دستورالعمل‌های کلی: آزمون تجربی (۲۰ نمره)

۱۲ جولای ۲۰۱۶

آزمون تجربی ۵ ساعت طول می‌کشد و در مجموع ۲۰ نمره دارد.

قبل از آزمون

- قبل از شنیدن صداي زنگ شروع، حق ندارید پوشش سؤالات را باز کنید.
- شروع و پایان آزمون با صدای زنگ اعلام خواهد شد. هر یک ساعت، زمان سپری شده به شما اطلاع داده خواهد شد. همچنین پانزده دقیقه مانده به پایان آزمون، با صدای زنگ به شما اعلام خواهد شد (قبل از آخرین زنگ).

در حین آزمون

- پاسخ‌نامه‌های مخصوصی برای نوشتن پاسخ شما در نظر گرفته شده است. مشاهدات خود را در جداول، جعبه‌ها و یا گراف‌های پاسخ‌نامه که با حرف A علامت‌گذاری شده وارد کنید. برای نوشتن جزئیات جواب هر سؤال صفحات سفید دیگري (صفحات کار) در نظر گرفته شده که حرف W روی آن‌ها نوشته شده است. همیشه دقت کنید که از صفحات مربوط به همان سوال استفاده نمایید (شماره سؤال در بالای برگه را چک کنید). اگر مطالبی در صفحات نوشته‌اید و نمی‌خواهید تصحیح شود روی آنها ضربدر بکشید. فقط از روی هر صفحه برای نوشتن استفاده کنید.
- در نوشتن پاسخ‌های خود تا جایی که امکان دارد مختصر بنویسید: برای رساندن منظور خود تا جایی که امکان دارد از روابط ریاضی، علائم منطقی و نمودارها استفاده نمایید. از نوشتن جملات طولانی خودداری کنید.
- محاسبه‌ی خطا مورد نیاز نمی‌باشد مگر اینکه صریحاً خواسته شده باشد، اما رعایت تعداد ارقام معنی‌دار در نوشتن اعداد الزامی است. همچنین شما باید در مورد تعداد مناسب نقاط و یا تکرار اندازه گیری تصمیم‌گیری کنید مگر اینکه دستورالعمل‌های خاصی داده شده باشد.
- شما اغلب ممکن است قادر به حل بخش‌های بعدی سؤال باشید بدون این که بخش‌های قبلی سؤال را حل کرده باشید.
- شما بدون اجازه، مجاز به ترك محل کار خود نیستید. اگر نیاز به کمک دارید (مانند پر کردن بطری آب، خرابی ماشین حساب یا رفتن به دستشویی و غیره)، با قرار دادن یکی از سه پرچم در مکان تعبیه شده در کابین به مراقبین اطلاع دهید:

  برای پر کردن بطری آب:

  "Refill my water bottle, please"

  برای رفتن به دستشویی:

  "I need to go to the toilet please"

  برای بقیه موارد:

  "I need help, please"

در پایان آزمون

- پس از پایان آزمون سریعاً از نوشتن خودداري کنید.
- برای هر سؤال برگه‌هاي خود را به ترتیب زیر مرتب کنید: صفحه پوششی (C) ، صفحات سؤال (Q) ، صفحات پاسخنامه (A) و صفحات کار (W) .
- همه برگه‌های مربوط به یک سؤال را در یک پاکت قرار دهید. همچنین برگه‌های دستورالعمل کلی (G) را در پاکت جداگانه باقیمانده قرار دهید. از قابل مشاهده بودن کد دانش‌آموزی خود در پنجره مشاهده هر پاکت اطمینان حاصل نمایید. همچنین برگه‌های خالی را داخل پاکت بگذارید. شما مجاز به بردن هیچ برگه‌اي به بیرون از سالن امتحان نیستید.

- وسایل نوشتن خود (دو عدد خودکار، یک عدد روان‌نویس ، یک عدد مداد، یک عدد قیچی، یک عدد خط کش، دو جفت صداگیر گوش) و ماشین حساب داده شده و ماشین حساب شخصی(قابل استفاده) را در کیف زیپ‌دار شفاف قرار دهید.
- تا زمانی که پاکت شما تحویل گرفته نشده، سر میز خود بمانید. پس از آن که پاکت‌ها جمع آوري شد راهنما، شما را تا خارج از سالن امتحان همراهی خواهد کرد. کیف وسایل نوشتاری خود را بردارید و موقع خروج در دست خود نگهدارید. همچنین بطری آب خود را بردارید.

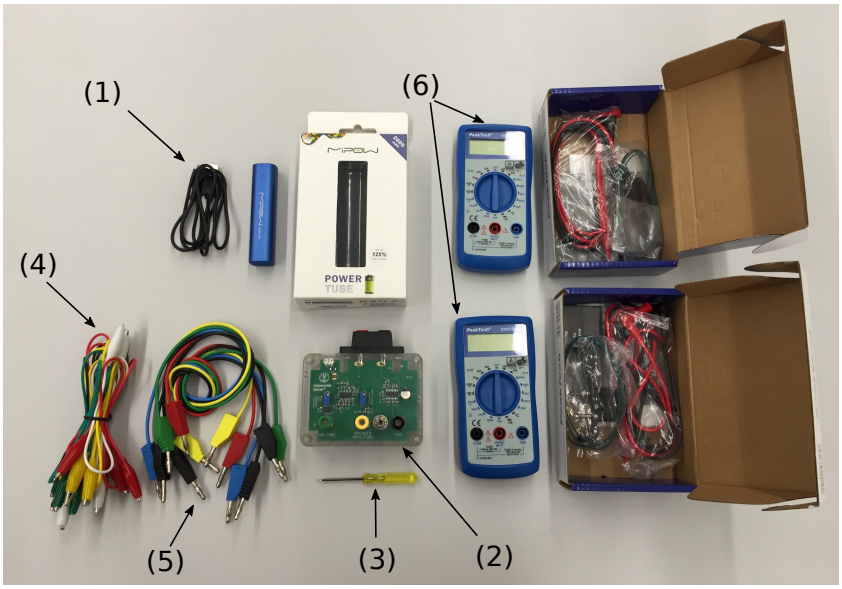
عناوین آزمایش

آزمایش :E-I	رسانندگی الکتریکی در دو بعد	۱۰ نمره
آزمایش :E-II	دانه‌های جهنده - مدلی برای گذار فاز و ناپایداری	۱۰ نمره

بعضی از وسایل آزمایش‌های E-I و E-II مشابه هستند. در بین وسایل، منبع تغذیه و مولد سیگنال در هر دو آزمایش استفاده می‌شوند اما تنظیم آن‌ها در دو آزمایش متفاوت است.

توجه: موقع باز کردن جعبه، بلندگو را از طریق استوانه‌ی پلاستیکی که به غشاء چسبانده شده است بلند نکنید.

وسایلی که در هر دو آزمایش استفاده می‌شوند.



شکل ۱: وسایل عمومی برای هر دو آزمایش

۱- باتری با کابل USB

۲- مولد سیگنال قابل تنظیم که بوسیله باتری تغذیه می‌شود.

۳- پیچ‌گوشتی کوچک

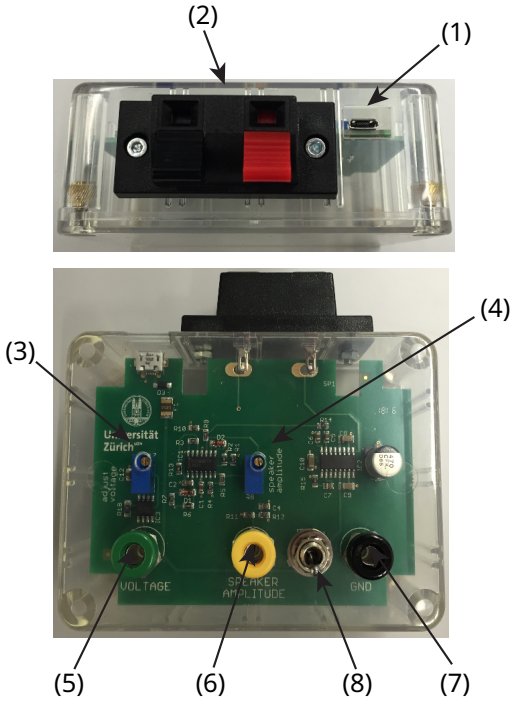
۴- ده عدد کابل با گیره سوسماری

۵- شش عدد کابل با فیش ۴ میلیمتری

۶- دو عدد مولتی‌متر دیجیتال

همچنین ممکن است لوازم‌التحریری که در اختیار شما است برای انجام اهداف آزمایش مفید باشد.

مولد سیگنال



شکل ۲.

۱. کانکتور USB برای تأمین انرژی مولد سیگنال
۲. پایانه‌های بلندگو (مورد استفاده فقط در E-II)
۳. پتانسیومتر برای تنظیم ولتاژ ثابت (مورد استفاده فقط در E-I)
۴. پتانسیومتر برای تنظیم دامنه بلندگو (مورد استفاده فقط در E-II)
۵. سوکت ولتاژ خروجی DC (مورد استفاده فقط در E-I)
۶. سوکت خروجی مانیتور برای نشان دادن دامنه‌ی نوسان بلندگو (مورد استفاده فقط در E-II)
۷. سوکت زمین (اتصال به زمین)
۸. سویچ برای روشن / خاموش کردن بلندگو و مانیتور نشان‌دهنده‌ی دامنه نوسان بلندگو

برای تأمین انرژی مولد سیگنال، باتری را با استفاده از کابل USB به کانکتور USB مولد سیگنال (۱) وصل کنید.

توجه کنید که برای رفتن از یک طرف رنج پتانسیومتر به طرف دیگر رنج، چندین دور چرخش لازم است. پتانسیومترها توقف کننده مکانیکی در آخر محدوده خود ندارند.

مولتی‌مترهای دیجیتال

از مولتی‌مترهای دیجیتال می‌توان برای اندازه گیری جریان و ولتاژ استفاده کرد. همیشه دو سیم را به سوکت‌های با علامت "VmAΩ" و "GND" وصل کنید. مولتی‌متر را با توجه به نیاز روی حالت Current یا روی حالت Voltage و در رنج اندازه‌گیری مناسب قرار دهید.

رسانش الکتریکی در دو بعد (۱۰ نمره)

قبل از شروع این مسئله راهنمایی های کلی را که در پاکت جداگانه به شما داده شده بخوانید.

مقدمه

در فرایند توسعه نسلهای جدید از ابزارهای الکتریکی مبتنی بر فناوری نیمرساناها، مثل تراشه های رایانه ها و سلول های خورشیدی، پژوهشگران به دنبال کشف موادی با خواص انتقالی ویژه هستند، یعنی موادی با مقاومت اندک الکتریکی. اندازه گیری کمی این خواص با استفاده از نمونه هایی از مواد مذکور در ابعاد متناهی، همراه با اتصال هایی با مقاومت اتصال متناهی و هندسه خاص انجام می شود. برای سنجش خواص واقعی مواد تمام اثرهای فوق باید به دقت در نظر گرفته شوند. افزون بر اینها یک لایه نازک از یک ماده می تواند رفتاری متفاوت با توده حجیمی از ماده داشته باشد.

در این مسئله، ما به اندازه گیری خواص الکتریکی مواد می پردازیم. به تعریف دو مفهوم در زیر توجه کنید.

- **-مقاومت الکتریکی** R: این کمیت خاصیت الکتریکی یک قطعه معین از ماده با ابعاد هندسی معین را نشان می دهد.
- **-مقاومت ویژه** ρ: این کمیت خاصیت ماده ای است که قطعه مورد نظر از آن ساخته شده است و مقاومت الکتریکی به آن بستگی دارد. مقاومت ویژه به جنس ماده و برخی پارامترهای خارجی نظیر دما بستگی دارد، اما به شکل هندسی و ابعاد قطعه بستگی ندارد.

در اینجا می خواهیم آنچه را که مقاومت لایه ای می نامیم اندازه گیری کنیم. این کمیت نسبت مقاومت ویژه الکتریکی به ضخامت یک لایه نازک است.

می خواهیم اثر عوامل فیزیکی زیر بر مقدار مقاومت الکتریکی لایه های نازک مواد را بررسی کنیم:

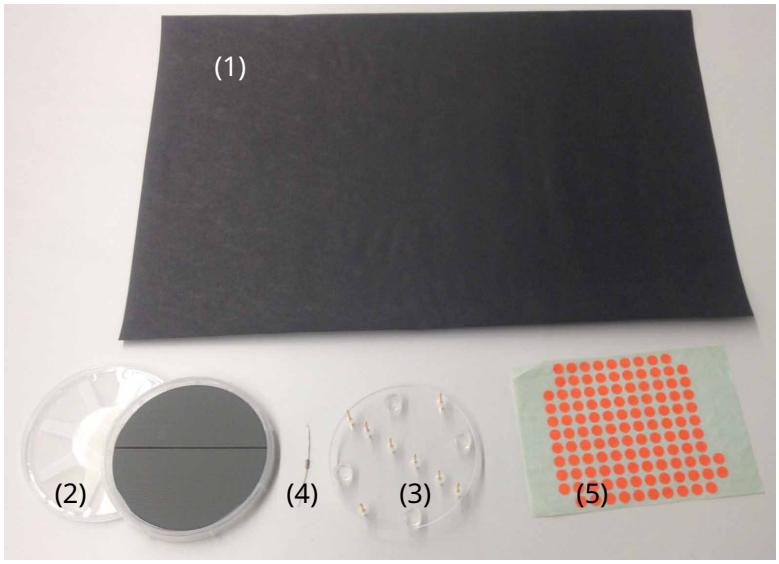
- اندازه کمیت های الکتریکی مربوط به مدار
- سنجش آثار مربوط به هندسه دستگاه
- سنجش آثار مربوط به ابعاد قطعه

یک لایه کاغذی شکل از ماده رسانا و یک ویفر لایه نشانی شده از سیلیکون به عنوان نمونه در نظر گرفته می شوند.

