آزمایش اثر هال

آزمایش شماره سه – آزمایشگاه فیزیک حالت جامد

پارسا رنگریز – ۹۷۱۱۰۳۱۴

۱۶ فروردین ۱۴۰۱

چکیده

در این آزمایش اثر هال و استفاده از آن در اندازه‌گیری میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین ضریب هال کریستال نیمه‌رسانای InSb و ضریب هدایت الکتریکی و قابلیت تحرک بارهای الکتریکی کریستال تعیین شده است. به مقداری نیز به خاصیت حاصل‌ضربی اثر هال پرداخته شده است.

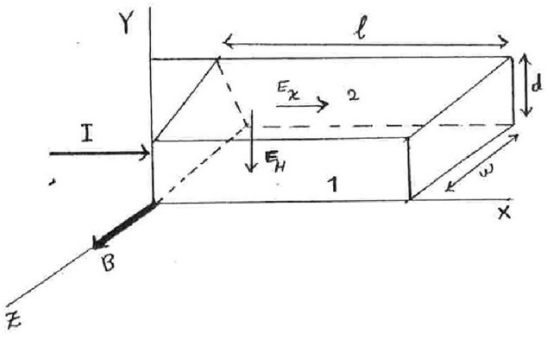
مقدمه

زمانی که یک فلز یا نیمه‌هادی که جریان I از آن می‌گذرد را در یک میدان مغناطیسی B قرار دهیم، میدان الکتریکی E_H در جهت عمود بر جریان و میدان مغناطیسی در نمونه بوجود می‌آید. از این پدیده تحت عنوان اثر هال نام برده می‌شود. از این اثر برای مشخص کردن نوع آلاییدگی $(n-p)$ یک نیمه‌هادی و نیز برای بدست آوردن ضریب هدایت الکتریکی σ و قابلیت تحرک الکتریکی بارهای یک نیمه‌هادی یا هادی μ و همچنین در اندازه‌گیری میدان مغناطیسی B استفاده می‌شود.

مطابق شکل ۱ یک پیکربندی آزمایش اثر هال قابل مشاهده است. جریان I در جهت مثبت محور طول و میدان مغناطیسی B در جهت مثبت محور ارتفاع باشد، در این صورت نیروی وارد بر حامل‌های جریان در جهت مثبت محور عرض خواهد بود. بنابراین چنان‌چه نمونه مورد بررسی ما یک نیمه‌هادی و صفحه $x=0$ قطب منفی و صفحه $x=l$ قطب مثبت باشد، اگر صفحه ۱ نسبت به صفحه۲ دارای پلاریته مثبت شود، نیمه‌هادی از نوع p و در غیراینصورت از نیمه‌هادی از نوع n خواهد بود. در این شرایط نیروی وارده بر حامل‌های جریان به صورت زیر است:

$$eE_H = ev \times B = ev_X B_Z$$

که e مقدار بار حامل و v_X سرعت آن است.



شکل ۱: نمونه نیمه‌هادی برای بررسی اثر هال

می‌توان با توجه به رابطه بالا و یک سری روابط دیگر ضریب هال یک نمونه هادی یا نیمه‌هادی R_H را به صورت زیر نوشت:

$$R_H = \frac{V_H W}{BI}$$

که V_H ولتاژ هال، W عرض نمونه در جهت میدان مغناطیسی است. کمیت قابلیت تحرک بارهای الکتریکی μ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = v_X / E_X$$

در حالت ساده‌ای که هدایت توسط بارهای هم‌نام صورت گرفته باشد، داریم:

$$\mu = \sigma R_H = \frac{V_H l}{V_X B d}$$

که V_X ولتاژ بایاس و نیز I و d ابعاد نمونه هستند. همچنین σ ضریب هدایت الکتریکی نمونه است.

رابطه $V_H = IB\frac{R_H}{W}$ نشان می‌دهد که اگر جهت یکی از کمیت‌های جریان یا میدان عوض شود، جهت ولتاژ هال تغییر خواهد کرد و از طرفی اگر یکی از کمیت‌های فوق صفر گردد، ولتاژ هال نیز صفر می‌شود. این خاصیت به خاصیت حاصل‌ضربی اثر هال معروف است.

