمتر تبدیل می‌شوند و پارامترهایی که در آزمایش‌های اپتیک کلاسیک نامشخص هستند به خوبی ظاهر شده و قابل اندازه‌گیری می‌گردند. در این آزمایش به تحقیق کمی «انتشار»، «انعکاس» و «تداخل» امواج مایکروویو می‌پردازیم.

آشنایی با وسایل

۱. فرستنده مایکروویو

فرستنده مایکروویو با استفاده از دیود «گان» (gunn) امواجی همدوس با توان 15 mW تولید می‌کند، که قطبش آن خطی است و طول موجی حدود 3 سانتی‌متر دارد (مقدار دقیق طول موج را بایستی در آزمایش به دست آورید). دستگاهی که مشاهده می‌نمایید، شامل «دیود» (با فرکانس تشدید کاواک 10.5 GHz) و یک «شیپور» برای سمت دادن به امواج خروجی است. امواج خروجی در امتداد محور دیود (عمودی) به صورت خطی قطبیده هستند و شیپور، امواج مایکروویو را طوری ارسال می‌کند که در امتداد محور شیپور متمرکز باشد.

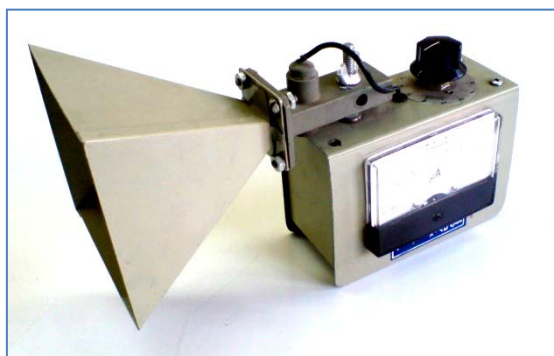


شکل ۱، فرستنده مایکروویو

۲. گیرنده مایکروویو

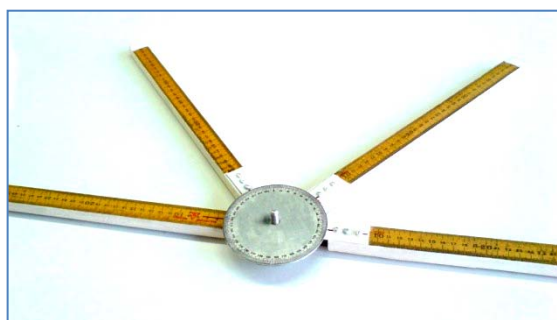
آمپر متر موجود در گیرنده‌ی مایکروویو امکان اندازه‌گیری امواج دریافتی را فراهم می‌آورد که برای سیگنال‌های کم دامنه تقریباً متناسب با شدت میدان الکتریکی سیگنال مایکروویو دریافت شده است. شیپور گیرنده مایکروویو که همانند شیپور فرستنده است، سیگنال مایکروویو را جمع و آن را به دیودی واقع در کاواک تشدید 10.5 GHz (دیود گیرنده) منتقل می‌کند. دیود فقط به مولفه‌هایی از سیگنال که در راستای محور دیود قطبیده شده‌اند پاسخ می‌دهد و ولتاژ DC به وجود می‌آورد که با دامنه سیگنال مایکروویو متناسب است.

گیرنده مجهز به تقویت کننده است که به وسیله یک پیچ، قابل تنظیم است. دیود آشکارساز موجود در گیرنده یک المان غیرخطی (نسبت به شدت امواج دریافتی) است. این غیرخطی بودن در اکثر آزمایشات مشکلی به وجود نمی آورد، اما در نظر گرفتن این نکته حایز اهمیت است که درجات خوانده شده، مستقیماً به میدان الکتریکی امواج دریافت شده مربوط نمی شود و عموماً مقدار متوسطی را منعکس می کند.



شکل ۲، گیرنده مایکروویو

۳. خط کش و نقاله

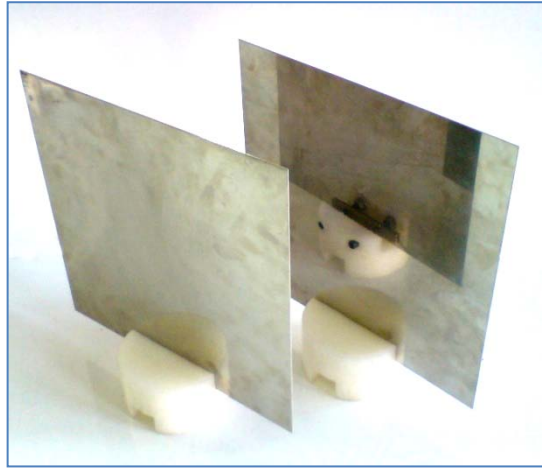


شکل ۳، خط کش و نقاله

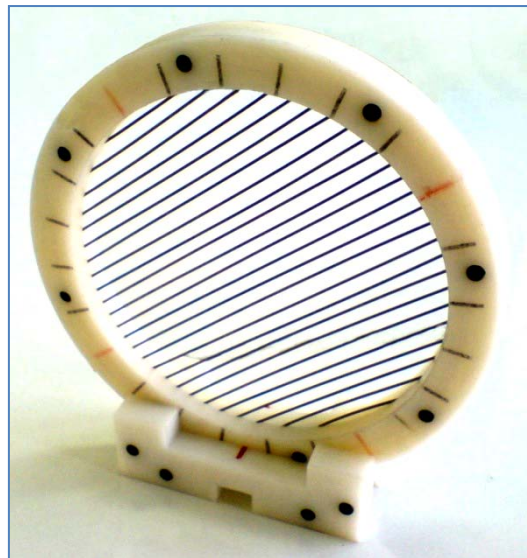
۴. صفحه شیشه‌ای و انعکاس گر فلزی



شکل ۴، صفحه شیشه‌ای و انعکاس گر فلزی



شکل ۵، صفحات فلزی



شکل ۶، قطبش‌گر

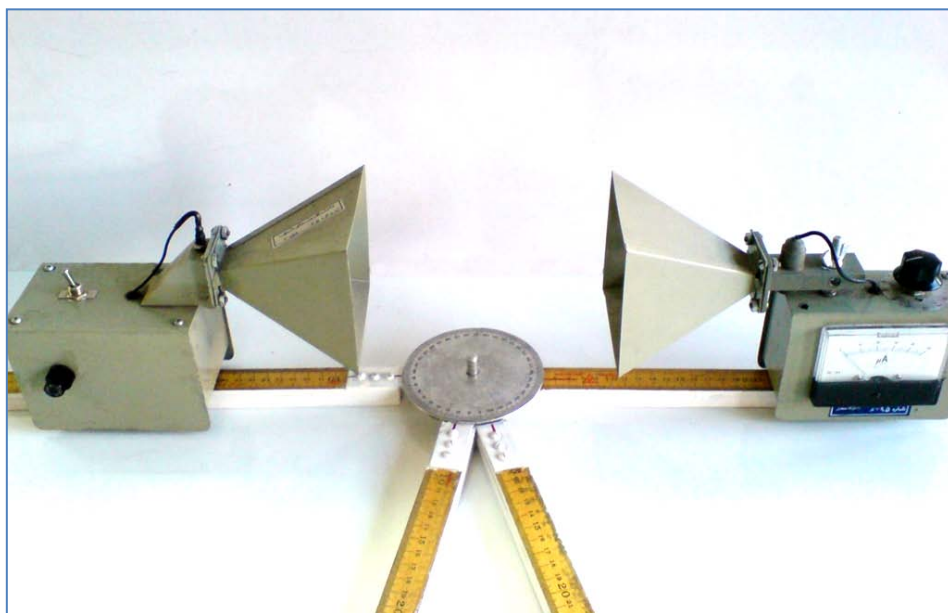
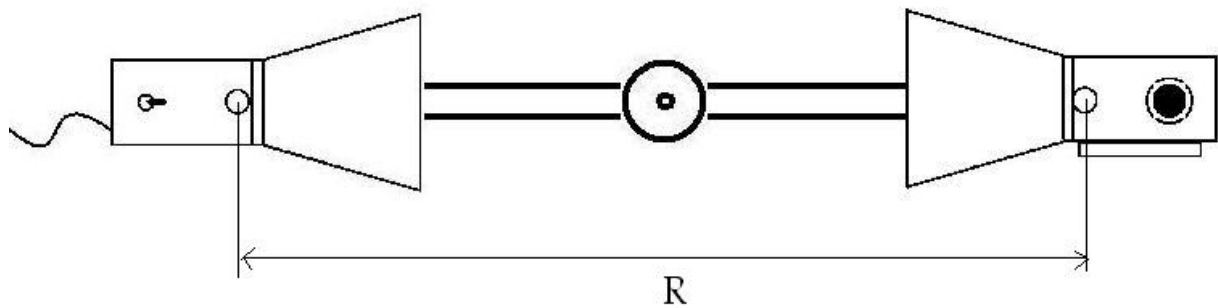
نکات

۱. هر چند خروجی فرستنده در حد استانداردهای لازم برای حفظ سلامتی است، با این حال هنگامی که فرستنده در حال کار است بهتر است از فاصله‌ی نزدیک مستقیماً به شیپور مایکروویو نگاه نکنید.
۲. پیچ تنظیم گیرنده ی مایکروویو باید در ابتدای هر آزمایش طوری تنظیم گردد که عقربه ی نشان‌دهنده، حداکثر داده‌های ممکن را جاروب کند و در طول هر آزمایش ، در این تنظیم نباید تغییری ایجاد گردد.

۳. پیچ تنظیمی که روی گیرنده است و با شماره های ۱ ، ۲ ، ۳ مشخص شده، معنای خاصی ندارند، اما هر چه بیشتر شود، حساسیت گیرنده افزایش پیدا می کند و بهتر است برای مراجعات احتمالی بعدی، عدد تنظیم شده یادداشت شود.
۴. انعکاس از وسایل نزدیک از جمله سطح میز می تواند در نتایج آزمایش ها تاثیر بگذارد. برای کاهش این انعکاسات ناخواسته، میز آزمایش را از تمام وسایل اضافی، خصوصا وسایل فلزی به غیر از آنچه برای آزمایش لازم است خالی کنید.
۵. تحت برخی شرایط مایکروویو می تواند در کار ابزار پزشکی الکترونیکی اختلال ایجاد نماید. اگر شما از دستگاه تنظیم ضربان قلب یا دیگر وسایل الکترونیکی پزشکی استفاده می کنید قبل از آزمایش، مطمئن شوید که مایکروویو در فرکانس ۱۰.۵ GHz در کار آن اختلال ایجاد نمی کند.