Experiment
persion (Iran)

Q1-2

فهرست لوازم آزمایش



شکل ۱: قطعات خاص مورد نظر برای این آزمایش

۱- کاغذ رسانای لایه نشانی شده از گرافیت

۲- یک ویفر سیلیکونی که با لایه نازکی از کرومیوم پوشانده شده است و در یک در بر گیرنده قرار دارد

۳- صفحه پلکسی گلاس با ۸ عدد پین فنری

۴- یک مقاومت اهمی

۵- برچسب های رنگی

توجه های اولیه مهم

- ویفر سیلیکونی که به شما داده شده بر اثر خم کردن و یا افتادن به سادگی می شکند. همچنین سطح فلزی براق قطعه را لمس و خراشیده نکنید.

دستور آزمایش

- در این آزمایش تولید کننده سیگنال(generator signal) به عنوان منبع ولتاژ DC به کار می رود.

در این مد از کار، تولید کننده سیگنال ولتاژ ثابتی را بین خروجی ولتاژ (شماره ۵) و خروجی GND شماره (۷) بر قرار می کند. این شماره ها مربوط است به تصاویری که در بخش راهنمایی های کلی ارائه شده است.

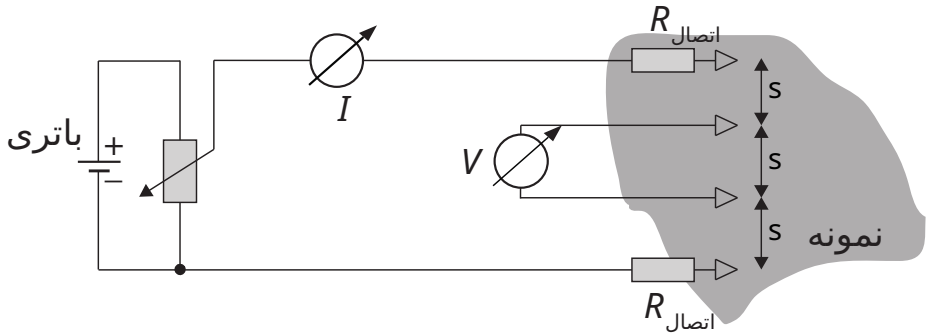
- ولتاژ (در گستره 0 - 5 ولت) توسط پیچ پتانسیومتر سمت چپ که با عنوان تنظیم ولتاژ (۳) معرفی شده قابل تنظیم است.
- در هنگام آزمایش مطمئن شوید که درایو بلندگو (loudspeaker) از تولید کننده سیگنال با استفاده از کلید خاموش و روشن (۸) خاموش است. برای حصول اطمینان می توان ولتاژ بین خروجی (۶) که دامنه اسپیکر را نشان می دهد و خروجی (۷) که اتصال زمین است را اندازه گیری کنید. اگر بلندگو خاموش باشد، ولتاژ بین این دو خروجی صفر است.

بخش A, سنجش ۴ نقطه ای، Four-point-probe (4PP) ، (نمره 1.2)

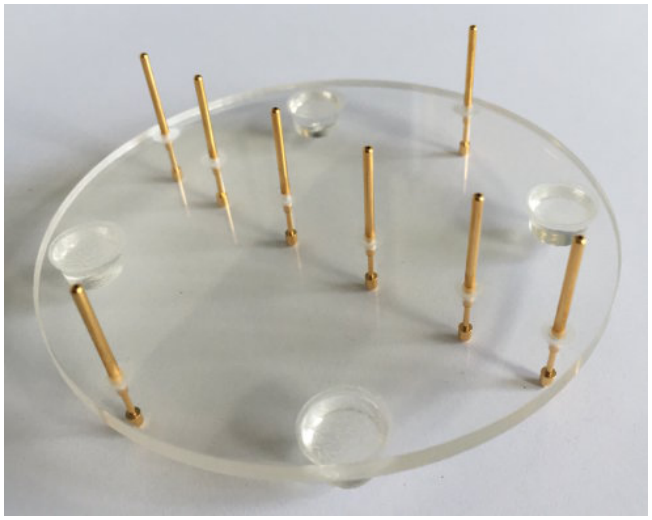
برای اندازه گیری دقیق مقاومت ویژه یک نمونه، اتصال هایی که برای اندازه گیری ولتاژ به کار می روند باید از اتصال هایی که برای به راه اندازی جریان به کار می روندجدا باشند.

به این تکنیک، روش سنجش ۴ نقطه ای گفته می شود (.(4pp چهار اتصال یاد شده در یک هندسه متقارن به ساده ترین شکل ممکن قرار می گیرند. جریان I از طریق یکی از اتصال های خارجی (موسوم به چشمه) به درون نمونه وارد می شود، سپس از طریق همه مسیرهای ممکن داخل نمونه شارش می یابد و سرانجام از طریق اتصال دیگر (موسوم به چاه) از نمونه خارج می شود. در این بین، ولتاژ V روی یک مسیر مشخص از نمونه به طول s سنجیده می شود.

در صورتی که از یک چینش آزمایشی متقارن استفاده کنیم همه چیز به شدت ساده میشود، به این معنی که فاصله s اتصال ها با هم و فاصله اتصال های میانی مطابق شکل زیر یکسان است.



نمودار I بر حسب V مشخصه $I-V$ نمونه را نشان می دهد و این امکان را فراهم می کند که مقاومت الکتریکی نمونه را اندازه گیری کنیم. در ادامه آزمایش فقط روش 4pp را به کار می بریم. در عمل ۴ تا از ۸ اتصال خروجی نشان داده شده در شکل را در حالت خطی و هم فاصله استفاده می کنیم.



شکل ۲: صفحه شیشه ای آکریلیک برای اندازه گیری به روش 4pp که دارای چهار پایه پلاستیکی و هشت اتصال یا سنجشگر (probe) است.

در اندازه گیری های زیر از تمام سطح برگه رسانا استفاده کنید

Experiment
persion (Iran)

Q1-4

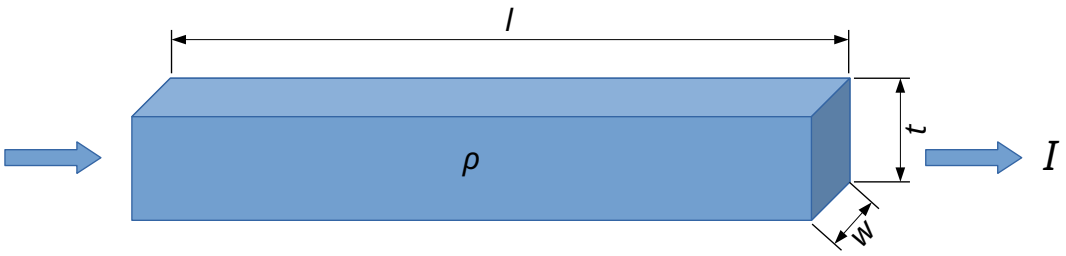
یادآوری های مهم برای همه اندازه گیری های بعدی

- ضلع بلندتر صفحه رسانا ضلع مرجع است که باید چهار اتصال در امتداد آن باشد.
- دقت کنید که سمت لایه نشانی شده صفحه رسانا (سمت سیاه) مورد استفاده قرار گیرد نه سمت قهوه ای! می توانید با استفاده از برچسبهای رنگی سمت درست استفاده شده را مشخص کنید.
- کنترل کنید که سوراخ یا برشی در صفحه نباشد.
- در این اندازه گیری اتصالها را هر چه ممکن است به مرکز نمونه نزدیکتر کنید.
- با نیروی کافی اتصال ها را فشار دهید تا مطمئن شوید همه شان به خوبی متصل شده اند. در این حال پایه پلاستیکی درست به سطح صفحه می چسبد.

A.1	اندازه گیری به روش ۴ نقطه ای :(4pp) افت ولتاژ V روی فاصله s را به عنوان تابعی از I، شدت جریانی که در آن بخش جریان می یابد اندازه گیری کنید. دستکم آزمایش را برای ۴ مقدار مختلف انجام دهید، یک جدول تنظیم کنید و نمودار تغییرات افت ولتاژ V بر حسب شدت جریان I را در نمودار A.1 رسم کنید.	0.6pt
A.2	مقاومت الکتریکی موثر کل صفحه $R = \frac{V}{I}$ را از روی نمودار A.1 به دست آورید.	0.2pt
A.3	با استفاده از نمودار A.1 خطای σ_R مربوط به مقدار مقاومت R در سنجش 4pp را به دست آورید.	0.4pt

بخشB. مقاومت ویژه یک صفحه (نمره 0.3)

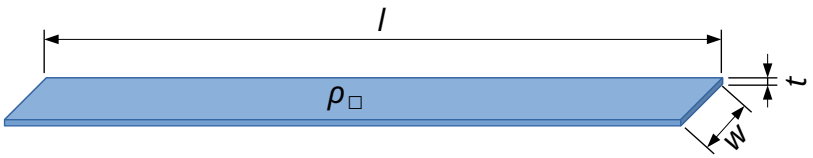
مقاومت ویژه خاصیتی از ماده تشکیل دهنده یک مقاومت الکتریکی است که به کمک آن می توان اندازه مقاومت یک قطعه سه بعدی با ابعاد و هندسه مشخص را به دست آورد. در اینجا ما یک قطعه به طول l، پهنای w و ضخامت t را در نظر می گیریم.



مقاومت الکتریکی R این قطعه در صورتی که جریان الکتریکی در طول آن شارش یابد چنین است:

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \tag{1}$$

بر همین مبنا می توان مقاومت الکتریکی یک رسانای دو بعدی با ضخامت ناچیز $t \ll w$ را به صورت زیر تعریف کرد:



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \tag{2}$$

با تعریف مقاومت ویژه لایه ای به صورت $\rho_{\square} \equiv \rho/t$ می توان این کمیت را بر حسب اهم بیان کرد: $[\rho_{\square}] = 1\ \Omega$

نکته مهم: معادله 2 فقط برای یک چگالی جریان همگن و در شرایطی که پتانسیل الکتریکی در هر مقطع رسانا ثابت است درست است. در حالتی که یک اتصال نقطه ای به سطح این رسانا وصل شده باشد، این رابطه برقرار نیست. برای چنین حالتی می توان نشان داد که مقاومت الکتریکی لایه با رابطه زیر به مقاومت ویژه لایه ای مربوط است

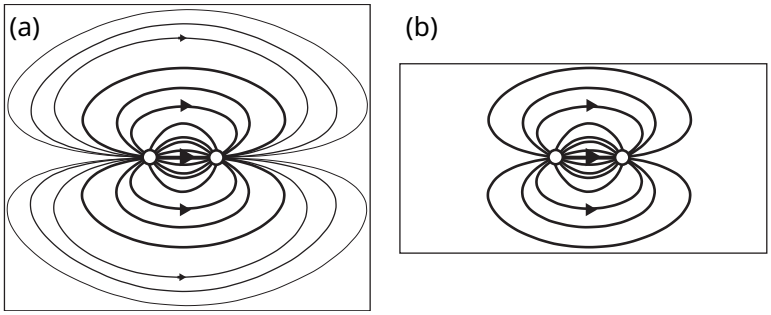
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \tag{3}$$

برای $l, w \gg t$

B.1	مقاومت ویژه لایه ای $\rho_{\square}$ را برای برگه از روش اندازه گیری 4pp بخش A حساب کنید.این مقدار خاص را ρ_{∞} مینامیم (و مقاومت الکتریکی متناظر با آن از قسمت A را R_{∞} می نامیم) زیراابعاد تمام صفحه بسیار بزرگتر از فاصله اتصال ها از یکدیگر است، یعنی: $l, w \gg s$	0.3pt

بخش C، اندازه گیری برای ابعاد متفاوت نمونه (نمره 3.2)

تا اینجا اثر متناهی بودن ابعاد w و l از نمونه را به حساب نیاوردیم. اگر نمونه کوچکتر باشد، با همان ولتاژ، جریان کمتری عبور می دهد. توضیح این که اگر ولتاژ معینی را بین دو اتصال نقطه ای (دایره های کوچک سفید در شکل زیر) برقرار کنیم، جریان الکتریکی در تمام مسیرهای نا متقاطع ممکن در نمونه مطابق خطوط شکل شارش می یابد. هر چه خط طولانی تر باشد جریان کوچکتر است. این موضوع را با نازک کردن خطوط در شکل نشان داده ایم. حال اگر نمونه مثل شکل b کوچکتر و ولتاژ همان مقدار قبلی باشد، تعداد کمتری از مسیرها برای عبور جریان وجود دارد و جریان کل کاهش می یابد. به این ترتیب مقاومت الکتریکی کل بیشتر است.



مقاومت ویژه لایه ای به عنوان تابعی از ابعاد نمونه بلاتغییر است. بنا بر این برای تبدیل مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده به مقاومت ویژه لایه ای باید یک ضریب تصحیح دیگر $f(w/s)$ به فرمول 3 اضافه کنیم:

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)}. \tag{4}$$

برای نمونه ای با طول $l \gg s$ ، ضریب تصحیح f فقط به نسبت w/s بستگی دارد و همواره از یک بزرگتر است: $f(w/s) \geq 1$. برای سادگی فرض می کنیم نمونه ما به اندازه کافی دراز است و فقط توجه خود را به پهنای آن w جلب می کنیم. به این ترتیب فرض می کنیم مقدار مقاومت برای ابعاد بزرگ به نتیجه صحیح $\rho_{\square}$ میل می کند.