وسایل آزمایش

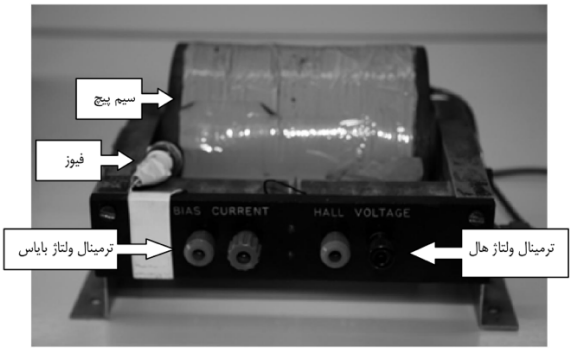
نیمه‌هادی مورد استفاده $InSb$ است. مشخصات این نیمه‌هادی به صورت زیر است:

حداکثر میدان مغناطیسی مجاز ۱ تسلا، حداکثر جریان مجاز ۲۰۰ میلی‌آمپر، مقاومت ورودی ۱.۳ اهم و ابعادی به طول ۱۳ میلی‌متر، عرض ۰.۵ میلی‌متر و عمق ۶ میلی‌متر.

میکروولت‌متر که در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

شکل ۲: میکروولت‌متر و کلیدهای اساسی آن

مگنت که در شکل ۳ نشان داده شده است و حداکثر جریان آن ۲.۵ آمپر است.



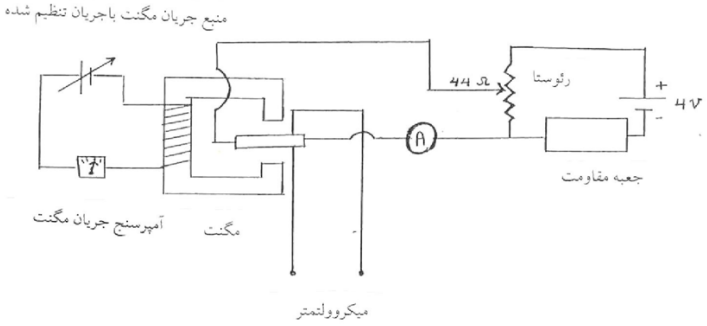
شکل ۳: مگنت و اجزای آن

وسایل دیگر عبارتند از منبع جریان مگنت (حداکثر ۲ آمپر)، دو عدد آمپرسنج، رئوستای ۴۴ اهمی، جعبه مقاومت و منبع جریان (حداکثر ۲۰۰ میلی‌آمپری)

شکل ۴: منبع تغذیه

شرح آزمایش

ابتدا مدار آزمایش را مطابق شکل ۵ می‌بندیم.



شکل ۵: مدار آزمایش اثر هال

آزمایش اول

در حالتی که جریان مگنت I_m صفر است. به ازای جریان‌های I از صفر تا ۲۰۰ میلی‌آمپر، ولتاژ هال V_H را توسط میکروولت‌متر اندازه‌گیری می‌کنیم و در جدول ۱ ثبت می‌کنیم.

V_X ولتاژ بایاس، ولتاژ دو سر نمونه، است که که به‌وسیله ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود. در حین آزمایش ممکن است اثر پسماند مگنت بر جواب غیرقابل چشم‌پوشی باشد. در صورت نیاز به صفر کردن، با تکرار سریع فیش‌های ورودی مگنت در جریان‌های کم، پسماند را صفر می‌کنیم و این کار را قبل هر آزمایش انجام می‌دهیم.

آزمایش دوم

ضمن صفر کردن اثر پسماند، این آزمایش را در شرایطی شروع می‌کنیم که مگنت در وضعیت عمود بر میدان زمین باشد. I_m جریان مگنت را به‌وسیله منبع جریان بر روی ۱ آمپر تنظیم می‌نماییم. سپس با تغییر جریان I از صفر تا ۲۰۰ میلی‌آمپر، V_H و V_X را به ازای هر تغییر اندازه می‌گیریم و در جدول ۲ ثبت می‌کنیم. ضمنا می‌دانیم

$$B(I_m = 1A) = 0.19\,T$$

آزمایش سوم

جریان مگنت را $I_m = 2A$ قرار می‌دهیم و آزمایش دو را تکرار می‌کنیم و در جدول ۳ ثبت می‌نماییم. ضمنا می‌دانیم

$$B(I_m = 2A) = 0.27\,T$$

آزمایش چهارم

با مقادیر ثابت $I = 200\ mA$ و $I_m = 2A$، جهت I و B را تغییر داده و علامت ولتاژ هال را در جدول ۴ وارد می‌کنیم.