آزمایش ۱، انتشار

فرستنده و گیرنده را مطابق شکل (۷) روی بلندترین خط کش های نقاله قرار دهید.



شکل ۷

فرستنده را به برق وصل کرده و روشن کنید. فاصله بین دیود چشمه فرستنده و دیود آشکارساز گیرنده R را روی 40 cm تنظیم کنید (به نظر شما در اندازه گیری فواصل آیا می توان نقطه ی دیگری را غیر از محل دیودها انتخاب کرد؟). پیچ تقویت کننده ی گیرنده را طوری تنظیم کنید که عقربه، ماکزیمم انحراف را نشان دهد. فاصله R را مطابق مقادیر جدول (۱) تنظیم کنید و برای هر مقدار R ، درجه ای را که عقربه نشان می دهد، یادداشت نمایید.

R (cm)	انحراف خوانده شده
۴۰	
۵۰	
۶۰	
۷۰	
۸۰	
۹۰	
۱۰۰	

جدول ۱

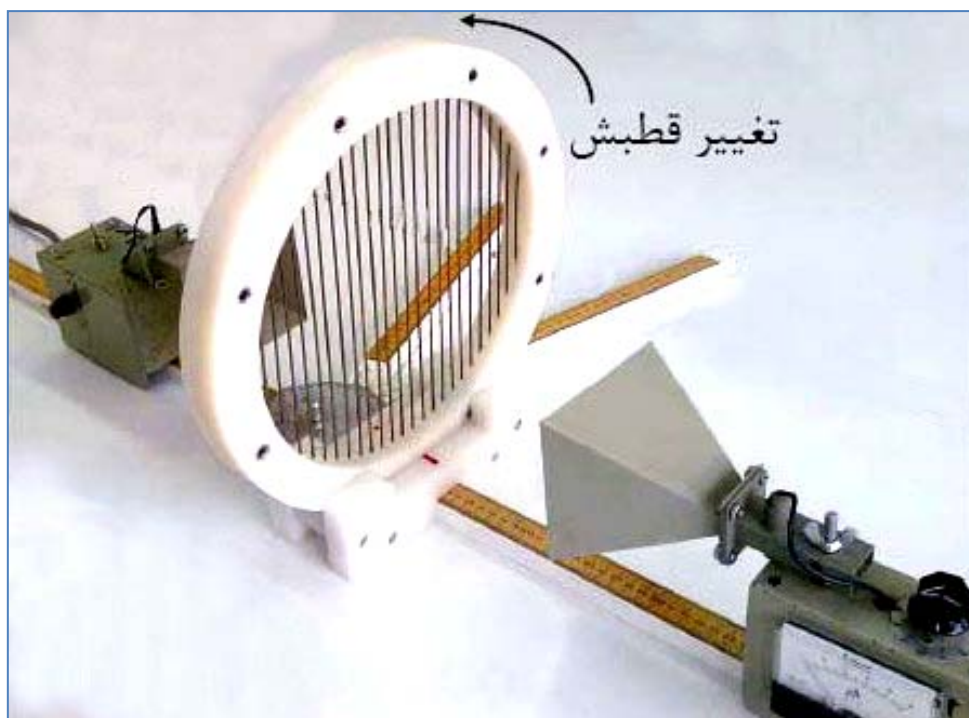
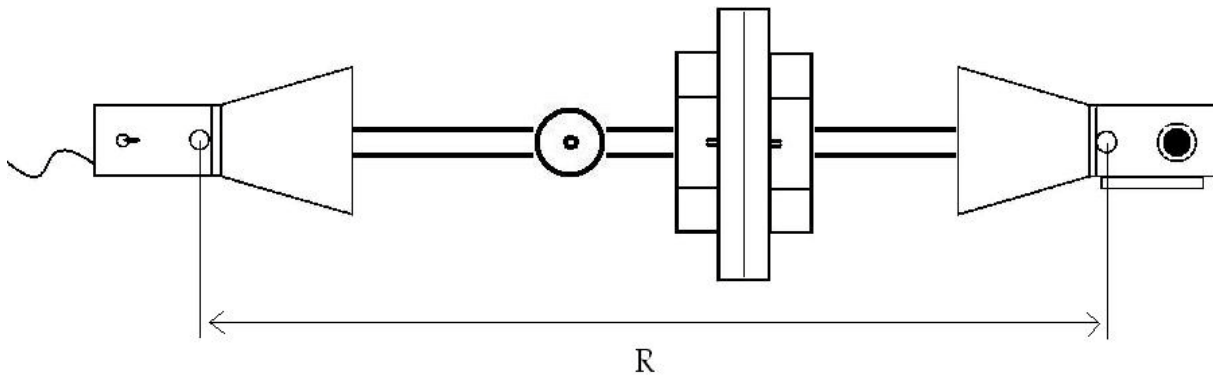
اکنون می خواهیم آزمایش قبل را با دقت بیشتری انجام دهیم. فاصله R را از 30 تا 50 سانتیمتر، به آهستگی تغییر دهید. با افزایش تدریجی فاصله بین فرستنده و گیرنده به عقربه نگاه کنید. به الگوی انحراف عقربه نسبت به تغییر مکان گیرنده توجه کنید. R ها و انحراف های \max و \min را تعیین کنید. توصیه می شود در این آزمایش فاصله را، میلیمتری تغییر دهید. در صورت لزوم تعداد خانه های جدول ۲ را بیشتر کنید.

R (cm)	Max / Min

جدول ۲

آزمایش ۲، قطبش

فرستنده و گیرنده را بر روی طویل ترین خط کش های نقاله در فاصله مناسب از هم قرار دهید و قطبش گر را مطابق شکل (۳) در مقابل گیرنده بگذارید.



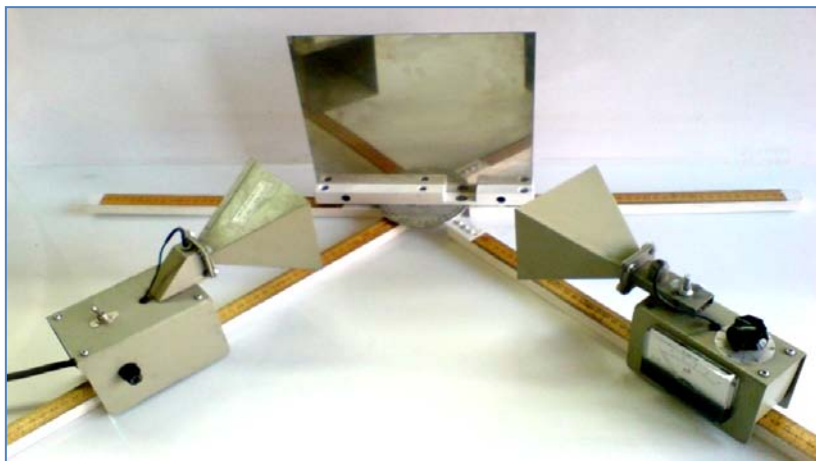
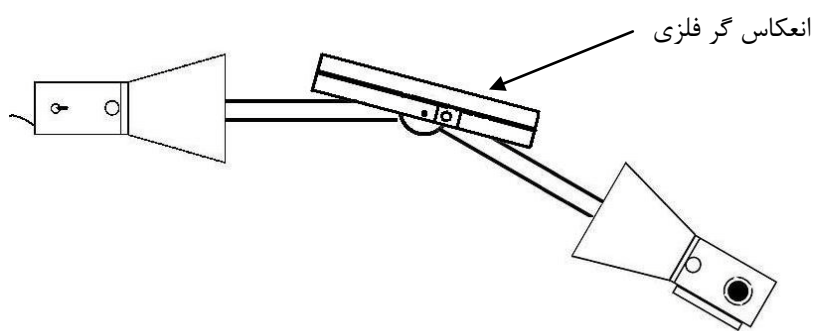
شکل ۸

قطبش گر را در زوایای داده شده در جدول ۳ قرار داده و مقدار انحراف عقربه را یادداشت کنید. دقت کنید که زاویه صفر هنگامی است که میله های قطبش گر موازی با سطح میز باشند و تقویت کننده ی گیرنده را طوری تنظیم کنید که در این زاویه ماکزیمم انحراف را نشان دهد.

انحراف خوانده شده	زاویه قطبش گر(درجه)
	۰
	۱۵
	۳۰
	۴۵
	۶۰
	۷۵
	۹۰

(جدول ۳)

آزمایش ۳، انعکاس



شکل ۹

وسایل را مطابق شکل (۹) قرار دهید و فرستنده را روشن کنید . مطابق شکل زاویه بین پرتوی ارسال شده از فرستنده (محور شیپور فرستنده) و خط عمود بر صفحه انعکاس گر، «زاویه تابش»، و زاویه بین محور شیپور گیرنده و خط عمود بر صفحه انعکاس گر، «زاویه انعکاس» نامیده می شوند.

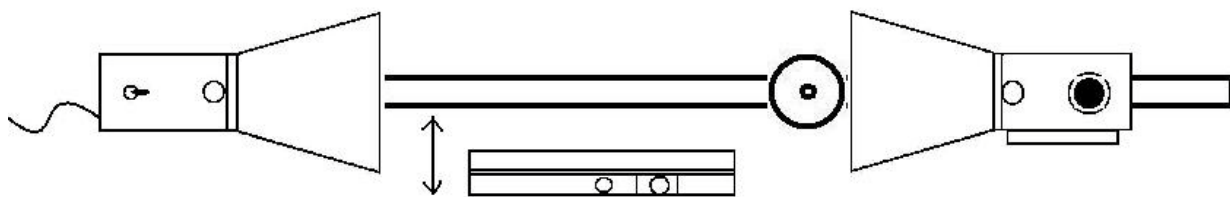
زاویه انعکاس (زاویه‌ای که در آن بیشترین مقدار انحراف در گیرنده وجود دارد) (مربوط به هر یک از زوایای تابش مشخص شده در جدول (۴) را اندازه گیری و یادداشت کنید.

زاویه تابش (درجه)	زاویه انعکاس (درجه)
۲۰	
۳۰	
۴۰	
۵۰	
۶۰	
۷۰	
۸۰	

(جدول ۴)

توجه: در برخی زوایا، گیرنده نه تنها موج انعکاس یافته، بلکه موج مستقیم ارسال شده از فرستنده را نیز دریافت می‌کند که منجر به نتیجه نادرست می‌گردد. زوایایی را که این گفته در مورد آن‌ها صدق می‌کند، مشخص کنید (چگونه؟) و این زوایا را با علامت (*) نشان دهید.