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{with} \quad f(w/s \to \infty) \to 1.0. \tag{5}$$

C.1	با استفاده از روش 4pp مقاومت $R(w,s)$ را برای ۴ مقدار متفاوت w/s در بازه 0.3 تا 0.5 اندازه گیری کنید و نتایج خود را در جدول C.1 ثبت کنید. مطمئن شوید که طول نمونه از پنج برابر فاصله نوعی سنجش گرها بیشتر است، یعنی $l > 5s$ و نیز طول نمونه ها همواره در همان امتداد ضلع بزرگتر صفحه کاغذ در نظر گرفته شده است. برای هر مقدار w/s ولتاژ را برای ۴ مقدار متفاوت جریان اندازه گیری کنید و مقدار میانگین مقاومت $R(w/s)$ را برای این ۴ اندازه گیری حساب کنید. نتایج خود را در جدول C.1 وارد کنید.	3.0pt

C.2	کمیت $f(w/s)$ را برای هر یک از اندازهگیری ها حساب کنید.	0.2pt

بخش D. ضریب تصحیح هندسی: قاعده مقیاس (نمره 1.9)

در بخش C دیدید که مقاومت ویژه اندازه گیری شده با نسبت پهنا به فاصله سنجشکرها یعنی کمیت w/s مقیاس می شود. داده های گردآوری شده در بخش C را در محدوده مورد آزمایش را می توان در قالب تابع عمومی زیر توصیف کرد:

$$\text{Generic fit function:} \quad f(w/s) = 1.0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^{b} \tag{6}$$

Experiment
persion (Iran)

Q1-7

توجه کنید که برای مقادیر بسیار بزرگ $f(w/s)$ تابع $f(w/s)$ به مقدار 1.0 میل می کند.

D.1	به منظور آن که داده های بخش C را با تابع $f(w/s)$ در معادله 6 برازش کنید مناسب ترین نوع کاغذ رسم نمودار را انتخاب کنید که می تواند نمودار خطی D.1a, نمودار نیمه لگاریتمی D.1b و یا نمودار تمام لگاریتمی D.1c باشد. و سپس داده ها را در آن رسم کنید.	1.0pt
D.2	از برازش انجام شده پارامترهای a و b را تعیین کنید.	0.9pt

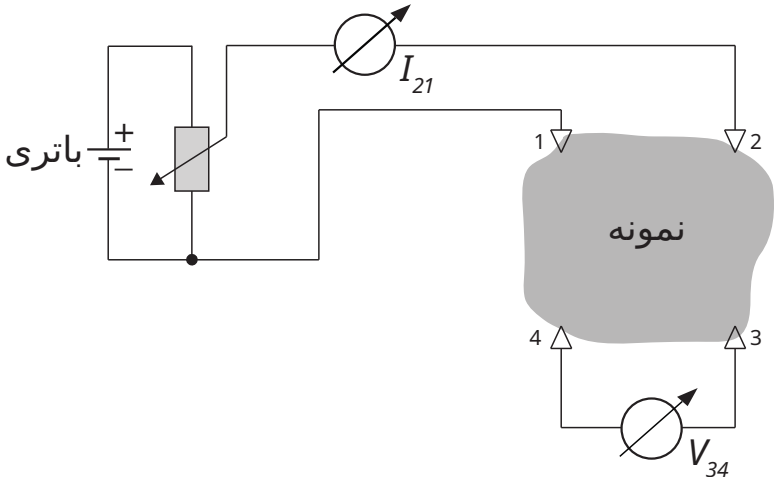
بخش .E ویفر سیلیکون و روش وان در پائو (نمره 3.4)

در صنایع نیمرسانا آگاهی از مقاومت الکتریکی لایه ای برای لایه های فلزی یا نیمرسانای نشانده شده بسیار مهم است و خواص قطعات تولید شده به آنها بستگی دارد. در ادامه شما با یک ویفر نیمرسانای سیلیکونی کار خواهید کرد که با یک لایه نازک از فلز کروم پوشانده شده است (سطح براق).

جعبه پلاستیکی محتوی ویفر سیلیکونی را باز کنید (در آن را در جهت پیکانی که با واژه RELEASE مشخص شده بچرخانید). دقت کنید که ویفر از دستتان نیفتد، نشکند، خم نشود و سطح براق آن لمس نشود. هنگام آزمایش آن را طوری روی میز بگذارید که سطح براق آن به سمت شما باشد.

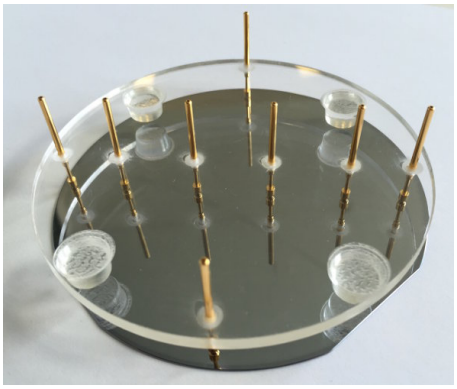
E.1	از همان روش 4pp قبل برای سنجش ولتاژ V بر حسب شدت جریان I استفاده کنید. در پاسخنامه خود شماره ویفر مورد آزمایش را که روی جعبه پلاستیکی درج شده است ذکر کنید.	0.4pt
E.2	داده ها را در نمودار E.2 رسم کنیدو از روی آن R_{4PP} را حساب کنید.	0.4pt
E.3	برای تعیین تصحیح مربوط به شکل دایره ای ویفر پهنای موثر w نمونه را با قطر $D = 100\ \mathrm{mm}$ مربوط به ویفرتخمیین می زنیم. با این فرض نسبت w/s را حساب کنید. تابع معادله 6 را با مقادیری که برای a و b حساب کرده اید به کار ببرید تا ضریب تصحیح $f(w/s)$ برای اندازه گیری های مربوط به ویفر سیلیکونی به دست آید.	0.2pt
E.4	با استفاده از معادله 4 مقدار $\rho_{\square}$ را برای لایه کروم حساب کنید.	0.1pt

برای محاسبه دقیق مقاومت ویژه لایه ای بدون نیاز به تصحیح های هندسی ، مهندس شرکت فلیپس آقای ال. ج. وان در پائو ، روش ساده ای را به صورت زیر ابداع کرد. وی چهار سنجشگر 1 تا 4 رامطابق شکل روی محیط نمونه ای با شکل نامشخص نصب کرد. یک بار فرض کنید جریان بین سنجشگرهای مجاور 1 و 2 شارش می یابد و اختلاف پتانسیل میان سنجشگرهای 3 و 4 اندازه گیری می شود. این کار جواب را برای مقدار مقاومت $R_{I,V} = R_{21,34}$ به دست می دهد.



به دلیل تقارن می توان نوشت $R_{21,34} = R_{34,21}$ و $R_{14,23} = R_{23,14}$. وان- در - پائو نشان داد که برای شکل های دلخواه اما همبند ساده (بدون سوراخ) معادله زیر بر قرار است

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_{\square}} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_{\square}} \equiv 1. \qquad (7)$$



شکل ۳: دستگاه 4PP بر روی ویفر سیلیکونی با پوشش فلزی. به برش سمت راست ویفر دایره ای توجه کنید. این برش، امتداد صاف ویفر نامیده می شود.

چهار فنر اتصال را طوری وصل کنید که سنجش گرها یک مربع تشکیل دهند. هر بار دو اتصال مجاور را با یک آمپر سنج به منبع جریان متصل کنید و دو اتصال دیگر را به ولتمتر وصل کنید و مربع را آنقدر بچرخانید که یکی از لبه هایش موازی امتداد صاف ویفر باشد.

E.5	در بار نخست، نحوه جهت گیری اتصال های حامل جریان نسبت به امتداد صاف ویفر را در یک شکل رسم کنید. برای آرایش رسم شده ولتاژ V را حداقل برای شش مقدار مختلف از جریان I تقریبا با فاصله های یکسان اندازه گیری کنید. نتایج را در جدول E.5 وارد کنید.	0.6pt
E.6	حال آزمایش را برای آرایش دیگری تکرار کنید که در آن اتصال های مجاور حامل جریان عمود بر آنچه در آزمایش قبل انجام دادید باشند. نتایج را در **جدول E.6** وارد کنید.	0.6pt
E.7	داده های هر دو آزمایش فوق را در نمودار E.7 با رنگ ها یا علامتهای مختلف رسم کنید. مقدار متوسط $\langle R \rangle$ را با استفاده از دو نمودار تعیین کنید.	0.5pt
E.8	همه مقاومت های $R_{kl,mn}$ را با $\langle R \rangle$ جایگزین کنید. معادله 7 را برای $\rho_\square$ حل کنید و مقاومت ویژه لایه ای $\rho_\square$ را برای لایه کروم محاسبه کنید.	0.4pt
E.9	نتایج اندازه گیری شده با آرایش خطی (E.4) و نتایج روش واندر پاو (E.8) را باهم مقایسه کنید. تفاوت دو اندازه گیری را بصورت در صد خطای نسبی بیان کنید.	0.1pt
E.10	لایه های کروم (Cr) ضخامت اسمی به اندازه 8 نانومتر دارند. از این مقدار و نتایج نهایی روش واندر پاو استفاده کرده و مقاومت ویژه Cr را با استفاده از معادلات 1 و 2 محاسبه کنید.	0.1pt

رسانندگی الکتریکی در دو بعد (۱۰ نمره)

اعداد 0 تا 9 را در جدول زیر بنویسید:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

بخش A: "دست گرمی" (۱ نمره)

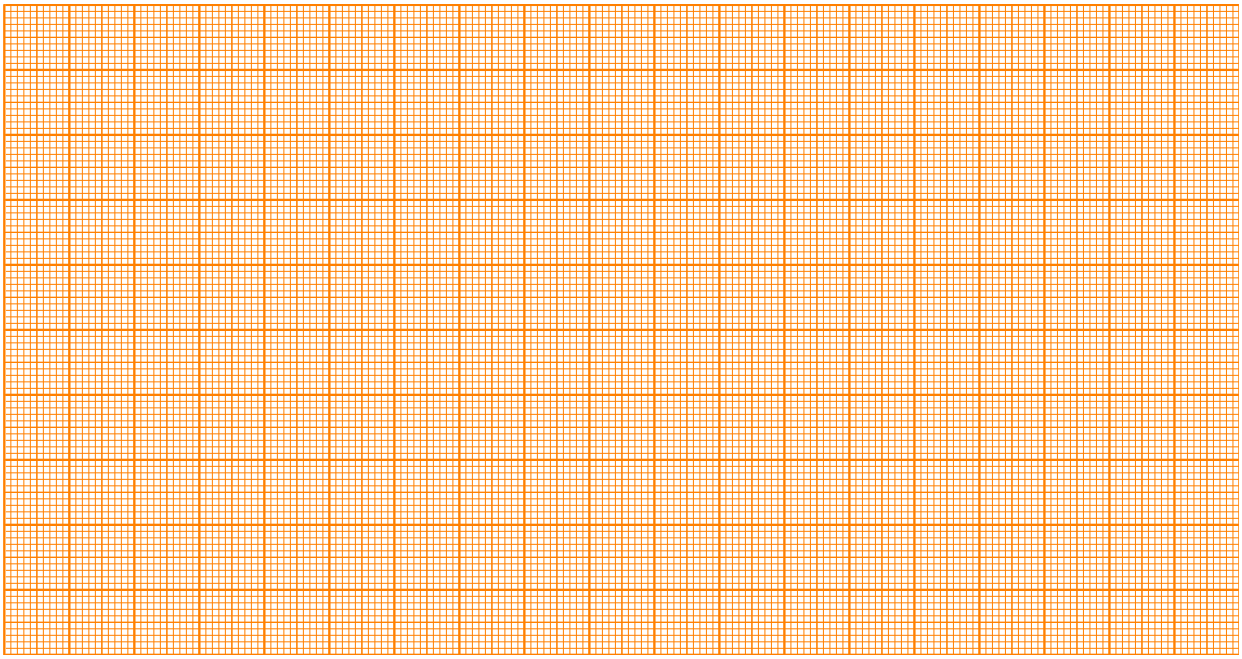
A.1 (0.2 pt)

A.2 (0.4 pt)

V	I	V	I

مقادیر خود را در گراف A.1 رسم کنید.