آزمایش پنجم

جریان $I = 200\ mA$ را تنظیم می‌کنیم. سپس با تغییر جریان I_m از صفر تا ۲ آمپر، ولتاژ هال را اندازه‌گرفته و جدول ۵ را پر می‌کنیم. در نهایت هم در زمان خاموش بودن دستگاه‌ها و منبع تغذیه، مقاومت نمونه را با اهم‌متر اندازه‌گیری می‌کنیم.

جدول داده‌ها

جدول ۱: تغییرات V_H و V_X به ازای جریان مگنت صفر و مقادیر مختلف جریان I

$I(mA)$	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
$V_H(mV)$	۰.۰	۰.۴	۰.۹	۱.۴	۱.۹	۲.۴
$V_X(mV)$	۰.۰	۱۲۷.۶	۲۵۸.۶	۳۸۷.۱	۵۱۳.۰	۶۴۲.۰
$I(mA)$	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	
$V_H(mV)$	۲.۸	۳.۴	۳.۸	۴.۳	۴.۸	
$V_X(mV)$	۷۶۷.۰	۸۹۸.۰	۱۰۲۳.۰	۱۱۴۸.۰	۱۲۷۶.۰	

جدول ۲: تغییرات V_H و V_X به ازای جریان مگنت $1A$ و مقادیر مختلف جریان I

$I(mA)$	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
$V_H(mV)$	۰.۰	۳.۱	۶.۱	۹.۳	۱۲.۴	۱۵.۵
$V_X(mV)$	۰.۰	۱۳۲.۰	۲۵۸.۲	۳۸۹.۸	۵۱۹.۰	۶۴۵.۰
$I(mA)$	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	
$V_H(mV)$	۱۸.۶	۲۱.۷	۲۴.۸	۲۷.۹	۳۰.۹	
$V_X(mV)$	۷۷۳.۰	۹۰۲.۰	۱۰۳۲.۰	۱۱۶۰.۰	۱۲۸۶.۰	

جدول ۳: تغییرات V_H و V_X به ازای جریان مگنت $2A$ و مقادیر مختلف جریان I

$I(mA)$	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
$V_H(mV)$	۰.۰	۵.۱	۱۰.۲	۱۵.۳	۲۰.۲	۲۵.۲
$V_X(mV)$	۰.۰	۱۳۴.۳	۲۶۵.۲	۳۹۶.۹	۵۲۲.۰	۵۶۱.۰
$I(mA)$	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	
$V_H(mV)$	۳۰.۳	۳۵.۱	۴۰.۳	۴۵.۳	۵۰.۲	
$V_X(mV)$	۷۸۲.۰	۹۰۸.۰	۱۰۴۰.۰	۱۱۶۹.۰	۱۲۹۷.۰	

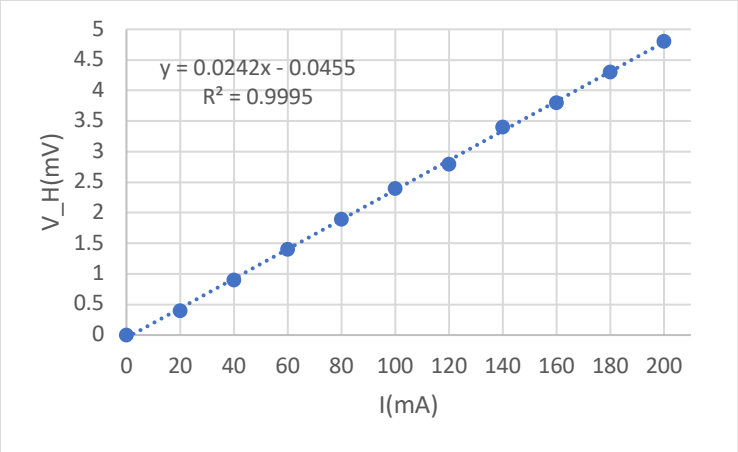
جدول ۴: علامت V_H با تغییر جهت I و B به ازای $I_m = 2A$ و $I = 200\ mA$