دومین قسمت آزمایش انعکاس، بررسی کیفی تاثیر بازتاب امواج از اشیاء مجاور محل آزمایش است. بدین منظور مطابق شکل (۱۰) وسایل را بچینید و انعکاس گر فلزی را در کنار خط کش قرار دهید.



شکل ۱۰

در حالی که صفحه انعکاس گر موازی محور انتقال امواج است، فاصله ی آن را از خط کش تغییر دهید و حرکت عقربه آمپر متر را مشاهده کنید. آنچه مشاهده می کنید را برای بررسی کیفی، یادداشت کنید.

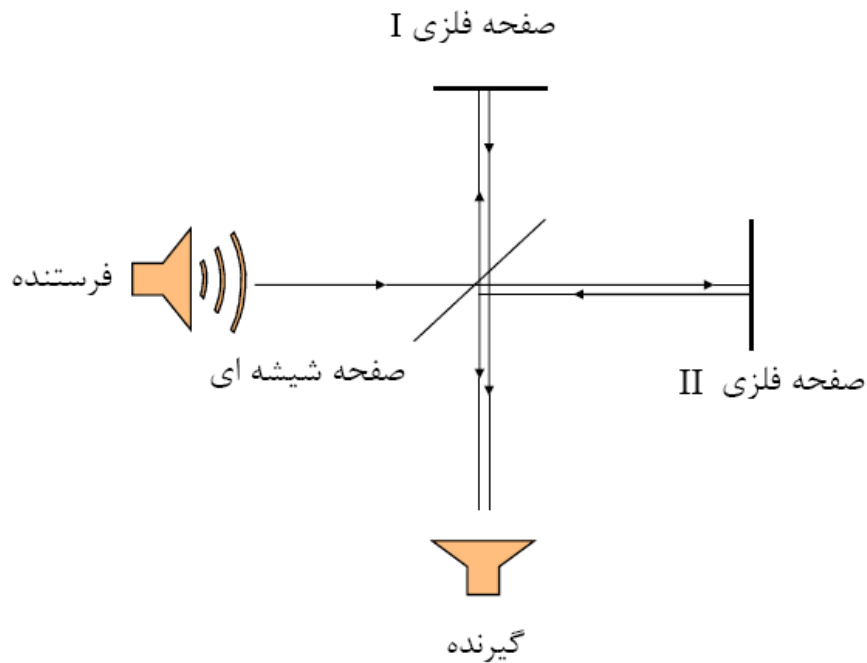
آزمایش ۴، تداخل سنج

در آخرین آزمایش، قصد داریم با روشی شبیه تداخل سنج مایکلسون، طول موج امواج تولید شده در فرستنده را تعیین کنیم. برای این منظور وسایل را مطابق شکل (۱۱) قرار می دهیم. توجه به این نکته اهمیت اساسی دارد که صفحات فلزی باید بر هم عمود باشند و صفحه شیشه ای باید با امتداد موج فرودی، زاویه ۴۵ درجه بسازد.



شکل ۱۱

موج فرودی پس از برخورد با شیشه، به دو قسمت تفکیک می شود که قسمتی از آن به صفحه فلزی اول و قسمت دیگر به صفحه فلزی دوم برخورد کرده و منعکس شده و پس از برخورد مجدد به شیشه، در گیرنده طرح تداخلی ایجاد می کنند. مسیر این دو پرتو در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲

در صورتی که تداخل سازنده باشد، گیرنده حداکثر انحراف عقربه را نشان می دهد و وقتی تداخل ویرانگر باشد، کمترین میزان انحراف را نشان می دهد. با تغییر مکان یکی از صفحات فلزی، عقربه به حرکت در می آید (آیا تغییر مکان فرستنده یا گیرنده، اطلاعات خاصی به ما می دهد؟ چرا؟). اگر فاصله ای را که لازم است صفحه فلزی حرکت داده شود تا از یک مینیمم به مینیمم دیگر (و یا از یک ماکزیمم به ماکزیمم دیگر) برسیم، Δx بنامیم، داریم $\Delta x = \frac{\lambda}{2}$ بنابراین با اندازه گیری Δx میتوان طول موج را تعیین کرد. این آزمایش را چند بار انجام دهید تا بتوانید مقدار دقیق تری از طریق متوسط گیری به دست آورید.

خواسته‌های آزمایش

۱. اندازه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی کروی با عکس فاصله از چشمه موج متناسب است و برای موج تخت ثابت است. با استفاده از نتایج آزمایش اول، تعیین کنید که موج تولید شده در فرستنده از کدام نوع است و سپس بررسی کنید که آیا مقادیر خوانده شده از آمپرمتر، متناسب با میدان الکتریکی است یا مجذور آن.
۲. نتایج به دست آمده از اندازه گیری مینیمم‌ها و ماکزیمم‌ها در آزمایش اول را ابتدا به صورت کیفی تحلیل کنید و دلیل مشاهده چنین نتایجی را بیان کنید. سپس مقدار متوسط طول موج را از داده‌ها به دست آورید.
۳. نتایج به دست آمده از آزمایش قطبش را با رابطه $I = I_0 \cos^2 \theta$ (رابطه‌ی مالوس) مقایسه کنید.
۴. چه رابطه‌ای بین زاویه تابش و انعکاس وجود دارد؟ آیا این رابطه برای تمام زوایای تابش برقرار است؟
۵. آزمایش انعکاس در حالت ایده آل می‌تواند به وسیله یک موج تخت کامل، صورت گیرد. تخت نبودن امواج گسیل شده از فرستنده چه تاثیری در رابطه تابش و بازتابش دارد؟
۶. با توجه به قسمت دوم آزمایش انعکاس، آیا تاثیر انعکاس از اشیا فلزی مجاور قابل صرف نظر است؟
۷. طول موج مایکروویو فرستنده را با استفاده از آزمایش تداخل سنج بیابید و با نتیجه‌ی به دست آمده از خواسته دوم مقایسه کنید.

سوالات آزاد برای دانشجو

- الف-چند نمونه از کاربردهای امواج مایکروویو در زندگیتان را نام ببرید. (نکته: فقط کاربردهایی که در زندگی شخص شماس را نام ببرید و برای این کار ۵ دقیقه فرصت دارید).
- ب-فکر می‌کنید که در زاویه‌ای که قطبشگر مایکروویو اجازه عبور موج را از خود نمی‌دهد، نور فرودی را جذب می‌کند و یا آن را باز می‌تاباند؟ می‌توانید حدس خود را در عمل در آزمایشگاه تست کنید.

تخلیه الکتریکی در گازها

هدف آزمایش

مطالعه و بررسی تخلیه الکتریکی در گازها و تغییرات اختلاف پتانسیل لازم برای ایجاد تخلیه الکتریکی با فشار داخل لوله.

تئوری آزمایش

آزمایشات در قرن نوزدهم نشان می‌داد که هادیهای باردار تدریجاً بارشان را از دست می‌دهند و میزان کاهش بار بستگی به شرایط محیط دارد. در اواخر قرن هیجدهم مشخص شد که حتی اگر محیط هوا هم باشد تخلیه انجام خواهد گرفت. با کشف منابع جرایم پیوسته در قرن نوزدهم قوس الکتریکی کشف شد و سپس فارادی توانست در فشار کمتر از اتمسفر تخلیه الکتریکی ایجاد کند. سپس در قرن نوزدهم اشعه کاتد یک کشف گردید و قوس الکتریکی کاربرد فعلی پیدا کرد. تخلیه الکتریکی در علم فیزیک و صنعت کاربرد فراوانی دارد مثلاً در تولید نور، فیزیک پلاسما و تولید گرما و .. اصولاً تخلیه الکتریکی به معنی جاری شدن جریان الکتریکی از میان یک محیط گازی است و این در صورتی است که بعضی از ذرات گاز یونیزه شوند و علاوه بر آن میدان الکتریکی موجود باشد تا ذرات را براند. تخلیه الکتریکی را می‌توان در فشار و جریانهای مختلف تا 10^{-6} A انجام داد. در حالت پایدار برحسب جریان، تخلیه گازی را به سه دسته تقسیم می‌کنند.

۱. تخلیه تاریک یا TOWNSEND با ظرفیت جریانی 10^{-6} A

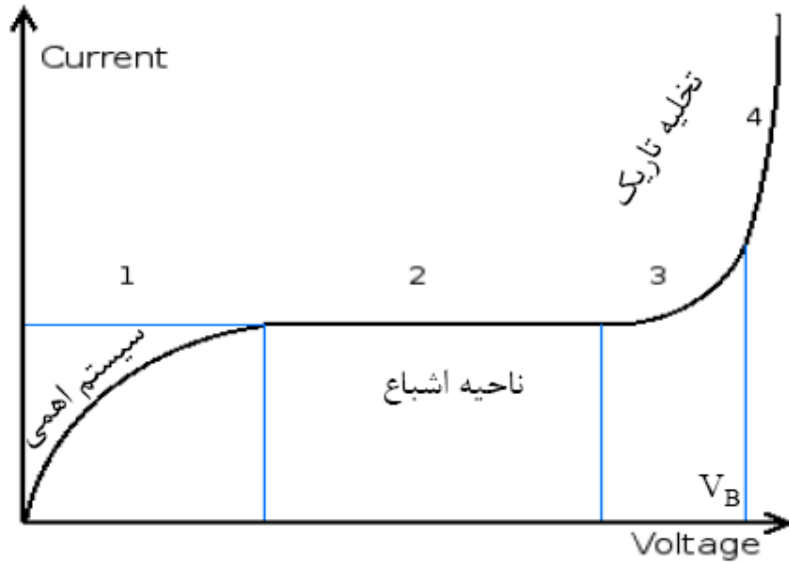
۲. تخلیه نورانی GLOW با ظرفیت جریانی 10^{-6} A تا 10^{-1}

۳. تخلیه قوسی ARC با ظرفیت جریانی بیش از 10^{-1} A

آزمایش بررسی تخلیه تاریک TOWNSEND و نقطه شکست BREAKDOWN گازها

گازها در حالت عادی دارای تعدادی یون و الکترون می‌باشند در جو حدود ۱۰۰۰ یون مثبت و منفی در هر cm^3 به علت اشعه پرنرژی ماوراء بنفش، کیهانی و x وجود دارد و در هر 2-10s عمل یونش انجام می‌گیرد. در غیاب میدان الکتریکی میزان تولید ذرات باردار مساوی با میزان بازترکیب آن‌ها است. با اعمال میدان کم مثلاً 1 V/cm یونها و الکترونها به حرکت درمی‌آیند. در جریانهای کم حالت تعادل گاز بندرت بهم می‌خورد و گاز یک سیستم اهمی است اما با ازدیاد میدان E حالت تعادل گاز بهم می‌خورد. زیرا یونها و الکترونها جذب قطبها شده و خنثی می‌شوند، یعنی تعداد ذرات باردار مؤثر کم می‌شود در نتیجه میزان ازدیاد جریان با ولتاژ کم می‌شود. اگر میزان تولید یون و الکترون ثابت

باشد با ازدیاد E حالتی وجود دارد که الکترونها و یونها بدون هیچ ترکیب مجدد به الکترونها می‌رسند. در این صورت کل بارهایی که به قطبها می‌رسند مساوی با بارهای تولید شده است و چگالی جریان j بصورت $j = ed \frac{dn}{dt}$ است. d فاصله دو قطب، e بار الکترون و $\frac{dn}{dt}$ کل میزان تولید بار در واحد حجم و در واحد زمان است. j را چگالی جریان اشباع گویند و حدود 10^{-9} A/cm^2 است.