گراف A.1 : I برحسب V



(0.1 pt) **A.3**

$R =$

(0.1 pt) **A.4**

$R_{\text{col}} =$

$\frac{\Delta R_{\text{col}}}{R_{\text{col}}} =$

(0.1 pt) **A.5**

$\frac{R - R_{\text{col}}}{R} =$ $=$ %

(0.1 pt) **A.6**

$\left|\frac{R-R_{\text{col}}}{R}\right|$ $\left|\frac{\Delta R_{\text{col}}}{R_{\text{col}}}\right|$

(0.6 pt) **B.1**

(0.1 pt) **B.2**

(0.4 pt) **B.3**

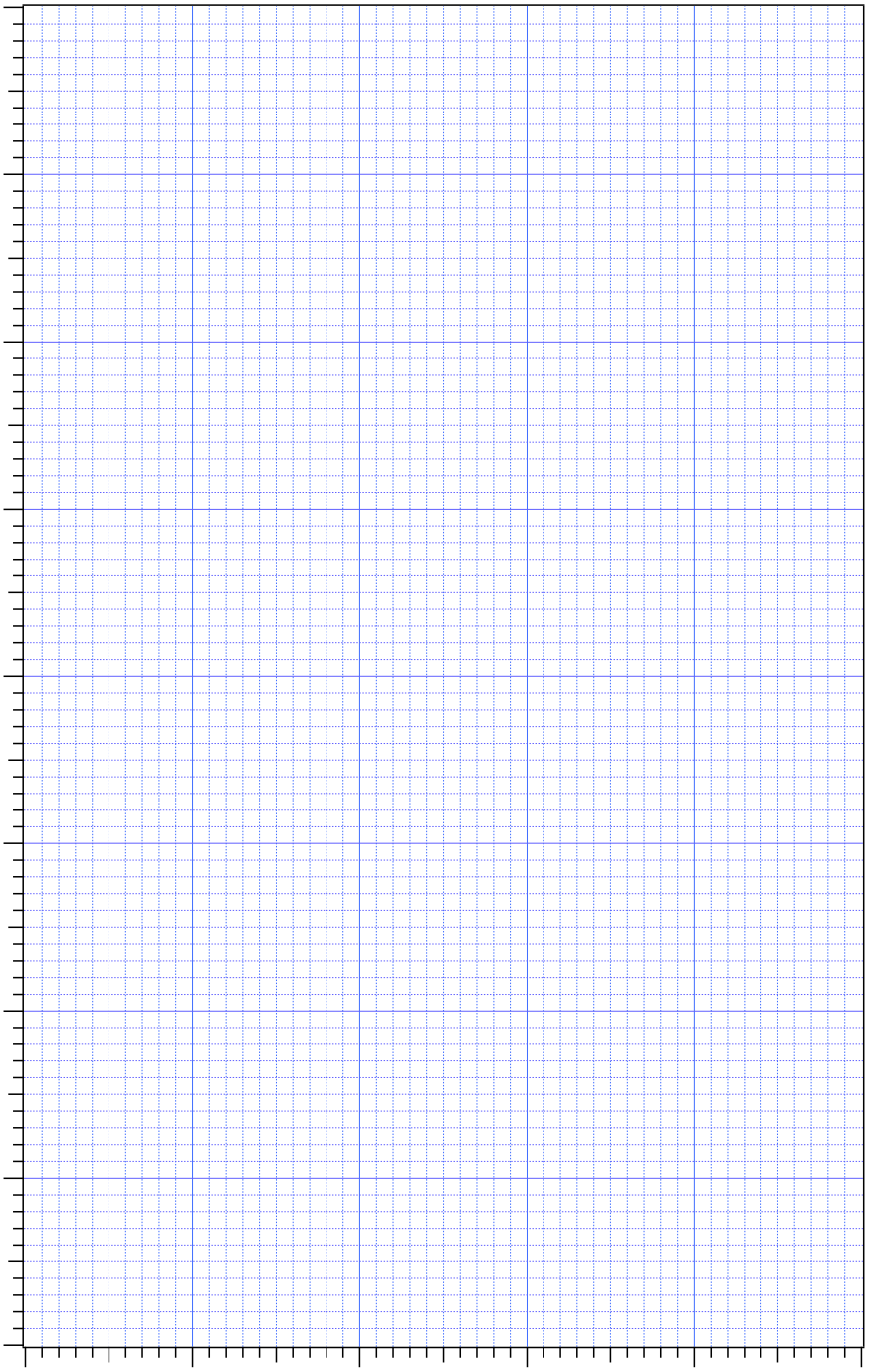
(0.1 pt) **C.1**

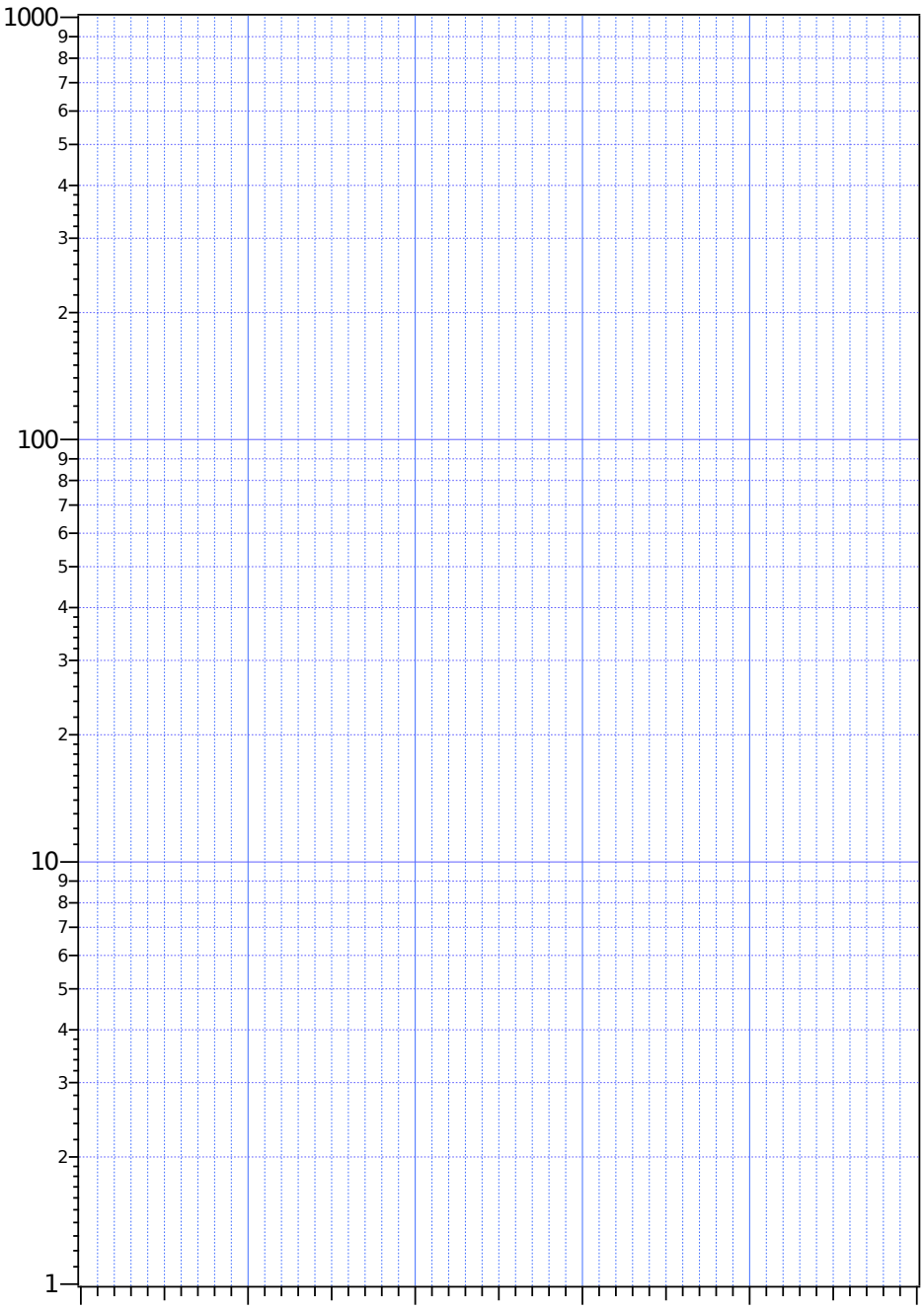
(3 pt) **D.1**

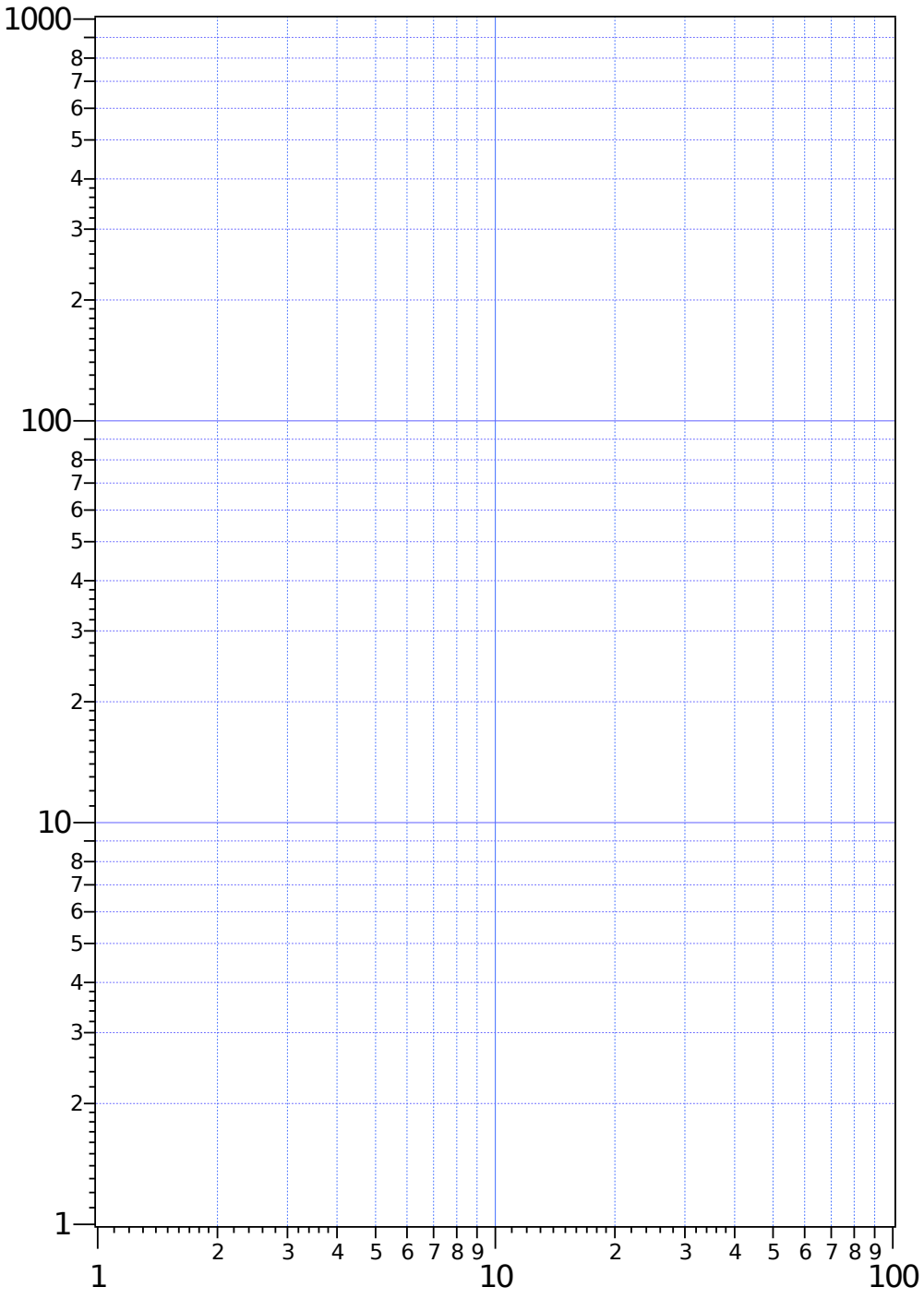
(0.2 pt) **D.2**

(1.0 pt) **E.1**

(0.6 pt) **E.2**

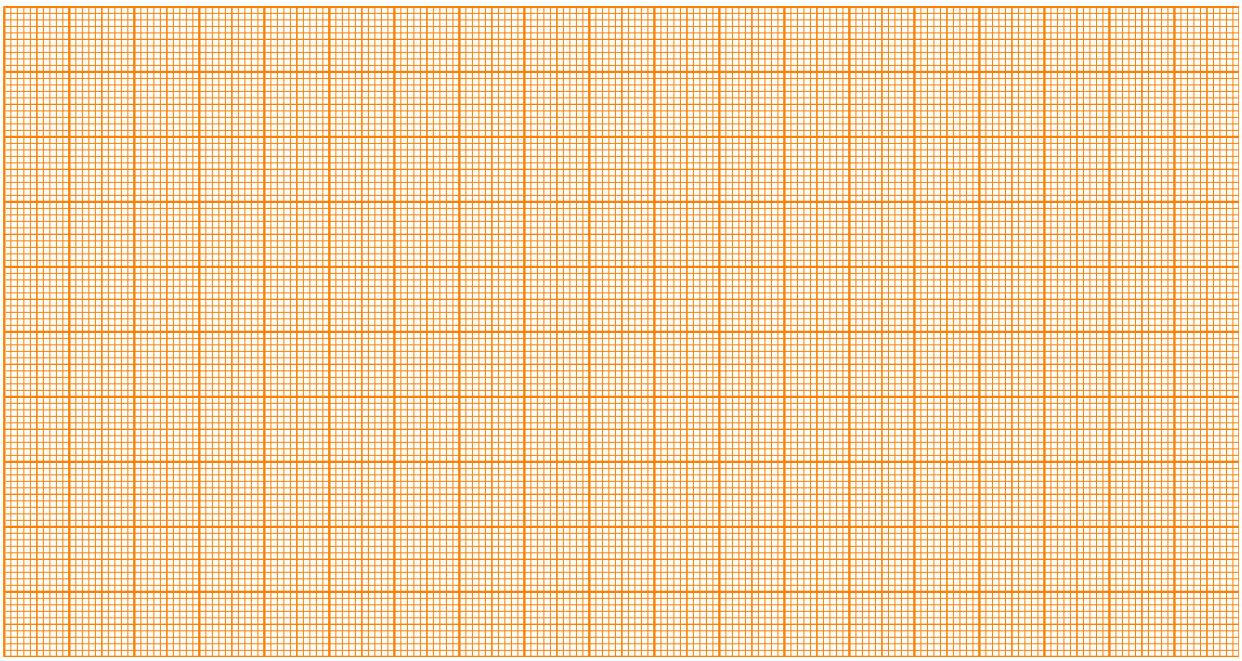



1000
100
10
1
9
8
7
6
5
4
3
2


1000
8
7
6
5
4
3
2
100
8
7
6
5
4
3
2
10
8
7
6
5
4
3
2
1
2 3 4 5 6 7 8 9
1
2 3 4 5 6 7 8 9
10
100