V_H	+	−	−	+
I	+	+	−	−
B	+	−	+	−

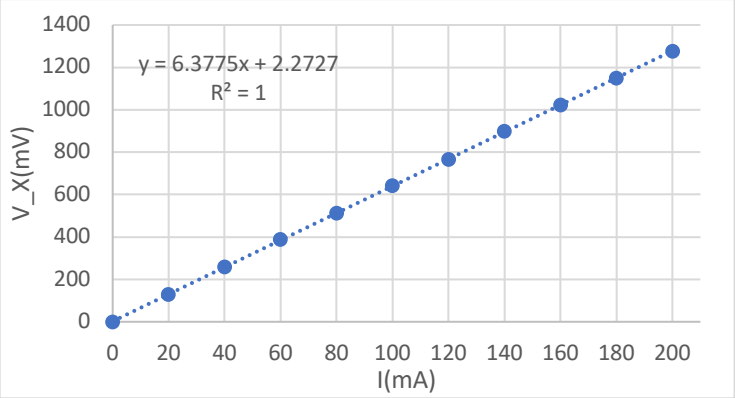
جدول ۵: تغییرات ولتاژ هال بر حسب تغییرات جریان مگنت و $I = 200\ mA$

$I(mA)$	۰.۰	۰.۲	۰.۴	۰.۶	۰.۸	۱.۰	۱.۲	۱.۴	۱.۶	۱.۸	۲.۰
$V_H(mV)$	۴.۸	۹.۹	۱۵.۳	۲۰.۵	۲۶.۲	۳۰.۴	۳۵.۰	۴۰.۸	۴۳.۴	۴۶.۵	۵۰.۱

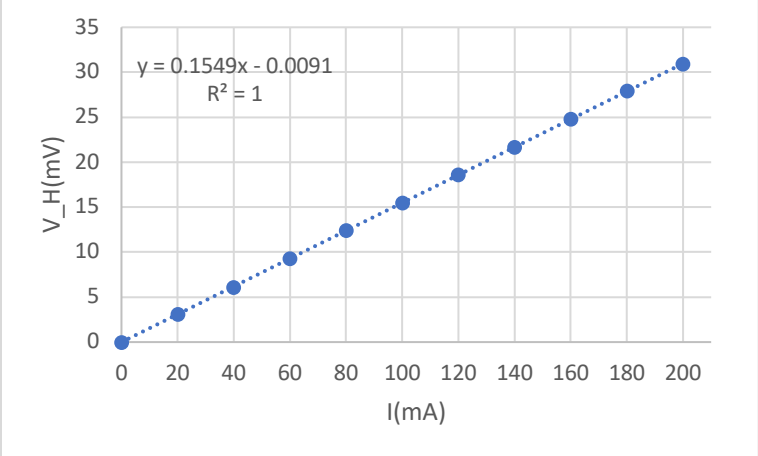
نمودار داده‌ها



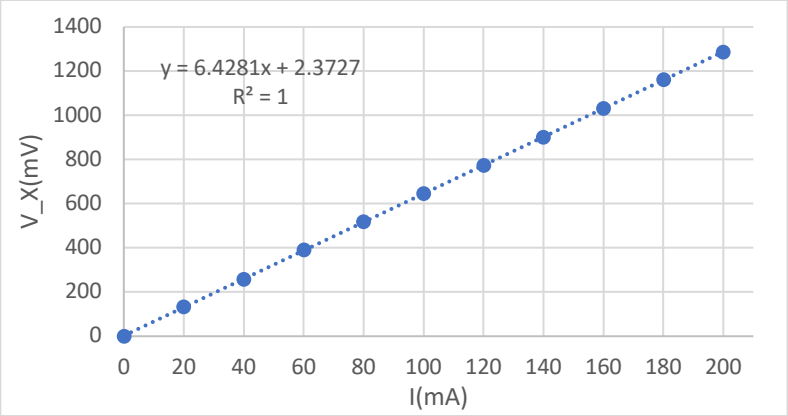
نمودار ۱: تغییرات V_H به ازای جریان مگنت صفر و مقادیر مختلف جریان I



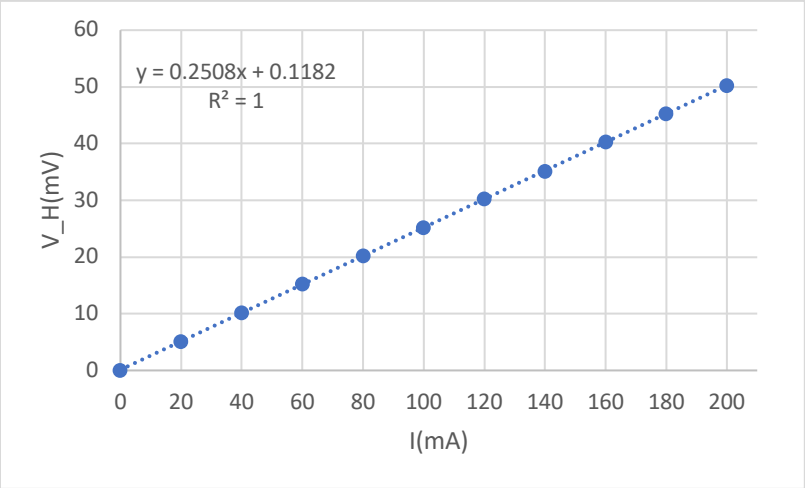
نمودار ۲: تغییرات V_X به ازای جریان مگنت صفر و مقادیر مختلف جریان I