شکل (۱)

اگر بعد از حالت اشباع اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود بیشتر شود حالتی می‌رسد که جریان دوباره زیاد می‌گردد طبیعت این ازدیاد بستگی به نوع گاز و فشار آن دارد. در این حالت علت ازدیاد جریان اینست که انرژی الکترونها که کاتد را ترک می‌کنند بیشتر از انرژی یونش اتمها است و بعضی از آنها اتمها را یونیزه و تولید الکترون و یون می‌کنند و این الکترونها در صورت کسب انرژی کافی باعث یونش اتمهای دیگر می‌شوند. با افزایش ولتاژ در نقطه خاصی جریان چندین برابر می‌شود که آن را ولتاژ شکست BREAK گویند. برای بررسی بهتر فرض کنید یک الکترون به ازاء هر سانتی متر که طی می‌کند α الکترون ایجاد می‌کند. α بستگی به سطح مقطع مؤثر الکترونها و یا احتمال یونش توسط الکترونها دارد و به اولین ضریب یونش تخلیه تارکری معروف است. پس n الکترون در طول مسافت dx تعداد dn الکترون ایجاد میکند.

$$dn = \alpha n dx \quad (۱)$$

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \alpha \int_0^d dx \quad \text{اگر } \alpha \text{ بستگی به } x \text{ نداشته باشند.}$$

n_0 تراکم اولیه الکترونها ناشی از تشعشع خارجی و d فاصله دو الکتروود است.

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad \Rightarrow \quad i = i_0 e^{\alpha d} \quad (۲)$$

i بدست آمده از طریق آزمایش بیشتر از مقدار بدست آمده از رابطه ۲ است و این ب ه دلیل تولید اضافی بارهائی است که بدلیل بمباران قطب منفی توسط یونهای مثبت بوجود می آیند . بنابراین ، دومین ضریب یونش TOWNSEND (γ) را بعنوان تعداد الکترونیائی که بر اثر برخورد هر یون با کاتد رها می شوند فرض می کنیم اگر n_a تعداد کل الکترونیائی باشد که در هر ثانیه از تمام منابع به قطب مثبت می رسند n_+ تعداد الکترونیائی باشد که توسط برخورد یونهای مثبت از قطب منفی در هر ثانیه رها می شوند n_0+n_+ تعداد الکترونیائی است که در هر ثانیه از قطب منفی رها می شوند . طبق رابطه (۲) $n_a = (n_0 + n_+)e^{ad}$ در حالت پایدار تفاضل تعداد الکترونیائی که به قطب مثبت می رسد و تعداد الکترونیائی که قطب منفی را ترک می کند باید برابر یونهای باشد که به قطب منفی می رسند یعنی

$$n_a - (n_0 + n_+) = \frac{n_+}{\gamma}$$

با جایگذاری n_+ از رابطه فوق در فرمول $n_a = (n_0 + n_+)e^{ad}$ داریم:

$$n = n_0 \frac{e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

$$i = i_0 \frac{e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad (3)$$

γ عدد ثابت کوچکی است که بستگی به نوع گاز و جنس قطب (الکتروود) دارد. در نقطه شکست چون i خیلی زیاد است و چون $\gamma \ll 1$ پس $\gamma e^{ad} \rightarrow 1$ یعنی اگر رفتار الکترونها و تغییرات سطح مقطع را بدانیم γ و α را می توان برحسب p فشار و E میدان الکتریکی محاسبه کرد. فرض کنید λ طول مسیر آزاد میانگین یک الکترون، بین تمام برخوردهایش با اتمها در جهت میدان می باشد (یعنی فاصله در جهت میدان بین دو برخورد با اتمها) انرژی متوسطی که یک الکترون در بین برخوردهایش می گیرد $Ee\lambda$ است بنابراین α که مشخص کننده تعداد برخوردهای یونیزه کننده الکترون در یک سانتی متر حرکت در جهت میدان است باید به این انرژی بستگی داشته باشد و همچنین باید بستگی به تعداد برخوردها یعنی بستگی به فشار گاز در دمای ثابت داشته باشد پس $\alpha = Pf(Ee\lambda)$ است چون در دمای ثابت طول مسیر آزاد میانگین بستگی به عکس فشار دارد $\lambda \propto \frac{1}{p}$ پس معمولاً به اینصورت می نویسند.

$$\alpha = Pf\left(\frac{Ee}{p}\right) \quad \frac{\alpha}{P} = \phi\left(\frac{E}{P}\right) \quad (4)$$

تابع ϕ اولین بار توسط TOWNSEND بطور تقریبی بصورت زیر پیدا شد که A و B مقادیر ثابت و بستگی به نوع گاز دارند.

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-B \frac{P}{E}} \quad (5)$$

در شکل ۲ برای گازهای مختلف مقادیر $\frac{\alpha}{P}$ برحسب $\frac{E}{P}$ نشان داده شده است.

γ هم مانند α بستگی به $\frac{E}{P}$ دارد با قرار دادن $\gamma = \psi\left(\frac{E}{P}\right)$ در رابطه ۴ و با توجه به اینکه به ازای

$$\gamma e^{\alpha d} \rightarrow 1 \text{ داریم } \gamma \ll 1$$

$$\psi\left(\frac{E}{P}\right) e^{P \phi\left(\frac{E}{P}\right) d} = 1$$

و با توجه به اینکه رابطه فوق در مورد نقطه شکست صحیح می‌باشد داریم:

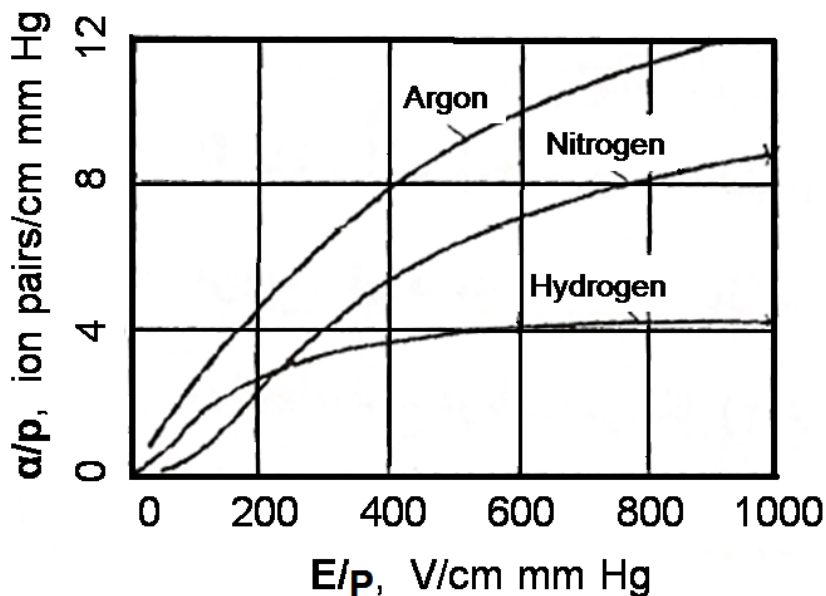
$$\psi\left(\frac{V_B}{Pd}\right) e^{Pd \phi\left(\frac{V_B}{Pd}\right)} = 1 \quad (6)$$

یعنی V_B ولتاژ شکست بستگی به حاصلضرب فشار گاز و فاصله بین قطبها دارد که به قانون پاشن

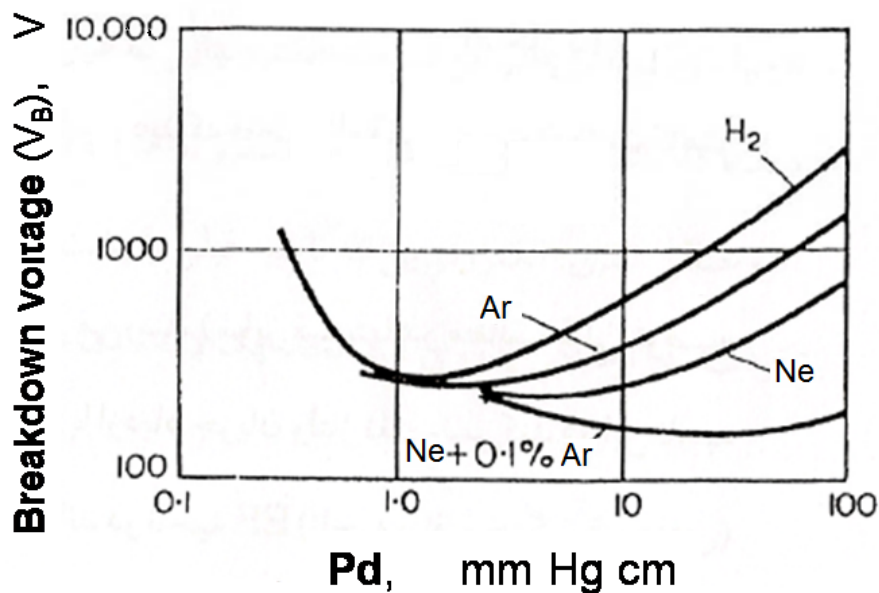
$V_B = f(Pd)$ معروف است.

منحنی V_B برحسب p برای هر نوع گاز و الکتروود یک می نیمم دارد که پتانسیل شکست نامیده

می‌شود. شکل شماره ۳ منحنی V_B برحسب p را برای چهار گاز نشان می‌دهد.