(0.4 pt) **F.1**

(0.3 pt) **F.2**



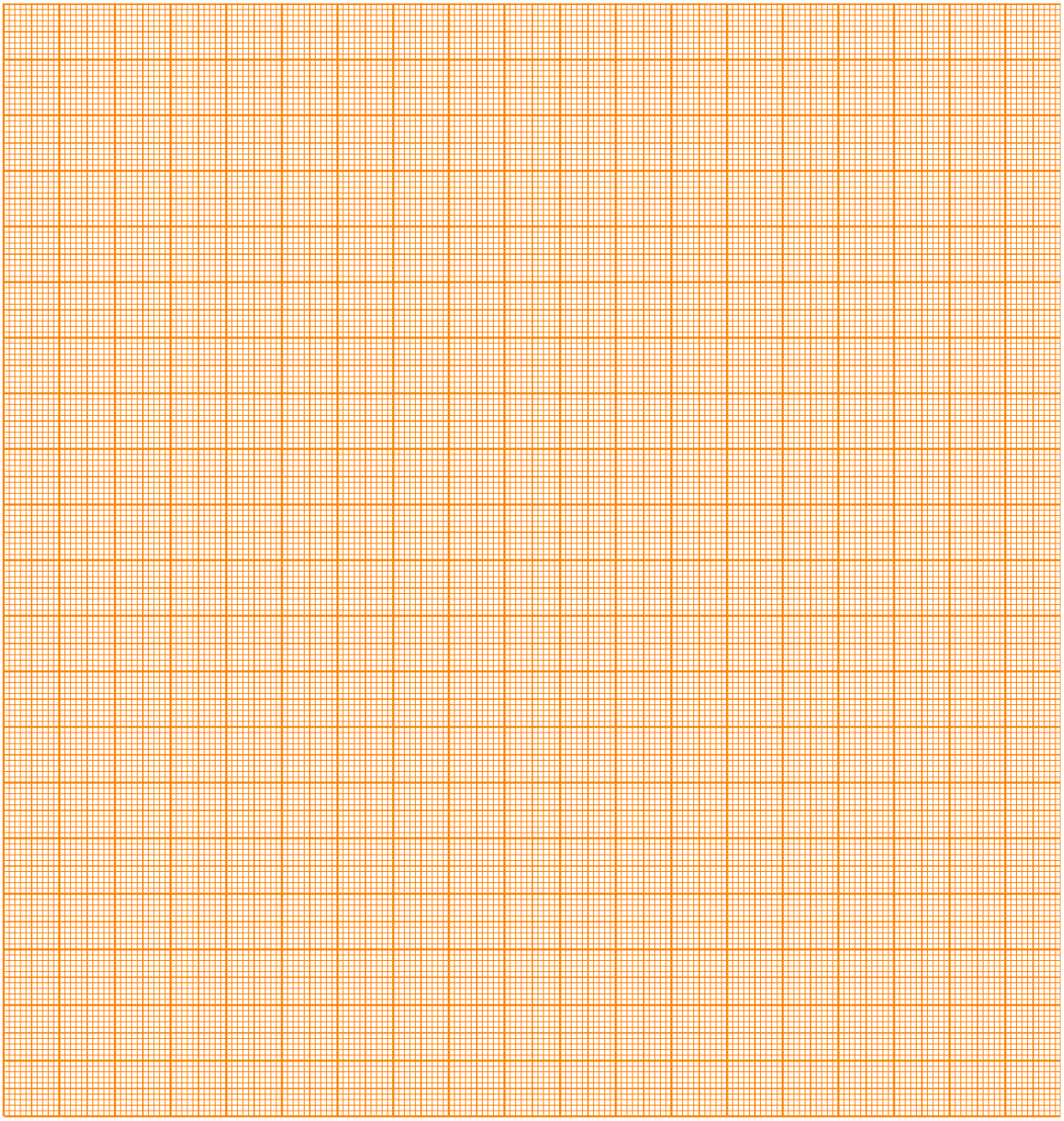
(0.2 pt) **F.3**

(0.1 pt) **F.4**

(0.6 pt) **F.5**

(0.6 pt) **F.6**

(0.3 pt) **F.7**



(0.3 pt) **F.8**

(0.1 pt) **F.9**

(0.1 pt) **F.10**

Problem 1 : Electrical conductivity in two dimensions - Answer Sheet *(10 points)*

Part A. Four-point-probe (4PP) measurements (1.2 points)

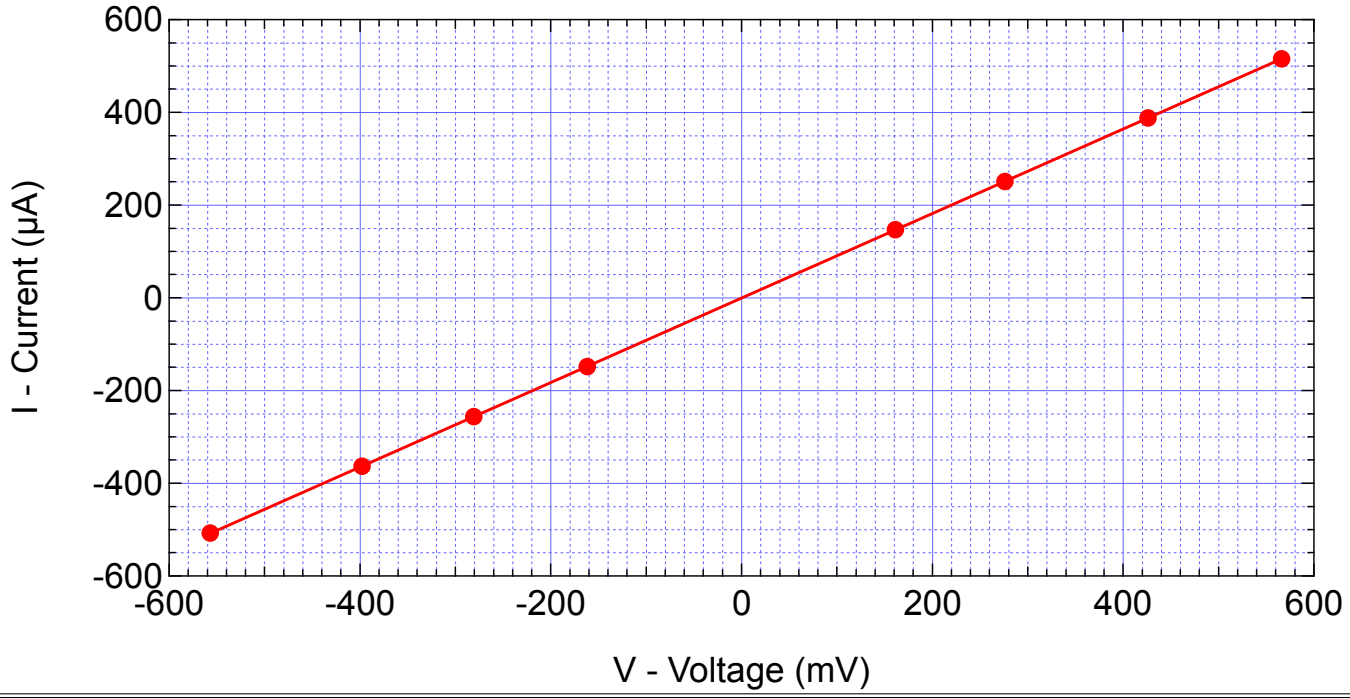
A1 (0.6 pts)

$s = 2$ cm

I (μA)	V (mV)	I (μA)	V (mV)
251	276	-148	-162
516	566	-256	-281
388	426	-363	-398
147	161	-507	-557

Plot your data in the graph B1

Graph B1: I vs V



A2 (0.2 pts)

$R = 1.08$ kΩ

A3 (0.4 pts)

$\Delta R = \pm 1\ \Omega$

Part B. Sheet resistivity (0.3 points)

B1 (0.3 pts)

$\rho_{\square} \equiv \rho_{\infty} = 4.89\ \mathrm{k\Omega}$

Part C. Measurements for different sample dimensions (3.2 points)

C1 (3 pts) and **C2 (0.2 pts)**

$s = 20$ mm

$\rho_\infty = 4.89$ kΩ

w/s	I (μA)	V (mV)	R(w/s) (kΩ)	$R_{average}$ (kΩ)		$\hat{R}$
0.3	92	1477	16.1	15.9		14.7
0.3	74	1184	16			
0.3	57	914	16			
0.3	41	651	15.9			
0.3	23	358	15.6			
0.5	154	1306	8.5	8.5		7.8
0.5	127	1079	8.5			
0.5	97	824	8.5			
0.5	67	567	8.5			
0.5	38	321	8.4			
1	233	1071	4.6	4.6		4.3
1	174	799	4.6			
1	135	621	4.6			
1	101	465	4.6			
1	59	271	4.6			
2.5	389	749	1.9	1.9		1.8
2.5	319	635	2			
2.5	237	457	1.9			
2.5	151	291	1.9			
2.5	74	143	1.9			
5	467	648	1.4	1.4		1.3
5	419	577	1.4			
5	363	499	1.4			
5	289	398	1.4			
5	185	254	1.4			

Part D. Geometrical correction factor (1.9 points)

D1 (1.0 pts)

Plot your data on the appropriate graph paper: linear (Graph E1a), semi-logarithmic (D1b) **or** double-logarithmic (D1c) on the following pages.

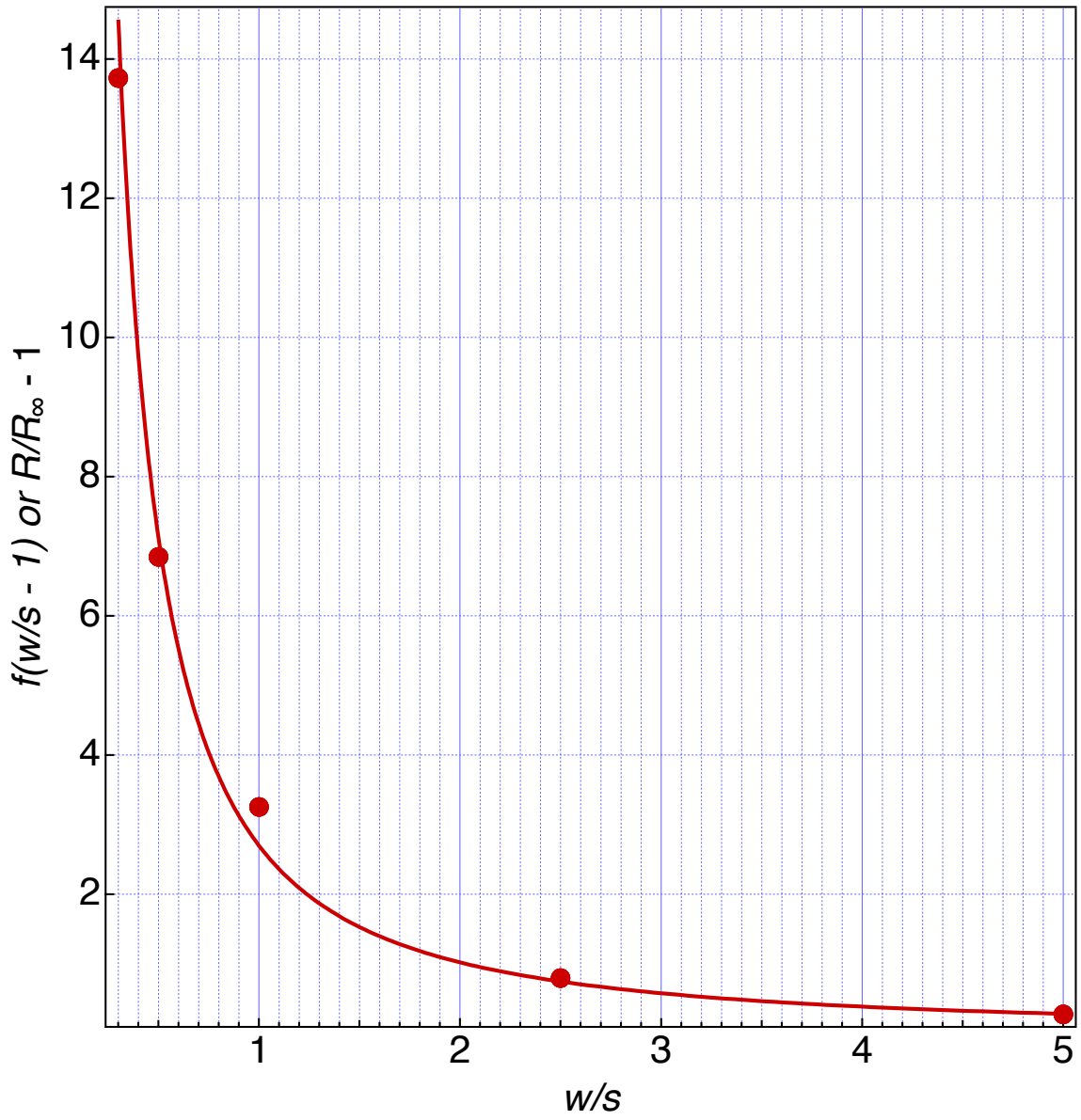
D2 (0.9 pts)