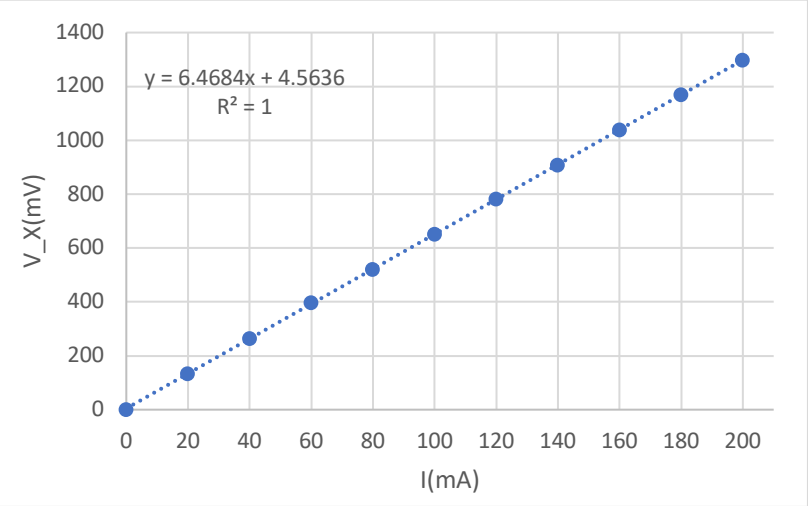
نمودار ۳: تغییرات V_H به ازای جریان مگنت $1A$ و مقادیر مختلف جریان I



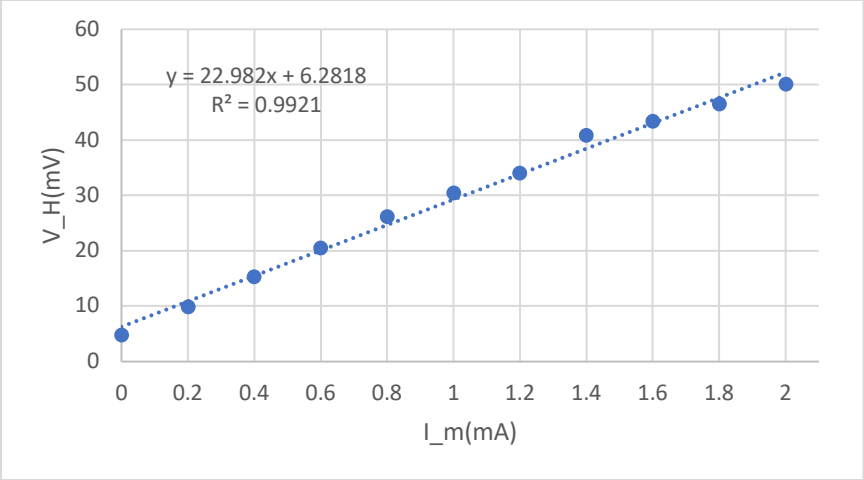
نمودار ۴: تغییرات V_X به ازای جریان مگنت $1A$ و مقادیر مختلف جریان I



نمودار ۵: تغییرات V_H به ازای جریان مگنت $2A$ و مقادیر مختلف جریان I



نمودار ۶: تغییرات V_X به ازای جریان مگنت $2A$ و مقادیر مختلف جریان I



نمودار ۷: تغییرات ولتاژ هال بر حسب تغییرات جریان مگنت و $I = 200\ mA$

خطای آزمایش

خطاهای این آزمایش بدین شرح‌اند: اثر پسماند مگنت، کالیبریزه نبودن دستگاه‌ها، خطای میدان مغناطیسی زمین، خطای سیستماتیک دستگاه‌ها و نیز آزمایشگر.