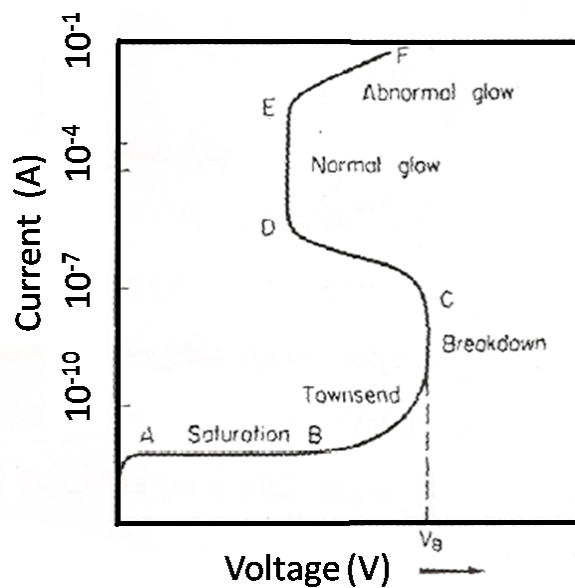
شکل (۲)



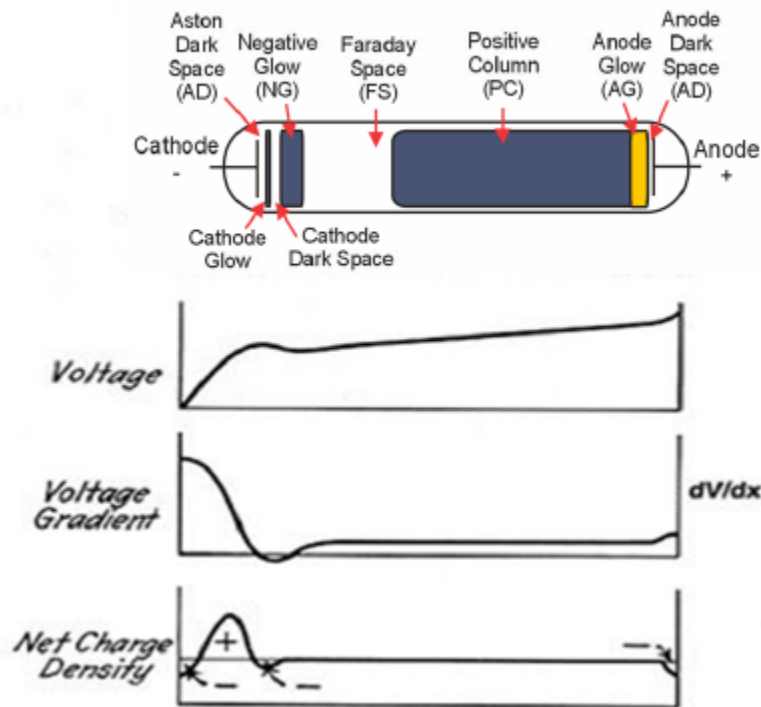
شکل (۳)

تخلیه نورانی

بعد از ولتاژ شکست با افزایش جریان تخلیه بصورت نورانی است. فضای تخلیه در فشار کم به نواحی مختلفی تقسیم می شود شکل شماره ۴ منحنی جریان به ولتاژ را در فشار 1 torr نشان می دهد شکل شماره ۵ نواحی، ولتاژ، میدان و نوع بار را برای تخلیه نورانی نشان می دهد.



شکل (۴)



شکل (۵)

اگر فشار را ثابت نگه داریم و فاصله قطبها را کم کنیم خواهیم دید که فقط طول قسمت ستون مثبت کاهش می‌یابد و بقیه قسمتها بدون تغییر باقی خواهند ماند.

در اینجا توضیح دو ناحیه در شکل (۴) ضروری به نظر می‌رسد (سایر قسمتها در مطالب قبلی توضیح داده شده‌اند) در ناحیه DE (ناحیه برافروختگی عادی) با ازدیاد جریان ولتاژ تغییر نمی‌کند در این ناحیه برافروختگی کاتدی تنها قسمتی از سطح کاتد را می‌پوشاند در ناحیه EF (ناحیه برافروختگی غیر عادی) با افزایش جریان ولتاژ نیز افزایش می‌یابد و برافروختگی کاتدی کل سطح کاتد را پوشش می‌دهد. وقتی در یک لوله تخلیه الکتریکی به وقوع می‌پیوندد در طول لوله تخلیه نواحی تاریک و روشنی دیده می‌شود که شکل ۵ این نواحی تاریک و روشن را در لوله تخلیه نشان می‌دهد. نواحی تاریک و روشن به ترتیب زیر از ناحیه کاتد تا آند در شرایط مناسب قابل مشاهده هستند.

ناحیه تاریک آستون: این ناحیه لایه بسیار نازکی است که روی کاتد را می‌پوشاند و بعلت کم بودن سرعت الکترونها در این ناحیه و جریان یونهای مثبت، بار فضا مثبت و میدان نیز مثبت است.

ناحیه افروختگی کاتد: در این ناحیه الکترونهايي که کاتد را با انرژی کم ترک کرده اند دوباره با یونهایی که به طرف قطب منفی می‌روند ترکیب می‌شوند و باعث تولید نور مرئی می‌شود.

ناحیه تاریک کاتدی: در انتهای ناحیه افروختگی کاتدی به علت کاهش جریان یونهای مثبت، بار مثبت فضا کاهش می‌یابد در این ناحیه الکترونها شتاب می‌گیرند ولی چون انرژی کافی ندارند نمی‌توانند اتمها را یونیزه کنند و به همین دلیل این ناحیه تاریک است.

ناحیه افروختگی منفی: در این ناحیه اتمها یونیزه شده و نور مرئی ایجاد می کنند و بار فضا منفی و میدان نیز منفی می باشد.

ناحیه تاریک فاراده: بار فضا در این ناحیه صفر است چون الکترونها با یونهایی که جذب قطب منفی می شوند در این ناحیه دوباره ترکیب می گردند.

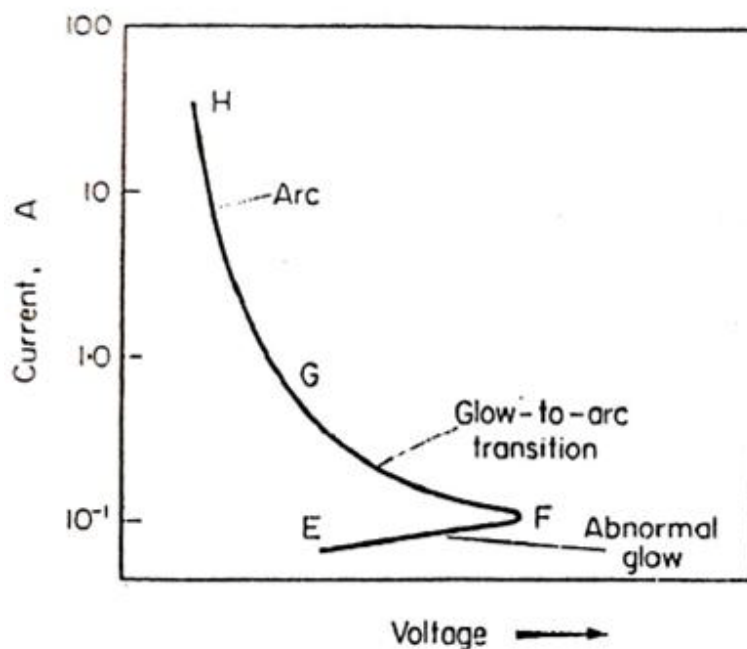
ستون مثبت: در این ناحیه گاز یونیزه شده و پلاسما نامیده می شود بطوریکه E مثبت و بار صفر است.

ناحیه تاریک آندی: در این قسمت الکترونهای که انرژی خود را در برخوردهای متوالی در ستون مثبت از دست داده اند از این ناحیه عبور می کنند و به طرف آند می روند.

افروختگی آندی: الکترونهایی که ناحیه قبلی را پشت سر گذاشته اند؛ انرژی مختصری که طی آن کسب کرده اند در نزدیکی یا روی آند ایجاد یک لایه نازک تابناک می کنند.

تخلیه قوسی

شکل شماره ۶ منحنی ولتاژ بر حسب جریان از تخلیه نورانی تا قوس را نشان می دهد. با انتخاب منبع با مقاومت کمتر میتوان این نوع تخلیه را ایجاد کرد در این نوع تخلیه ستون مثبت بشدت نورانی می شود و تخلیه شکل نورانی بخود می گیرد در ناحیه تخلیه قوسی ولتاژ حتی به کمتر از 50V هم می رسد.



شکل (۶)

وسائل

لوله تخلیه بزرگ و منبع تغذیه ولتاژ بالا و دستگاههای اندازه گیر آمپر متر و ولت متر، پمپ تخلیه و فشارسنج ترموکوپل - مجموعه لوله های تخلیه.

آزمایش ۱

لوله های تخلیه شماره دار را در مدار قرار داده، دو الکتروود را به منبع تغذیه DC وصل کنید. منبع باید خاموش و کمینه باشد. برای هر یک از لوله ها با تغییر ولتاژ، جریان را برای ولتاژهای مختلف اندازه گیری کنید و منحنی ولتاژ بر حسب جریان را رسم کنید. از روی منحنی تغییر ولتاژ بر حسب جریان ولتاژ شکست را برای فشارهای مختلف بدست آورید، منحنی V_B را بر حسب فشار رسم کنید و شکل تخلیه و ولتاژ شکست را در هر کدام بررسی و اندازه گیری کنید.

لوله شماره ۱	25 mmHg
لوله شماره ۲	10 mmHg
لوله شماره ۳	5 mmHg
لوله شماره ۴	2 mmHg
لوله شماره ۵	0.03 mmHg
لوله شماره ۶	0.01 mmHg



شکل (۷)

آزمایش ۲

توجه: بعلت تولید اشعه X به مقدار ناچیز بهتر است زمان آزمایش کوتاه گردد.

ابتدا لوله تخلیه اصلی را به پمپ تخلیه وصل کنید فشار سنج را در جای مخصوص قرار دهید دو الکتروود را مطابق شکل زیر به منبع تغذیه DC وصل کنید. منبع باید خاموش و کمینه باشد.



شکل (۸)

دو شیر A و B را بسته، پمپ را روشن کنید و سپس به آرامی شیر B را باز کنید پس از تخلیه محافظه و رسیدن فشار به حدود 0.1 torr منبع را روشن کرده و برای فشارهای ثابت 0/۱ و 0/۲ و 0/۵ با تغییر ولتاژ، جرطن را برای ولتاژهای مختلف اندازه گیری کنید و منحنی ولتاژ برحسب جریان را رسم کنید.