$a = 2.7$

$b = -1.4$

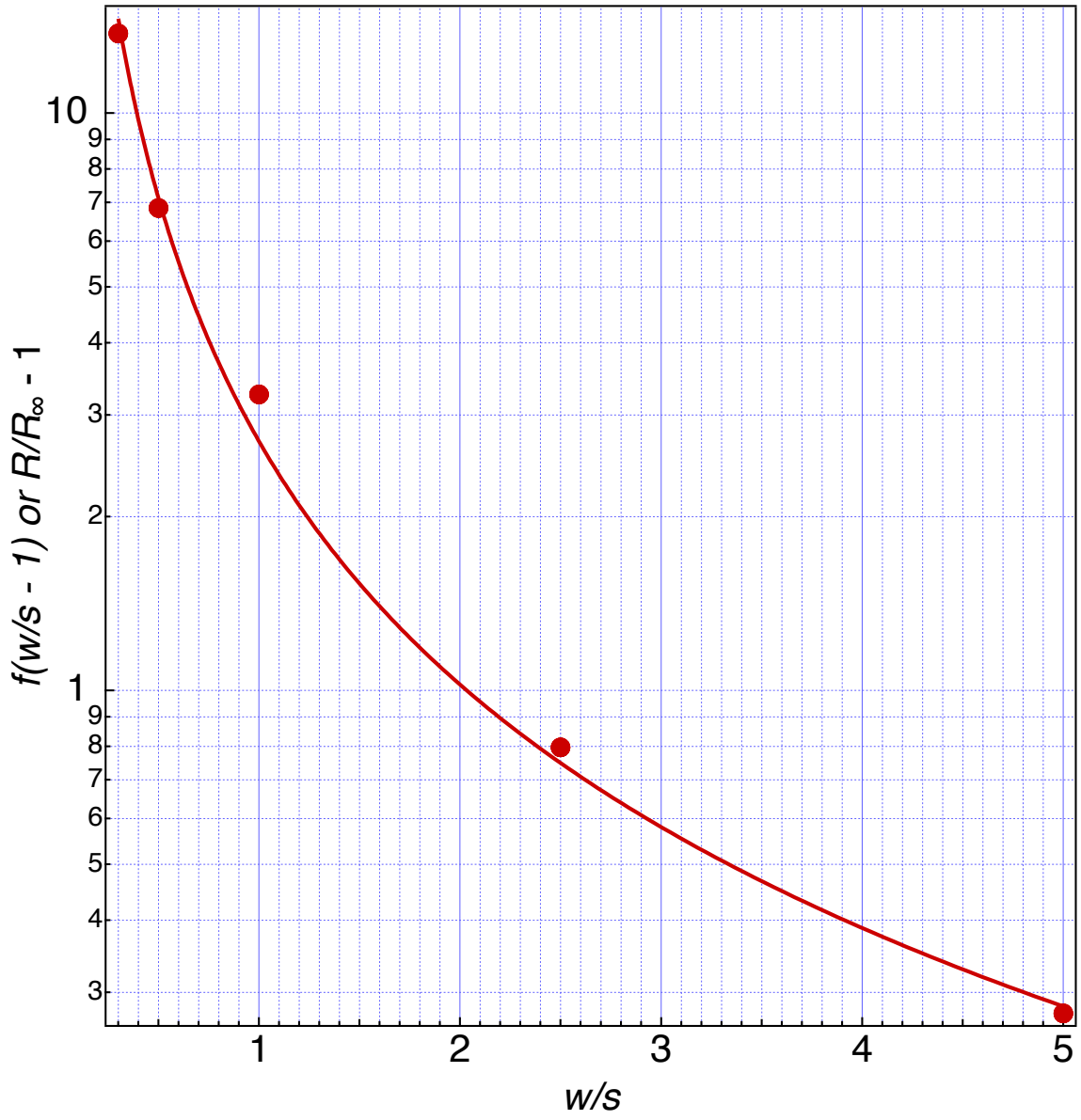
Graph D1a: linear scale: I vs V

Wrong. The usage of linear scale does not allow for deduction of the parameters.



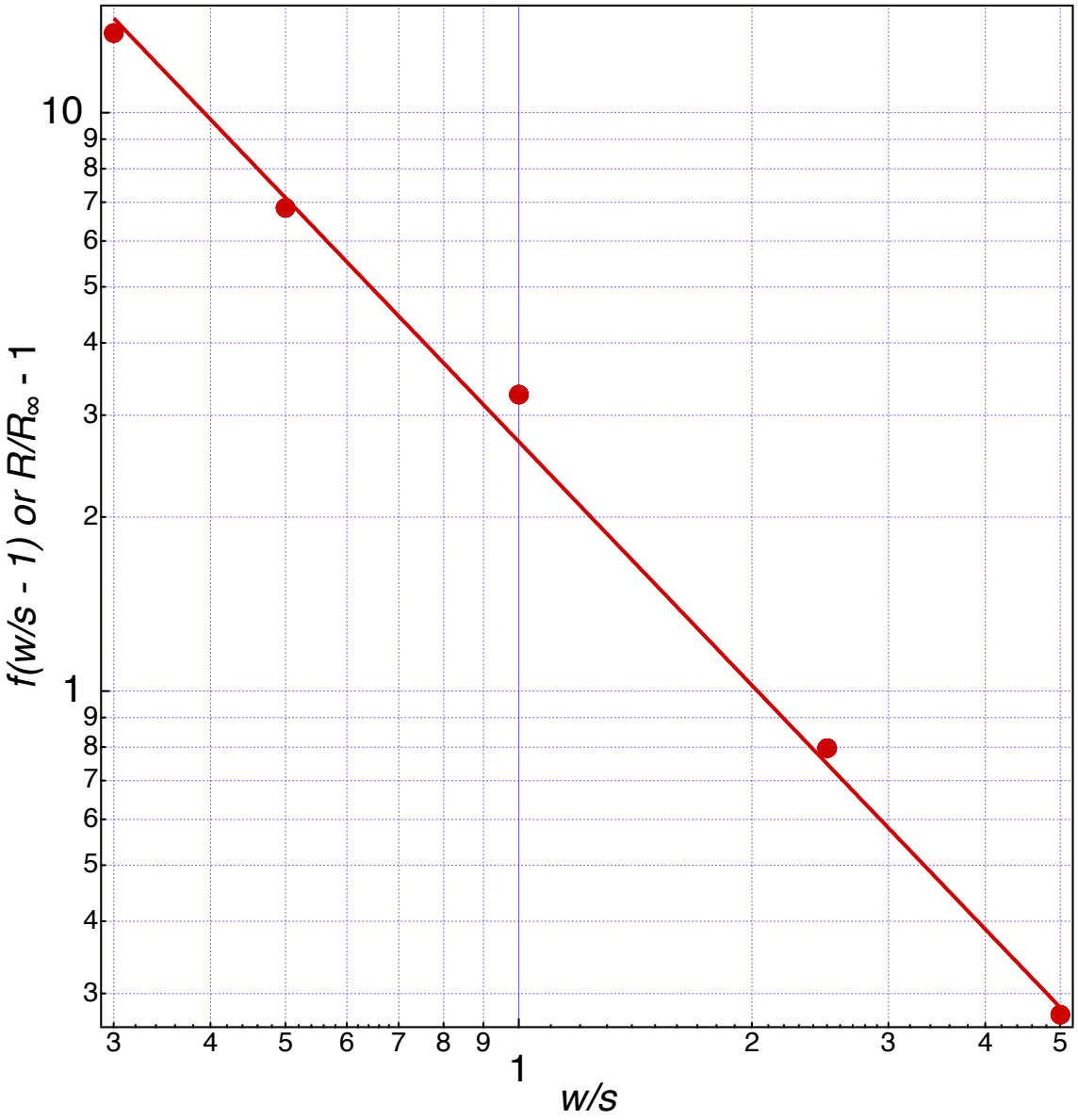
Graph D1b: semi-log scale: I vs V

Wrong. The usage of semi-log scale does not allow for deduction of the parameters.



Graph D1c: double-log scale: I vs V

Correct. The parameters can be deduced by fitting a line.



Part E. van der Pauw-method (3.4 points)

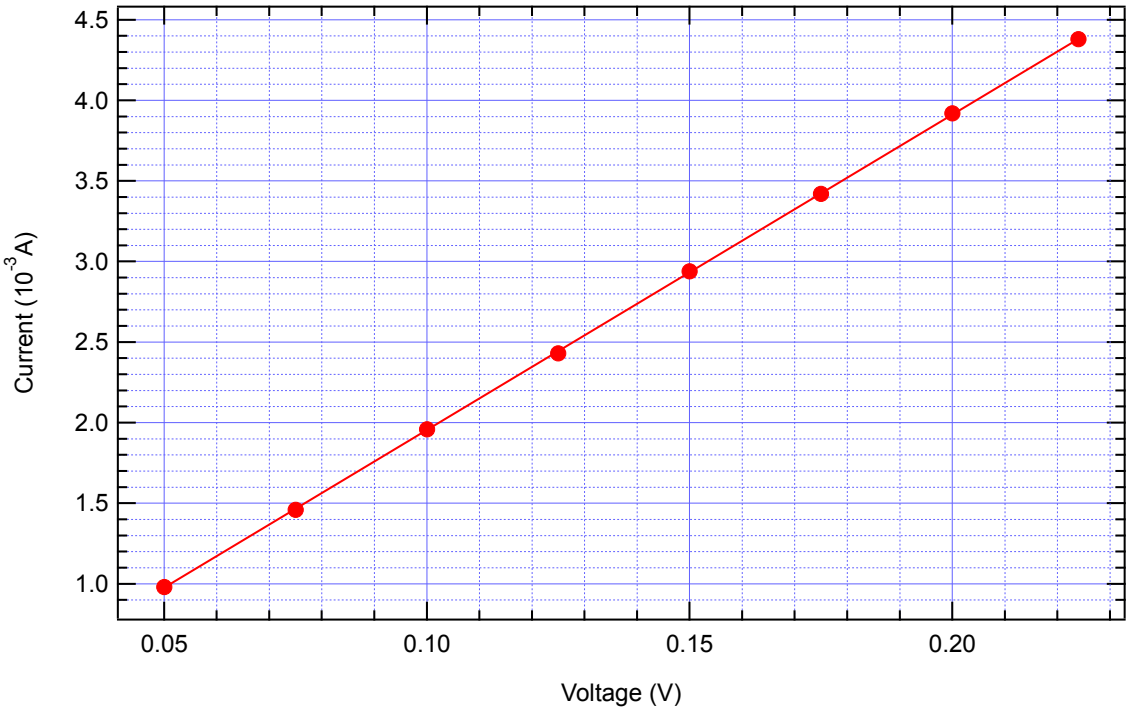
Note the number of your wafer here: 99 (between 1 - 450)

E1 (0.4 pts)

I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)
0.98	50	2.94	150
1.46	75	3.42	175
1.96	100	3.92	200
2.43	125	4.38	224

E2 (0.4 pts)

Graph F2: I vs V



$R_{4PP} = 51.1\Omega$

E3 (0.2 pts)

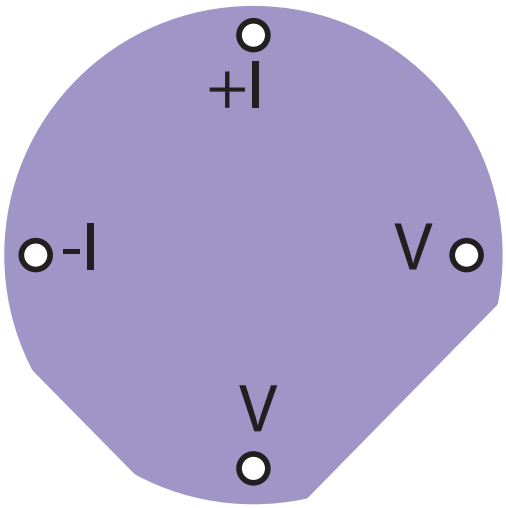
$w = 10$ cm $\rightarrow$ $w/s = 5$ $f(w/s) = 1.284$

E4 (0.1 pts)

$\rho_{\square} = 180\,\Omega$

E5 (0.6 pts)

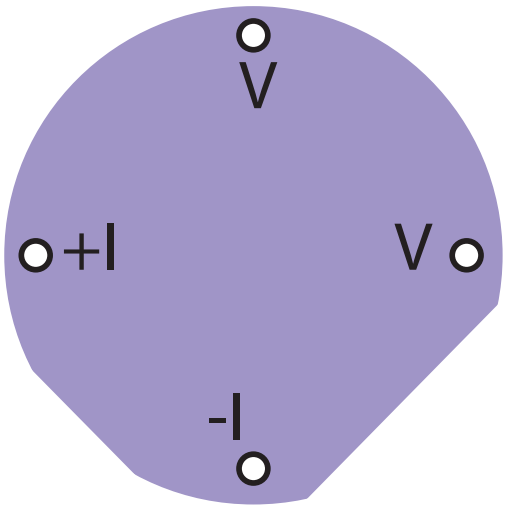
Sketch (orientation of the current):



V mV	I mA
140	3.71
120	3.18
100	2.66
80	2.12
60	1.58
40	1.06
20	0.53
-20	-0.54
-40	-1.06
-60	-1.61
-80	-2.13
-100	-2.68
-120	-3.2
-136	-3.62

E6 (0.6 pts)