خطای شیب نمودار خطی برازش شده نیز اینگونه بدست می‌آید:

$$\Delta b = b\sqrt{\frac{1}{N-2}\left(\frac{1}{r^2}-1\right)}$$

که N تعداد داده‌ها و r رگرسیون است. برای سه کمیت نهایی، خطا اینگونه بدست می‌آید:

$$\Delta R_H = \frac{w}{B}\Delta b$$

$$\Delta\mu = \mu\sqrt{\left(\frac{\Delta b_H}{b_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b_x}{b_x}\right)^2}$$

$$\Delta\sigma = \sigma\sqrt{\left(\frac{\Delta R_H}{R_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)^2}$$

نتیجه‌گیری

1 . علت مشاهده ولتاژهال زمانی که $I_m = 0$ به علت نیم‌رسانای مورد استفاده دارای خاصیت مغناطیسی است و بعد از قطع شدن شدت جریان، مقداری پسماند در این ماده باقی می‌ماند.

2 . با استفاده از سه جدول (۱، ۲ و ۳) اگر $I = 200\ mA$ را برگزینیم، خواهیم داشت

$$I = 200\ mA,\quad I_m = 0\ A \quad\rightarrow\quad V_H = 4.8\ mV$$

$$I = 200\ mA,\quad I_m = 1\ A \quad\rightarrow\quad V_H = 30.9\ mV$$

$$I = 200\ mA, \quad I_m = 2\ A \quad \rightarrow \quad V_H = 50.2\ mV$$

با توجه به اعداد بالا، بنظر می‌رسد یک رابطه مستقیمی بین افزایش جریان مگنت و ولتاژ هال وجود دارد.

3 . جدول ۴ بیان دارد که ولتاژ هال هم‌زمان متناسب با حاصل‌ضرب جریان و میدان مغناطیسی است؛ چرا که در حالتی مثبت خواهد بود که این دو هم علامت شوند.

4 . با استفاده از نمودار V_H در جدول ۳، می‌توان ضریب هال را بدست آورد. از قبل در بخش شرح آزمایش مقادیر میدان را بر حسب جریان مگنت داشتیم. آن را نیز لحاظ می‌کنیم.

$$V_H = \frac{R_H B}{w} I \qquad \rightarrow \qquad R_H = \frac{bw}{B}$$

از آزمایش دو و سه به ترتیب داریم:

$$b = 0.1549 \quad \rightarrow \quad R_H = 4.08 \times 10^{-4}\ (SI)$$

$$b = 0.2508 \quad \rightarrow \quad R_H = 4.64 \times 10^{-4}\ (SI)$$

بهترین حالت این است که میانگین این دو مقدار را بعنوان ضریب هال معرفی کنیم:

$$\boxed{R_H = 4.36 \times 10^{-4}\ (SI)}$$

5 . مقاومت نمونه از طریق شیب V_X بدست می‌آید. بنابراین برای سه آزمایش به ترتیب داریم:

$$R = 6.38\ \Omega, \qquad R = 6.43\ \Omega, \qquad R = 6.47\ \Omega$$

بنابراین بهترین حالت این است که میانگین این سه مقدار را بعنوان مقاومت نمونه معرفی کنیم:

$$\boxed{R = 6.43\ \Omega}$$

علت اختلاف این مقاومت‌ها همان اثر پسماند موجود در مساله است.

اکنون می‌خواهیم σ و μ را بیابیم. با توجه به نمودار آزمایش دوم و سوم می‌خواهیم کمیت $\frac{V_H}{V_x} = \frac{b_H}{b_x} = \frac{\mu B d}{l}$ را حساب کنیم که به ترتیب داریم:

$$\mu = 0.27\ (SI), \quad \mu = 0.31\ (SI)$$

ما مقدار زیر را بعنوان مقدار واقعی‌تر معرفی می‌کنیم:

$$\boxed{\mu = 0.29\ (SI)}$$

و نیز ضریب رسانندگی از رابطه $\sigma = \frac{\mu}{R_H}$ بدست می‌آید.

$$\boxed{\sigma = 665.14\ (SI)}$$

6 . ضریب رسانندگی σ با ثابت هابل رابطه عکس دارد و می‌دانیم که رساناها دارای رسانندگی بیش‌تری از نیمه‌رسانا اند پس ضریب هال در آن‌ها کمتر است و اثر هال در رساناها سخت‌تر از نیمه‌رساناها دیده می‌شود.

7 . دستگاه گاوسی‌متر دستگاهی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی است که برای اینکار با قراردادن یک جریان مشخص در یک میدان مغناطیسی و اندازه‌گیری ولتاژهال، میدان را اندازه‌گیری می‌کنید. اینکار بر پایه رابطه زیر استوار خواهد بود.

$$V_H = \frac{IBR_H}{w}$$