برای ثابت نگه داشتن فشار می توان از شیر A کمک گرفت. از روی منحنی تغییر ولتاژ برحسب جریان ولتاژ شکست را برای فشارهای مختلف بدست آورید و منحنی V_B را برحسب فشار رسم کنید سپس پمپ را بطریق زیر خاموش نمایید تا روغن پمپ وارد لوله نشود - الف - شیر B را ببندید. ب: شیر A را به آرامی باز کنید. ج: پمپ را خاموش کنید د: شیر B را باز کنید. مشاهدات خود را برای رهاچی مختلف تشکیل شده در لوله تخلیه شرح دهید.

آزمایش ۳

لوله اصلی شیشه را تخلیه کرده و سپس گازهای مختلف را به آهستگی و با دقت وارد آن کنید . با اتصال لوله به پمپ تخلیه آزمایش ۱ را برای گازهای مختلف تکرار نمایید.

به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۱. نقاط نورانی که در ولتاژهای بالا روی قطبها دیده شده و زود از بین می‌روند چیستند؟
۲. تخلیه قوسی چه کاربردی دارد؟
۳. برای اندازه‌گیری شدت اشعه α ، β و γ از شمارنده ی گایگر استفاده می شود عمل شمارنده، را شرح دهید.
۴. آزمایشی برای تعیین α طرح کنید.
۵. چرا در اطراف قطب مثبت بار فضا منفی است؟

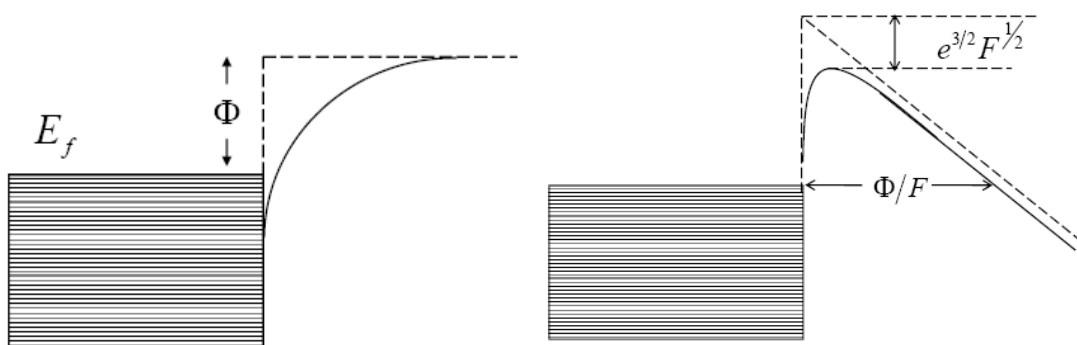
میکروسکوپ نشر میدانی (FEM) Field Emission Microscopy

هدف آزمایش

مشاهده و بررسی ساختار بلوری و تابع کار فلزات با استفاده از میکروسکوپ نشر میدانی.

مقدمه

E. W. Muller در سال ۱۹۳۶ میلادی ساخته شد. این میکروسکوپ در زمینه شناسایی خواص سطح کاربرد وسیعی دارد و می‌تواند علاوه بر مشاهده آرایش اتمی و نواقص سطح، تابع کار سطح را اندازه‌گیری کرده و اطلاعاتی در مورد سینتیک جذب و پخش سطحی ارائه دهد. میکروسکوپ براساس تونل زنی الکترون از نمونه‌ای که معمولاً بفرم سوزن است عمل می‌کند. راستای حرکت و تکانه این الکترونها حاوی اطلاعاتی از نمونه می‌باشد. اگر نمونه فلز باشد اعمال میدان الکتریکی بر نمونه منجر به کوچکتر شدن سد پتانسیل می‌شود. (شکل ۱)



شکل (۱)

تغییرات ساختار اتمی و الکترونی در سطح تابع کار را تغییر می‌دهد. در نتیجه میزان تونل‌زنی بستگی به خصوصیت سطح دارد و برشهای مختلف یک بلور تابع کار متفاوتی می‌تواند داشته باشد. برای تعیین یک معیار کمی برای تونل زدن، با استفاده از اصل عدم قطعیت می‌توان نوشت:

$$x \cong \Delta x \approx \frac{\phi}{Fe} \quad P \cong \Delta P \cong \sqrt{2m\phi} \quad (1)$$

که ϕ تابع کار، F شدت میدان و m جرم الکترون است پس

(۲)

$$F \cong \frac{\phi \sqrt{2m\phi}}{e\hbar}$$

پس اگر $\phi(W) = 4.5eV$ باشد میدان مورد نیاز $5 \times 10^7 V/m$ است یعنی اعمال ولتاژ چند ده کیلو ولت بر روی سوزن کافی است. با استفاده از روش WKB برای یک سد پتانسیل مثلثی شکل به ارتفاع w و پهنای $\frac{w}{Fe}$ ضریب عبور برابر است با:

$$D = \frac{4\sqrt{wE_x}}{\phi + E_f} \exp\left[-\frac{4}{3}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{1/2} w^{3/2} / Fe\right] \quad (3)$$

که در آن انرژی الکترون در جهت x است.

با در نظر گرفتن اینکه حاصلضرب D در میزان خروج الکترونها با سرعتهای v_n مربوط به انرژی های مختلف E_x ، همان جریان است یعنی $v_x N(v_x) dv_x$ لذا پس از انتگرال گیری چگالی جریان تونل زنی بدست می آید:

$$J = 6.2 \times 10^6 \frac{\sqrt{\frac{E_f}{\phi + E_f}}}{\phi + E_f} F^2 \exp\left[\frac{B\phi^{3.2}}{F}\right] \quad (4)$$

این معادله به معادله فولرنوردهایم (Fowler-Nordheim) مشهور است و B مقدار ثابتی است. اگر $F = 5 \times 10^7 V/m$ و $\phi = 4.5eV$ چگالی جریان تقریباً $1000 A/cm^2$ است. تابع جریان برحسب

انرژی الکترون وابستگی نمائی به تفاوت انرژی الکترون تا سطح فرمی دارد: $J(E) \propto e^{\frac{E-E_f}{\beta}}$ که $E - E_f < 0$

بنابراین برای انرژی های کمتر از انرژی فرمی دانسیته جریان شدت کم می شود در حقیقت برای میدان $3 \times 10^7 V/cm$ پهنای انرژی $0.2 eV$ است. یعنی دانسیته حالات زیر سطح فرمی را می بایستی با دیگر روشها از جمله UPS¹ و XPS² مشاهده کرد.

ساختمان میکروسکوپ

اعمال میدان $10^7 V/cm$ با انتخاب نمونه بصورت سوزنی با انتهای کروی امکان پذیر است. الکترونهاى خروجی در جهت خطوط میدان حرکت کرده و پس از برخورد با صفحه فلورسنت قابل مشاهده است. برای جلوگیری از برخورد الکترونها با ذرات هوا می بایستی نمونه در خلاء باشد. بزرگنمایی

¹ - Ultraviolet Photoemission Spectroscopy

² - X-ray Photoelectron Spectroscopy

میکروسکوپ برابر $M = \frac{x}{Kr_1}$ است که K ثابت و برابر عدد $1/5$ است و فاکتور ساختمانی نام دارد. x

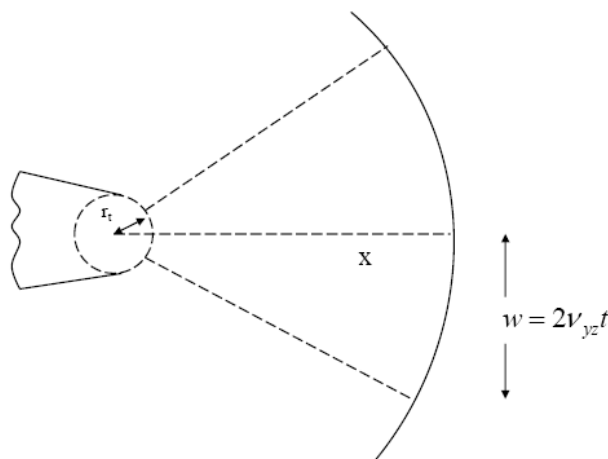
فاصله سوزن با صفحه فلورسنت و شعاع سوزن است. (شکل ۲)

هرچه r_1 کمتر باشد M بزرگتر است بنابراین با لایه برداری شیمیائی از قطعه سیمی می توان نوک سوزنی با شعاع $500 - 2000 \text{ \AA}$ داشت و با اعمال چند کیلو ولت می توان به بزرگنمایی 10^6 دسترسی یافت. البته در قدرت تفکیک میکروسکوپ مؤلفه عمود بر میدان سرعت اولیه الکترونها اهمیت ویژه ای دارد. اگر V_{yz} مؤلفه عمود بر میدان سرعت و t زمان پرواز از تابنده تا صفحه فلورسنت باشد جابجایی بر روی صفحه $2V_{yz}t$ است. (شکل ۳)

$$t = x \sqrt{\frac{m}{2Ve}}$$

$$\frac{w}{M} = 2r_1 K \left(\frac{E_{yz}}{Ve} \right)^{1/2} \quad \text{اگر } (5) \quad w = 2v_{yz}t$$

بنابراین با انتخاب شعاع کمتر و پتانسیل بیشتر می توان قدرت تفکیک را افزایش داد و تا 10 \AA رسانید.



شکل (۲)

محدودیت‌های FEM

میکروسکوپ FEM برای مشاهده فلزات از جمله W و یا Mo که با حرارت دادن تمیز می شوند بسیار مناسب است اما برای نیمرساناها و عایقها تولید جریانهای $10^{-5} - 10^{-8} \text{ A}$ امکان پذیر نیست. علاوه بر محدودیت‌های فوق بعلت کشش مکانیکی خیلی قوی بین سوزن و بدنه فلورسنت امکان شکسته شدن سوزن وجود دارد (مثلاً برای میدان $4.5 \times 10^7 \text{ V/cm}$ مقدار کشش 10^9 dyns/cm^2 است). بدلیل ضرورت تمیز نگه داشتن نمونه خلاء UHV مورد نیاز است که این نیاز تعداد نمونه‌های قابل مطالعه را کاهش می دهد.

کاربردهای FEM

۱ - اندازه‌گیری تابع کار: با اندازه‌گیری جریان برحسب ولتاژ و با استفاده از معادله فولر نوردهایم (۴) می‌توان تابع کار را بدست آورد.

۲ - سینتیک جذب و واجذب adsorption-desorption: جذب و واجذب اتمها و مولکولها بر روی سطح منجر به تغییر تابع کار و در نتیجه شدت صدور الکترون یعنی شدت تابش صفحه فلورسنت می‌شود.