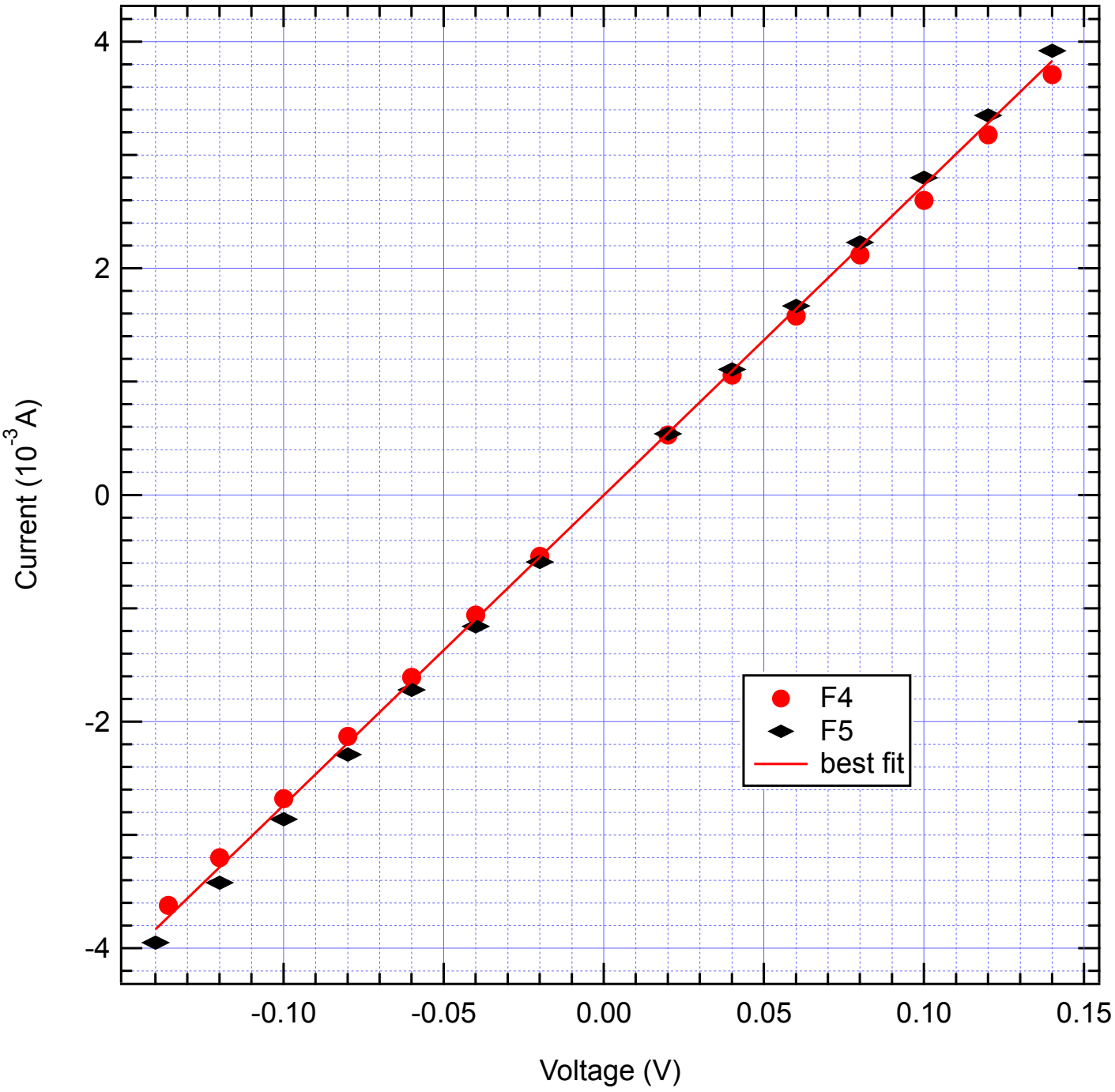
Sketch (orientation of the current):



I	V
140	3.92
120	3.35
100	2.8
80	2.23
60	1.67
40	1.11
20	0.54
-20	-0.59
-40	-1.16
-60	-1.72
-80	-2.29
-100	-2.86
-120	-3.42
-140	-3.95

E7 (0.5 pts)

Graph F6: I vs V



$\langle R \rangle = 36.5\ \Omega$

E8 (0.4 pts) Calculation:

$2 \cdot e^{-\pi \cdot \langle R \rangle / \rho_\square} = 1$ $\quad$ $e^{-\pi \cdot \langle R \rangle / \rho_\square} = 1/2$

$-\dfrac{\pi \cdot \langle R \rangle}{\rho_\square} = \ln(1/2)$ $\quad$ $\dfrac{\pi \cdot \langle R \rangle}{\rho_\square} = \ln(2)$

$\rho_\square = \dfrac{\pi \cdot \langle R \rangle}{\ln(2)}$

$\rho_\square = 165\,\Omega$

E9 (0.1 pts)

$\frac{\Delta \rho_\square}{\rho_\square} =$ 0.091 $=$ 9.1 %

E10 (0.1 pts)

Resistivity of the Cr thin film $\rho = 1.32 \cdot 10^{-6}\,\Omega \cdot \mathrm{m}$

مهره‌های جهنده- مدلی برای گذار فاز و ناپایداری (۱۰ نمره)

لطفاً راهنمای کلی موجود در پاکت جداگانه را قبل از شروع این مسئله بخوانید.

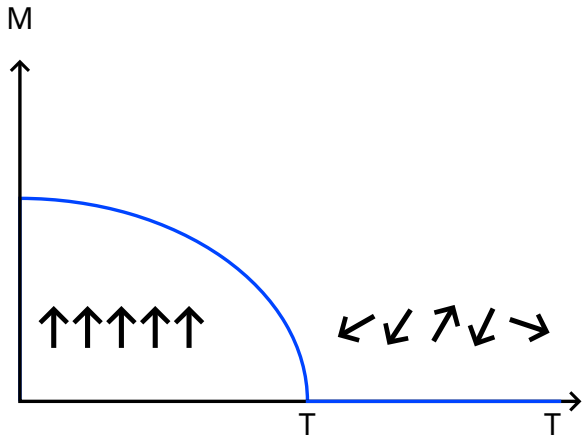
مقدمه

گذارهای فاز در زندگی روزمره پدیده‌های شناخته شده‌ای هستند، نظیر آب که به حالت‌های مختلفی مانند جامد، مایع و بخار در می‌آید. این حالت‌های مختلف به وسیله‌ی گذار فاز از هم جدا می‌شوند و رفتار جمعی ملکول‌ها از یک حالت به حالت دیگر تغییر می‌کند. گذار فاز همیشه وابسته به یک دمای گذار است که در این دما حالت ماده تغییر می‌کند، به عنوان مثال دماهایی که آب در آن یخ می‌زند یا می‌جوشد.

گذارهای فاز در سیستم‌های دیگری نظیر آهنرباها یا ابرساناها نیز اتفاق می‌افتد. به طور نمونه در آهنرباها تغییر حالت ماکروسکوپی از پارامغناطیس به فرومغناطیس و در ابررساناها از یک رسانای معمولی به ابررسانا در دمایی زیر یک دمای بحرانی انجام می‌شود.

همه‌ی این گذارهای فاز در یک چارچوب واحد با معرفی کمیتی به نام پارامتر نظم قابل توصیف‌اند. مثلاً در یک نمونه مغناطیسی، پارامتر نظم به هم‌سویی ممان‌های مغناطیسی (گشتاور دوقطبی مغناطیسی) اتم‌ها با یک مغناطش ماکروسکوپی وابسته است.

در گذارهای فاز پیوسته، پارامتر نظم همواره بالای دمای بحرانی صفر است و زیر دمای بحرانی به طور پیوسته افزایش می‌یابد، که برای یک آهنربا به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل، همچنین نظم میکروسکوپی در یک آهنربا را در حالت فرومغناطیس که ممان‌های مغناطیسی با هم، هم‌سو شده‌اند, نشان می دهد. این همسویی منجر به یک مغناطش ماکروسکوپی می شود. از سوی دیگر جهت‌گیری تصادفی و یا بی نظمی آن‌ها در فاز پارامغناطیس منجر به مغناطش ماکروسکوپی صفر می‌شود.



شکل ۱: نمایش شماتیک وابستگی پارامتر نظم M به دما در یک گذار فاز. زیر دمای بحرانی $T_{\rm crit}$، پارامتر نظم غیر صفر است و با کاهش دما افزایش می‌یابد در حالی که بالای دمای $T_{\rm crit}$ صفر است.

برای گذارهای فاز پیوسته، در حالت کلی و در نزدیکی یک گذار، پارامتر نظم از یک قاعده‌ی توانی پیروی می‌کند، به عنوان مثال در مغناطیس، مغناطش M زیر دمای بحرانی، $T_{\rm crit}$، با معادله‌ی زیر توصیف می شود:

$$M \begin{cases} \sim (T_{\rm crit}-T)^b, & T<T_{\rm crit} \\ =0, & T>T_{\rm crit} \end{cases} \qquad (1)$$

که T دما است. آنچه بیشتر مایه‌ی تعجب است آن است که این رفتار جهان شمول (universal) است بدین معنی که نمای این قاعده‌ی توانی برای بسیاری از گذار فازهای مختلف یکسان است.

هدف

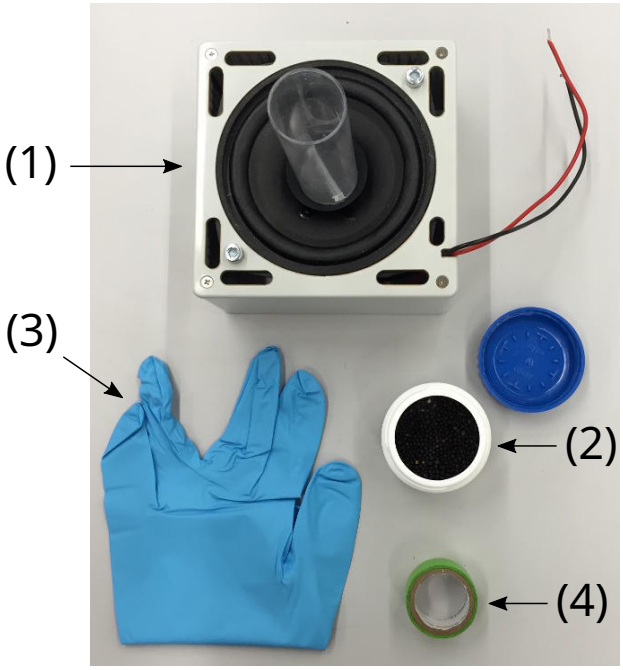
ما مثال ساده‌ای را مطالعه می‌کنیم که در آن بعضی از خواص گذارهای فاز پیوسته قابل بررسی است، مانند این که چگونه یک ناپایداری منجر به رفتار جمعی ذرات و نهایتاً گذار فاز می شود یا این که چگونه تغییر ماکروسکوپی به یک برانگیختگی (آشفتگی) از ذرات بستگی دارد.

در گذارهای فاز رایج این برانگیختگی معمولاً به وسیله‌ی دما اعمال می شود. در مثال ما برانگیختگی، شامل انرژی جنبشی ذراتی است که به وسیله‌ی یک بلندگو به حرکت در می آیند. تغییر ماکروسکوپی متناظر با گذار فازی که ما در اینجا مطالعه می‌کنیم این است که ذرات در یک نیمه‌ی استوانه‌ای قرار گیرند که با دیوار کوچکی از نیمه‌ی دیگر جدا شده است.

با افزایش دامنه از وضعیتی که ذرات در یک نیمه استوانه توزیع شده‌اند به وضعیتی می‌رسیم که ذرات به طور مساوی در دو نیمه توزیع می‌شوند. این امر متناظر با دادن گرما به سیستم و عبور از دمای بحرانی است.

هدف، تعیین نمای بحرانی برای گذار فازی است که در اینجا مشغول مطالعه‌ی آن هستیم.

لیست وسایل



شکل ۲: تجهیزات خاص برای این آزمایش.

۱. بلندگویی که یک استوانه‌ی پلاستیکی بر روی آن نصب شده است.

۲. حدود ۱۰۰ دانه خشخاش یا مهره کوچک (در یک ظرف پلاستیکی)

۳. یک دستکش

۴. نوار چسب

احتیاط مهم

- نیروی جانبی (افقی) به استوانه‌ی پلاستیکی روی بلندگو وارد نکنید. توجه داشته باشید غشاء روی بلندگو یا استوانه پلاستیکی پاره نشود زیرا جایگزینی در اختیار شما قرار داده نمی‌شود.

Experiment
persion (Iran)

Q2-3

- بلندگو را زمانی که از آن استفاده نمی‌کنید خاموش کنید تا از مصرف غیر ضروری باتری جلوگیری شود.
- در این آزمایش، یک سیگنال دندانه اره‌ای $4\ \mathrm{Hz}$ به وسیله‌ی یک منبع تولید سیگنال به بلندگو اعمال می‌شود.
- دامنه‌ی سیگنال دندانه اره‌ای با استفاده از پیچ تعبیه شده روی پتانسیومتر که با برچسب amplitude speaker مشخص شده (شماره ۴) قابل تنظیم است. یک ولتاژ DC که متناسب با دامنه‌ی سیگنال است بر روی صفحه نمایشی که (از طریق سوکت مانیتور - شماره ۶) متصل به amplitude speaker است، (نسبت به سوکت زمین GND - شماره ۷) قابل خواندن است. شماره‌های مذکور (۶ و ۷) در شکل ۲ دستورالعمل کلی مشخص شده‌اند.
- غشاء بلندگو ظریف است. مواظب باشید فشار افقی یا عمودی زیاد به آن وارد نکنید

قسمت A. دامنه‌ی برانگیختگی بحرانی (۳/۳ نمره)

قبل از این که اهداف آزمایش را شروع کنید، سیم بلندگو را به پایانه‌های جانبی مولد سیگنال وصل کنید. مطمئن شوید که قطب‌های مثبت و منفی را درست می‌بندید. تعدادی دانه‌ی خشخاش، مثلاً ۵۰ تا، را داخل استوانه نصب شده روی بلندگو بریزید و با استفاده از یک تکه از دستکش، بالای استوانه را ببندید تا دانه‌ها از استوانه بیرون نریزند. با استفاده از کلید خاموش و روشن، دستگاه را روشن کنید تا دانه‌ها شروع به جهش کنند و سپس با چرخاندن پیچ پتانسیومتر که با برچسب amplitude speaker (شماره ۴) مشخص شده به وسیله‌ی یک پیچ‌گوشتی، دامنه را تنظیم کنید. جمع شدن دانه‌ها در یک نیمه را با تغییرات دامنه مشاهده کنید.