۳ - پخش سطحی

مهمترین کاربرد FEM در اندازه‌گیری ضریب پخش سطحی اتمهای جذب شده بر روی سطح می‌باشد. ضریب پخش، D^* از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$D^* = \langle (\Delta x)^2 \rangle / 4t = \frac{1}{4t} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2 \quad (۶)$$

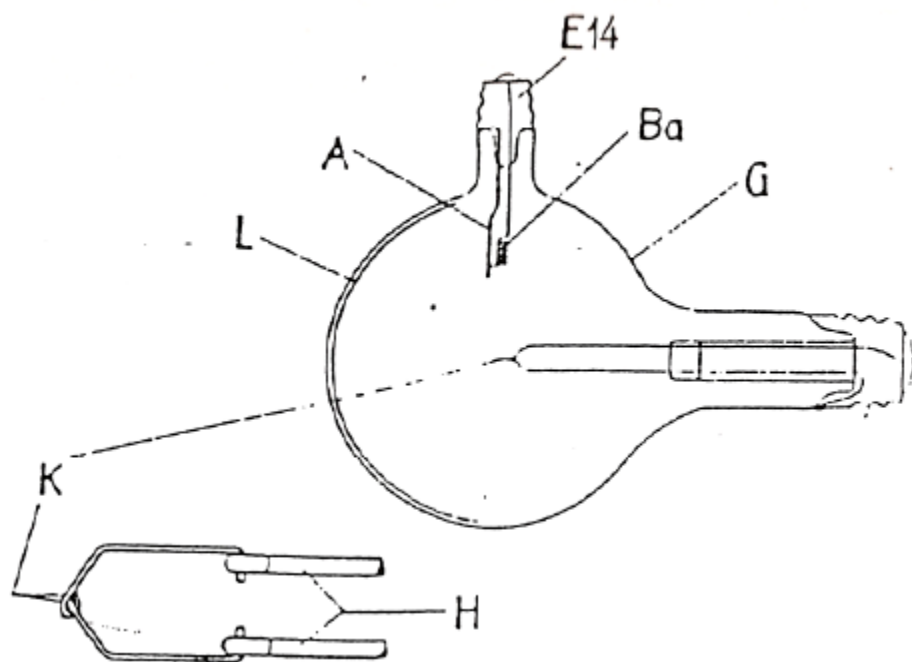
که $\langle (\Delta x)^2 \rangle$ متوسط مربع جابجائی در مدت زمان t و N تعداد ذرات است

$$D^* = \frac{1}{4} a^2 v \exp(-\tilde{E} / K_B t) = D_0^* \exp(-\tilde{E} / K_B T) \quad (۷)$$

که طول متوسط پراش a و تعداد آن در واحد زمان $v e^{-E^*/K_B T}$ است. با این روش \bar{D} و \bar{E} قابل اندازه‌گیری است.

آشنائی با ساختمان لامپ

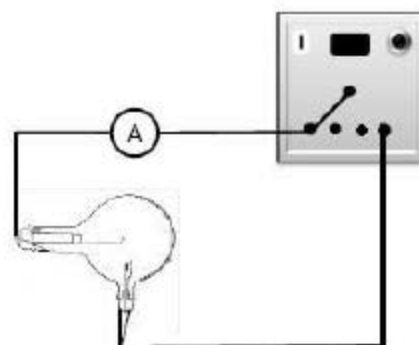
نمای کلی حباب FEM در شکل (۳) نشان داده شده است دقت نمائید که اتصالات محکم و لامپ در جای مناسبی محکم شده باشد. صفحه فلورسنت را از نور شدید محافظت کنید. داخل لامپ خلاء است و شکسته شدن آن ممکنست به شما آسیب برساند بیشترین جریان لامپ 1.9A است که می‌بایستی بتدریج به آن اعمال شود و مدت تمیز کردن فیلامان از ناخالصی‌ها و باریم حدود ۶۰ ثانیه است. بزرگنمایی آن تقریباً ۵۰۰۰۰۰ و قدرت تشخیص $20 - 30 \text{ \AA}$ است. در شکل ۱، صفحه فلورسنت، K نوک سوزن و A گرم کن باریم و G بدنه شیشه‌ای، H سیم تنگستن و E_{14} سیم پیچ حرارت دادن باریم است.



شکل (۳). نمای کلی لامپ

آزمایش

مدار را مطابق شکل (۴) به دقت بسته و پس از نشان دادن به دستیار جریان $1.5A$ را از کاند بگذرانید حدود یک دقیقه صبر کنید تا سطح نمونه تمیز شود سپس منبع ولتاژ زیاد را روشن کرده و به آرامی و پیوسته ولتاژ را اضافه کرده تا تصویر واضحی روی صفحه فلورسنت مشاهده شود و ولتاژ و طرح مشاهده شده را ثبت نمایید. دقت نمائید که ولتاژ ناگهان قطع و وصل نشود و رعایت مسائل ایمنی در تماس دست با دستگاهها و اتصالات را بنمائید. بدنه دستگاهها میبایستی متصل به زمین باشد.



شکل (۴). طرحی از مدار آزمایش

نکته: در هنگام بستن مدار توجه شود که آمپرسنج در سر اتصال به زمین منبع تغذیه باشد این کار برای جلوگیری از اعمال ولتاژ بالا به آن می‌باشد.

تبخیر اتم‌های باریوم

منبع ولتاژ زیاد را خاموش کرده و منبع تغذیه فیلمان گرم کننده باریوم را به رئوستا وصل کرده و جریان را به آرامی از صفر به 7.5 A می‌رسانیم و حدود ۳۰ تا ۶۰ ثانیه فیلمان را حرارت بدهید بدین صورت اتم‌های باریوم تبخیر و برخی از آنها بر روی نوک سوزن هم می‌نشینند. سپس جریان را کم کرده و به صفر می‌رسانیم و منبع تغذیه را از مدار خارج کرده و منبع تغذیه ولتاژ زیاد را روشن می‌کنیم و به آرامی و به طور پیوسته با استفاده از پتانسیومتر ولتاژ را افزایش می‌دهیم. طرح جدید را ثبت کنید و سپس منبع ولتاژ زیاد را به آرامی صفر کنید. در این آزمایش قسمت جذب و واجذب (تبخیر اتم‌های باریوم و بلند کردن باریوم از سطح فلز) برای هر فرد به تنهایی انجام نمی‌شود.

بلند کردن باریوم از سطح فلز

با گرم کردن کاتد به مدت کم تعدادی از اتم‌های باریوم را از روی نوک سوزن خارج کنید و تغییر طرح را ثبت نمایید. با افزایش دما چه اتفاقی برای طرح می‌افتد پاسخ دهید؟ (دقت کنید افزودن بیشتر دما ممکنست کاتد را ذوب کند).

اندازه‌گیری تابع کار تنگستن

بین سوزن (کاتد) و صفحه فلورسنت (آند) ولتاژ اعمال کنید. جریان الکترونی ناشی از اعمال میدان الکتریکی از نوک سوزن به صفحه فلورسنت را در دمای اتاق برحسب ولتاژ اعمالی اندازه‌گیری کنید. با در نظر گرفتن ساده شده رابطه فولر نوردهایم برای تنگستن

$$J = AF^2 \exp\left[-\frac{B\phi^{3.2}}{F}\right] \quad (8)$$

J: چگالی جریان برحسب $(J = \frac{I}{A}) A/cm^2$ I جریان و A سطح نوک سوزن که در آن $A = \pi r^2$

شعاع نوک سوزن)

$F = \frac{V}{r}$: میدان اعمالی به سطح برحسب $v(F = \frac{V}{r}) Volt/cm$ ولتاژهای اندازه‌گیری شده در طول

آزمایش r شعاع نوک سوزن

ϕ : تابع کار برحسب eV

$$A = 3.5 \times 10^{-5} \text{ A/Volt}^2 \cdot \text{cm}^2$$

$$B = 6.12 \times 10^8$$

نمودار جریان ناشی از اعمال میدان الکتریکی را برحسب میدان الکتریکی در نوک سوزن رسم کنید و تابع کار تنگستن را بدست آورید. (شعاع نوک سوزن را $0.1 \mu\text{m}$ در نظر بگیرید).

نکته: در اینجا میدان ایجاد شده در یک خازن با صفحات کروی هم مرکز را در نظر می گیریم ه یک صفحه کروی نوک سوزن و صفحه کروی دیگر لامپ فلورسنت می باشد که به علت کوچک بودن شعاع نوک سوزن در مقابل شعاع لامپ و زیاد بودن فاصله این دو می توان شعاع لامپ فلورسنت را بینهایت

فرض کرد و از فرمول $F = \frac{V}{r}$ استفاده کرد.

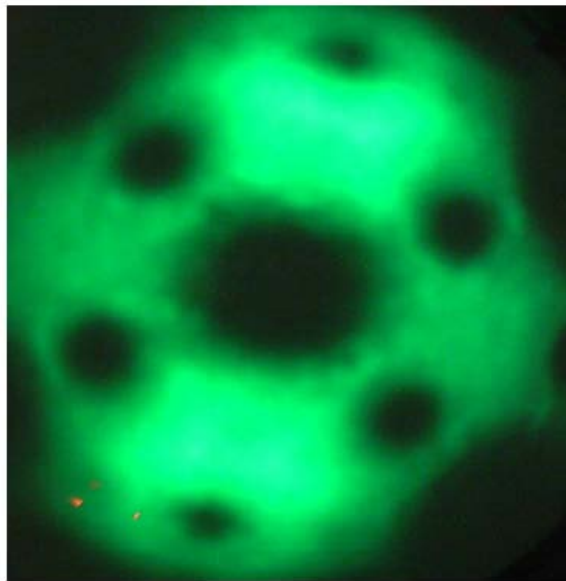
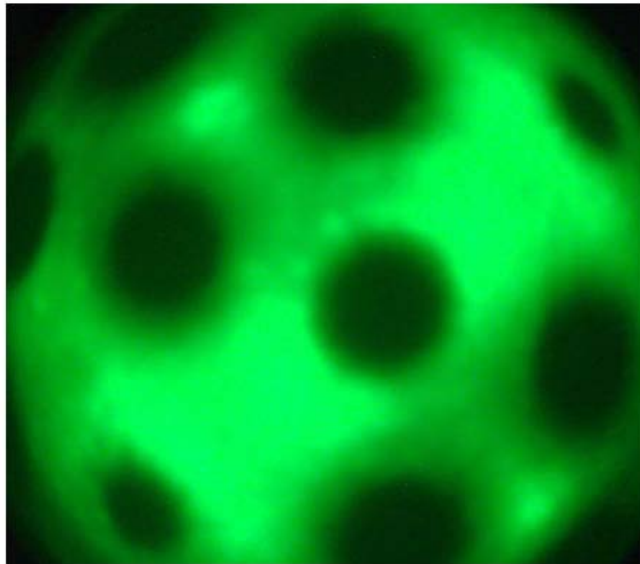
بررسی و نتایج

فلز تنگستن دارای ساختار مکعبی و مکعبی مرکز حجمی است ؟ شکل ۶ ساختار کریستالی و طرح قابل مشاهده قبل و بعد از تبخیر باریم را نشان می دهد. به جهات کریستالی توجه کنید . در صفحاتی که تابع کار بیشتر است تصویر تاریک تر می شود. زوایای صفحات کریستالی را اندازه گیری و با شکل (۵) مطابقت دهید.

اتمهای باریم که تبخیر شده اند و روی سطح نشسته اند بطور واضح دیده می شوند. مشاهده می شود که نقاط روشن جابجا و گاهی محو می شوند. این امر با افزایش دما بیشتر قابل مشاهده است آیا می توانید D ضریب پخش را با مشاهده حرکت یک لکه نورانی بدست آورید؟

به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۱. آیا با مشاهده طرح کریستالی می توانید ساختار کریستالی تنگستن را تشخیص دهید.
۲. صفحات کریستالی را مشخص کنید و سپس زوایای صفحات کریستالی را اندازه گیری و با شکل (۵) مطابقت دهید. (راهنمایی: نقطه وسط شکل را مربوط به جهت [۱۱۰]، یعنی جهت عمود بر صفحه (۱۱۰)، در نظر بگیرید و باقی نقاط را به جهات دیگر نظیر [۱۱۱]، [۱۰۰] و ... نسبت دهید.)



شکل (۵). ساختار کریستالی تنگستن نمونه‌ای از طرح مشاهده شده قبل و بعد از تبخیر باریم

۳. با استفاده از اطلاعات موجود مرتبه بزرگنمایی میکروسکوپ را تخمین بزنید؟
۴. نوع شبکه بلوری را از شکل مشاهده شده حدس بزنید؟
۵. روشی پیشنهاد کنید که به کمک آن بتوان ضریب پخش را بدست آورد در این آزمایش شما به چه کمیت‌های مجهولی برای ضریب پخش نیاز داشتید؟ آیا می‌توانید این کمیتها و به کمک آن ضریب پخش را تخمین بزنید.
۶. اگر بدانیم ساختار بلوری bcc است آیا می‌توانید ابعاد شبکه را بدست آورید؟

آشنایی با پدیده فلورسانس و فسفرسانس

هدف:

مشاهده رخشانی مواد بر اثر تابش UV و باریکه الکترونی و اثر تابش مادون قرمز بر خاصیت آنها.

وسایل آزمایش:

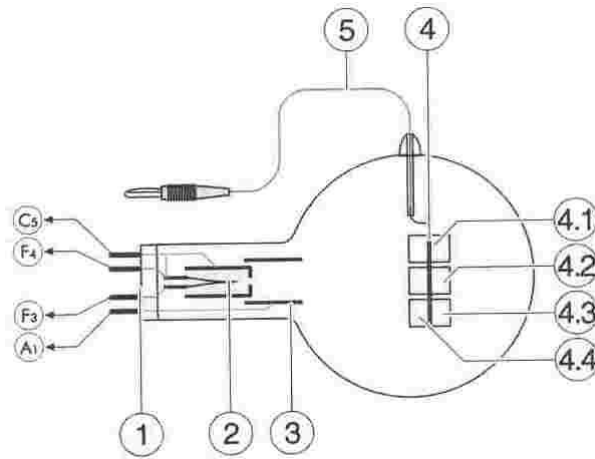
لامپ لومینوسانس و پایه، لامپ جیوه و پایه آن، فیلتر ماوراء بنفش، فیلتر مادون قرمز، لامپ ۶ ولتی ۳۰ واتی و منبع آن، منبع تغذیه HV و سیمهای HV، طیفسنجی جیبی و مولتی متر

توجه به نکات ایمنی:

- نگهدارنده لامپ جیوه در زمان روشن بودن لامپ بسیار گرم می شود.
- برای اتصالات الکتریکی حتماً از سیمهای مخصوص HV استفاده شود و اتصالات مطابق شکل بوده قبل از روشن کردن آنرا به مسئول آزمایشگاه نشان دهید.
- هرگز بطور مستقیم به لامپ جیوه نگاه نکنید.

مشخصات لامپ لومینوسانس:

- ۱- سوکت پین دار اتصالات الکتریکی
- ۲- کاتد گرمائی ۶/۳ ولت جریان $1/6 A^0$
- ۳- آند با ولتاژ ماکزیمم ۵ KV
($I=0.16MA, U_A=4kV, V_p=6/3V$)
- ۴- صفحه رخشانی
- ۵- سیم برای اتصال صفحات رخشانی

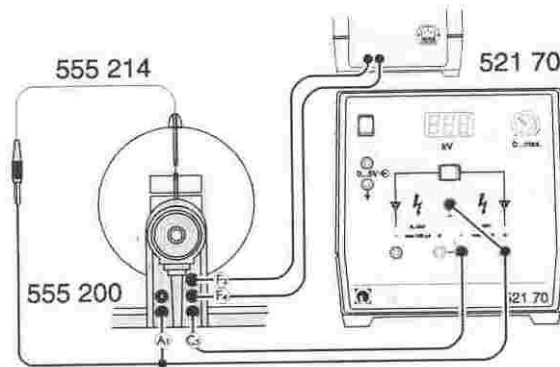


- ① Pin socket for electrical connection of tube in universal stand P (555 200)
- ② Directly heated cathode
heating voltage U_F : 6 V - 8 V
6.3 V recommended
heating current I_F : 1.65 A at 6.3 V
- ③ Cylindrical anode
Anode voltage U_A : 5 kV max.
Anode current I_A : approx. 0.16 mA for $U_F = 6.3$ V, $U_A = 4$ kV
- ④ Luminescent screen
 - (4.1) Yttrium vanadate, activated with europium, fluorescent red, approx. 625 nm, medium short decay time
 - (4.2) Zinc sulfide, activated with silver, fluorescent blue, approx. 450 nm, medium decay time
 - (4.3) Zinc sulfide, activated with silver and cobalt, fluorescent green,
510 nm fluorescent,
515 nm phosphorescent, long decay time
 - (4.4) as (4.3) but graphite-coated back to prevent heat radiation
- ⑤ Lead with permanently mounted 4-mm plug for electrical contacting of luminescent screen

شکل (۱)

آزمایش ۱: مشاهده اثر رخشانی ناشی از تابش باریکه الکترونی

در حالیکه همه دستگاهها خاموش هستند مدار زیر بسته شود : پیچ تنظیم دستگاهها حتماً روی مقدار صفر باشد. قطب مثبت HV به زمین متصل شود.

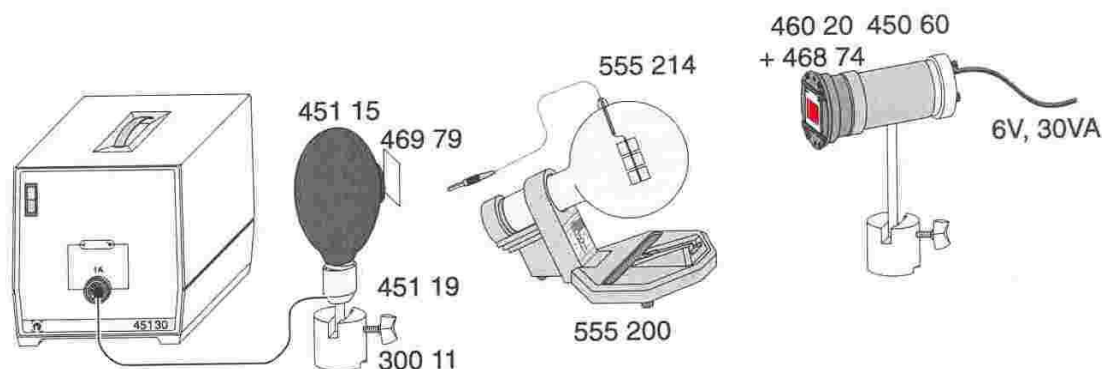


شکل (۲)

دو سیم مربوط به فیلامان به خروجی ۶/۳V پشت منبع HV وصل شود. سیمی که به نمونه‌های لومینوسانس متصل است به قطب مثبت HV وصل شود. حتماً پیش از روشن کردن دستگاهها، مدار را به کمک مسؤل آزمایشگاه چک کنید. منبع HV را روشن کنید. و به آرامی ولتاژ را افزایش دهید. بوسیله میکروآمپر متر جریان الکترونی را اندازه‌گیری کنید. توجه جریان الکترونی نباید از $300 \mu A$ تجاوز کند. توجه: در هر صورت نباید جریان فیلامان از $1/5 A$ یا ولتاژ دو سر آن از $7V$ تجاوز کند. به آرامی ولتاژ فیلامان را از صفر افزایش دهید و همزمان متوجه درخشندگی نمونه‌های لومینوسانس و جریان الکترونی کاتد- آند باشد. ویژگی نور فلورسانس نمونه‌ها را ثبت کنید و با طیف سنج جیبی یا توری طیف نور تابشی را بررسی کنید. با قطع جریان فیلامان تفنگ در محیط کاملاً تاریک، اثر فسفرسانس نمونه‌ها را بررسی کنید.

آزمایش ۲: مشاهده اثر رخشانی ناشی از تابش UV

وسائل را مطابق شکل زیر ببندید.



شکل (۳)

فیلتر B را در جلو لامپ مرئی و فیلتر UV را در جلوی لامپ جیوه قرار دهید . پس از تاریک کردن محیط، نمونه ها را تحت تابش UV قرار داده، آن گاه رنگ نمونه ها را با دقت مشاهده و ثبت کنید . سپس لامپ جیوه (UV) را خاموش کرده و تغییرات رخشانی نمونه ها را مشاهده و یادداشت کنید. دوباره لامپ جیوه را روشن کرده و بلافاصله پس از خاموش کردن لامپ جیوه، لامپ ۶ ولتی را که فیلتر مادون قرمز در جلوی آن قرار داده شده روشن و نمونه ها را از پشت مورد تابش قرار دهید . اثر حرارت بر رخشانی نمونه ها را مشاهده و ثبت کنید.

بررسی نتایج و سئوالات

۱. اصول فیزیک مشاهدات را تشریح کنید.
۲. چه موادی خاصیت فلورسنت و فسفرسانس دارند.
۳. چگونه می توان طیف رخشانی را اندازه گیری کرد.
۴. کاربردهای پدیده فلورسنت و فسفرسانس را ذکر کنید.