هدف اول تعیین دامنه‌ی برانگیختگی بحرانی این گذار است. برای این منظور شما باید تعداد دانه‌ها، N_1 و N_2 (به نحوی که $N_1 \leq N_2$)، در دو بخش استوانه را به عنوان تابعی از دامنه‌ی جابجایی A_D تعیین کنید، که A_D همان ولتاژ اندازه‌گیری شده در (سوکت شماره ۶) speaker amplitude است. این ولتاژ متناسب با دامنه‌ی سیگنال دندانه اره‌ای داده شده به بلندگو است. حداقل ۵ اندازه‌گیری به ازای هر ولتاژ انجام دهید.

راهنمایی:

- برای این که همواره ذرات در حال حرکت برای مطالعه داشته باشید دامنه‌های متناظر با ولتاژهای بیشتر از $0.7\ \mathrm{V}$ روی speaker amplitude را بررسی کنید. آزمایش را ابتدا با مشاهده‌ی رفتار سیستم در اثر تغییرات اندک ولتاژ و بدون شمارش مهره‌ها شروع کنید. ممکن است بعضی از مهره‌ها به دلایل الکترواستاتیکی به کف استوانه چسبیده باشند، آن‌ها را در شمارش به حساب نیاورید.

A.1	اندازه‌گیری‌های خود از تعداد ذرات N_1 و N_2 در هر یک از دو نیمه‌ی ظرف را به ازای دامنه‌های مختلف A_D در جدول A.1 ثبت کنید.	1.2pt
A.2	انحراف معیار مربوط به اندازه‌گیری‌های N_1 و N_2 را محاسبه و نتایج را در جدول A.1 لیست کنید. نمودار N_1 و N_2 را به عنوان تابعی از دامنه‌ی A_D نشان داده شده روی صفحه نمایش، به همراه خطای هر یک (در نمودار A.2) رسم کنید.	1.1pt
A.3	از روی نمودار، دامنه‌ی بحرانی $A_{D,\mathrm{crit}}$ را که در آن $N_1 = N_2$ تعیین نمایید، صبر کنید تا یک حالت پایا حاصل شود.	1pt

قسمت B. زینه بندی (کالیبراسیون) (۳/۲ نمره)

دامنه‌ی A_D نشان داده شده روی صفحه نمایش متناظر با ولتاژ اعمالی به بلندگو است. اما کمیت فیزیکی جالب، بیشینه‌ی جابجایی نوسان بلندگو، A، است، زیرا این کمیت است که نشان می‌دهد دانه‌ها با چه قدرتی برانگیخته شده‌اند. در نتیجه نیاز به کالیبره کردن دامنه‌ی نشان داده شده روی صفحه نمایش داریم. برای این منظور می‌توانید از هر یک از مواد یا وسایلی که در اختیار شماست استفاده کنید.

B.1	طرحی از روش آزمایشی که از آن برای اندازه‌گیری دامنه‌ی برانگیختگی استفاده می‌کنید بکشید، منظور بیشینه فاصله، A (بر حسب mm است که بلندگو در یک دوره تناوب جابجا می‌شود).	0.5pt
B.2	دامنه‌ی A را بر حسب mm با استفاده از تعداد مناسبی نقطه تعیین کنید، یعنی دامنه‌ی A را به عنوان تابعی از دامنه‌ی A_D نشان داده شده روی صفحه نمایش در جدول B.2 ثبت کنید و خطای اندازه‌گیری‌ها را تعیین کنید.	0.8pt
B.3	نمودار داده‌ها را به همراه خطای آن‌ها در نمودار B.3 رسم کنید.	1.0pt
B.4	پارامترهای منحنی حاصله را با استفاده از برازش مناسب تعیین کنید و A را به عنوان تابعی از A_D بنویسید.	0.8pt

B.5	دامنه‌ی برانگیختگی بحرانی A_{crit} دانه‌های خشخاش را تعیین کنید.	0.1pt

قسمت C. نمای بحرانی (۳/۵نمره)

در سیستم ما، دما متناظر با انرژی جنبشی حاصل از برانگیختگی است. این انرژی متناسب با مربع سرعت بلندگو است، یعنی $v^2 = A^2 f^2$، که f بسامد نوسان است. ما می‌خواهیم این بستگی را بیازماییم و نمای b در رابطه‌ی توانی حاکم بر رفتار پارامتر نظم را تعیین کنیم (معادله‌ی ۱ را ببینید).

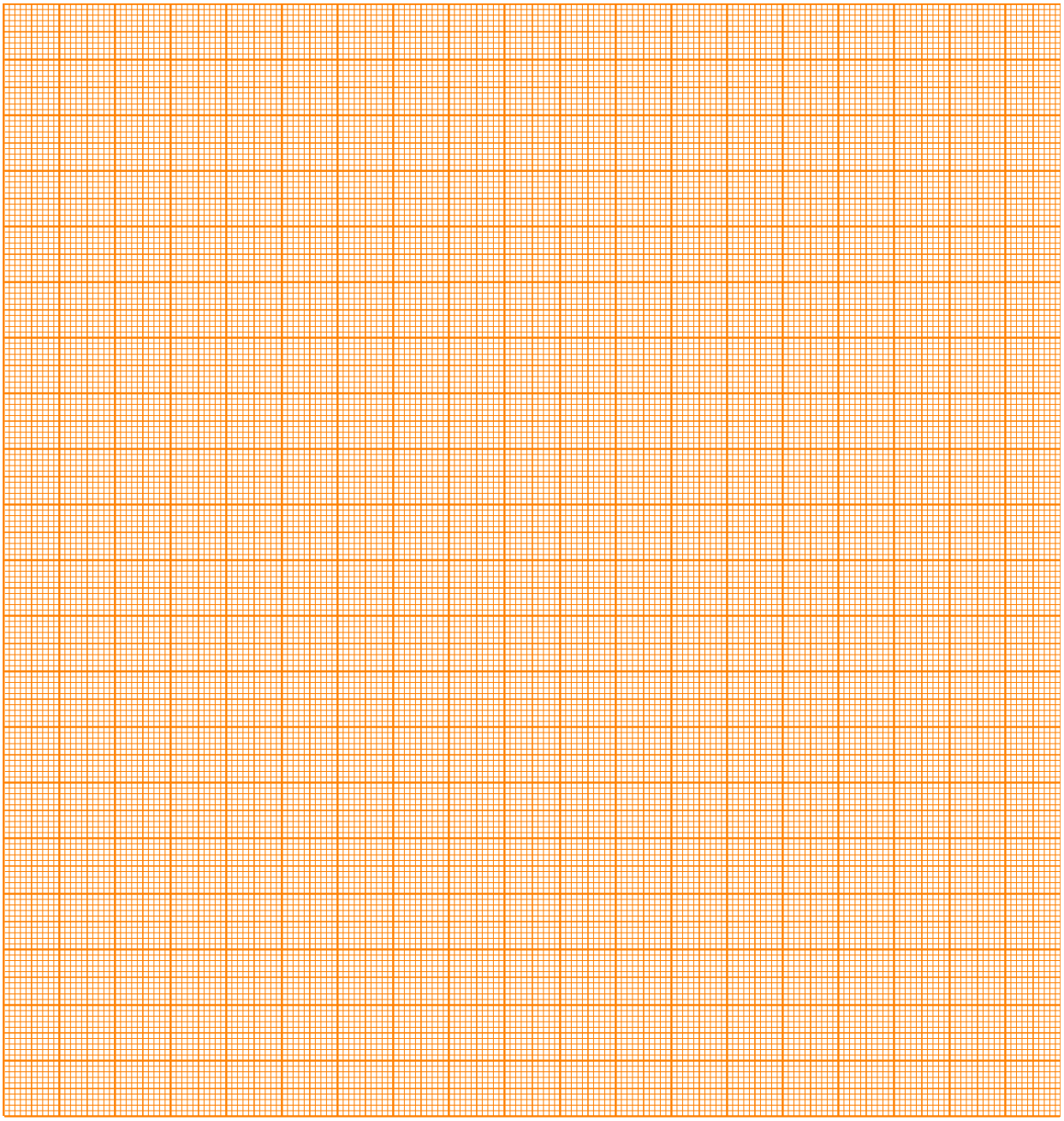
C.1	عدم توازن، $\left\lvert\frac{N_1-N_2}{N_1+N_2}\right\rvert$ ، کاندید خوبی برای پارامتر نظم در سیستم ما است، چرا که بالای دامنه‌ی بحرانی صفر و در برانگیختگی‌های پایین برابر ۱ است. این پارامتر نظم را به عنوان تابعی از دامنه A تعیین کنید. نتایج را در جدول C.1 ثبت کنید.	1.1pt

C.2	عدم توازن، $\left\lvert\frac{N_1-N_2}{N_1+N_2}\right\rvert$، را به عنوان تابعی از $\left\lvert A^2 - A_{\mathrm{crit}}^2 \right\rvert$ در نمودار C.2 که هر دو محور آن دارای مقیاس لگاریتمی است رسم کنید. می‌توانید از جدول C.1 برای محاسبات استفاده کنید. ممکن است به نظر برسد که نقاط روی نمودار رفتار خطی ندارند، لکن یک رگرسیون خطی باید انجام شود تا با فرمول نمای بحرانی همخوانی داشته باشد.	1pt

C.3	نمای بحرانی b را تعیین و خطای آن را برآورد کنید.	1.4pt

(1.0 pt) **A.1**

(1.0 pt) **A.2**

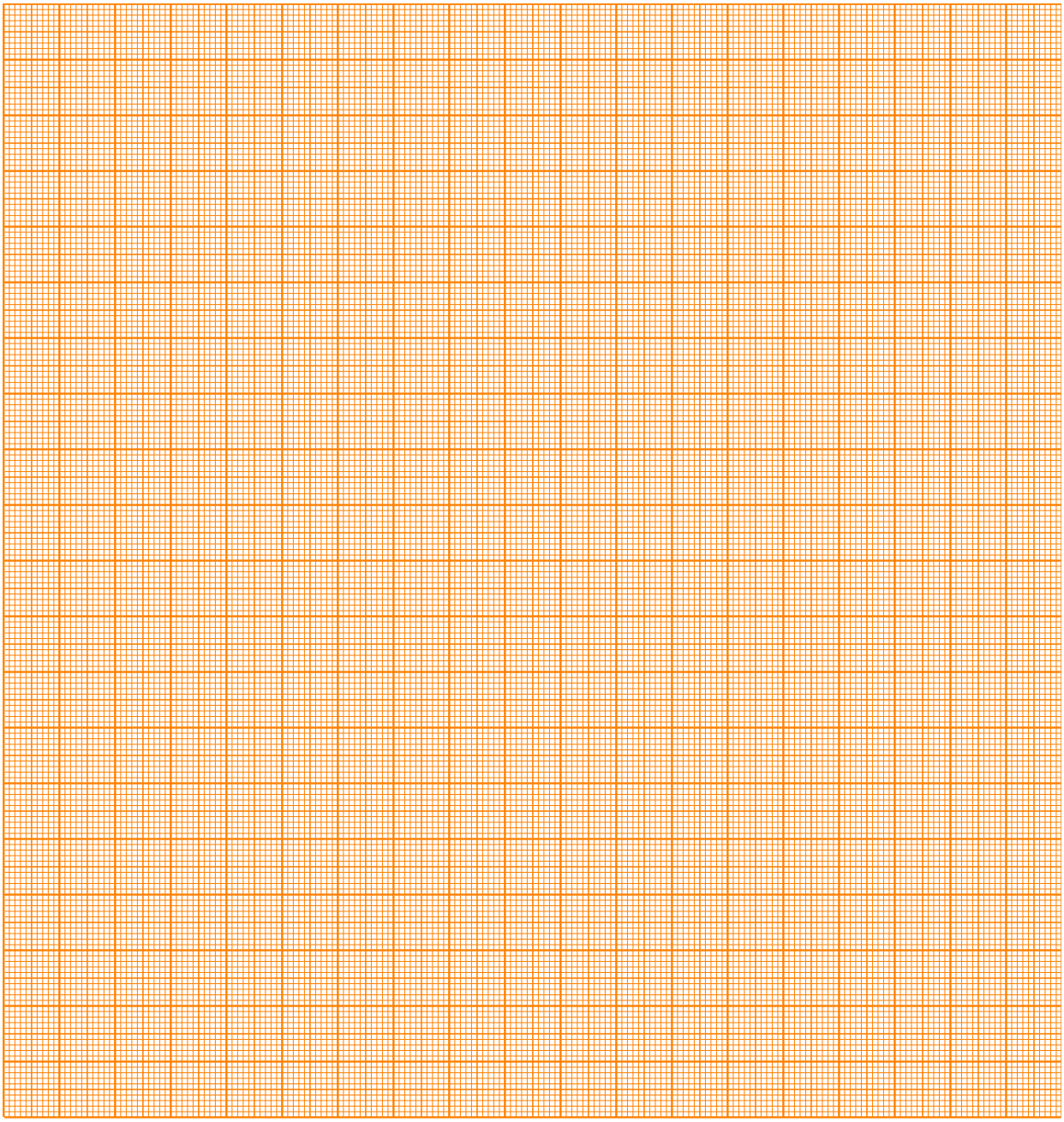


(1.0 pt) **A.3**

(0.5 pt) **B.1**

(0.8 pt) **B.2**

(0.5 pt) **B.3**



(0.6 pt) **B.4**

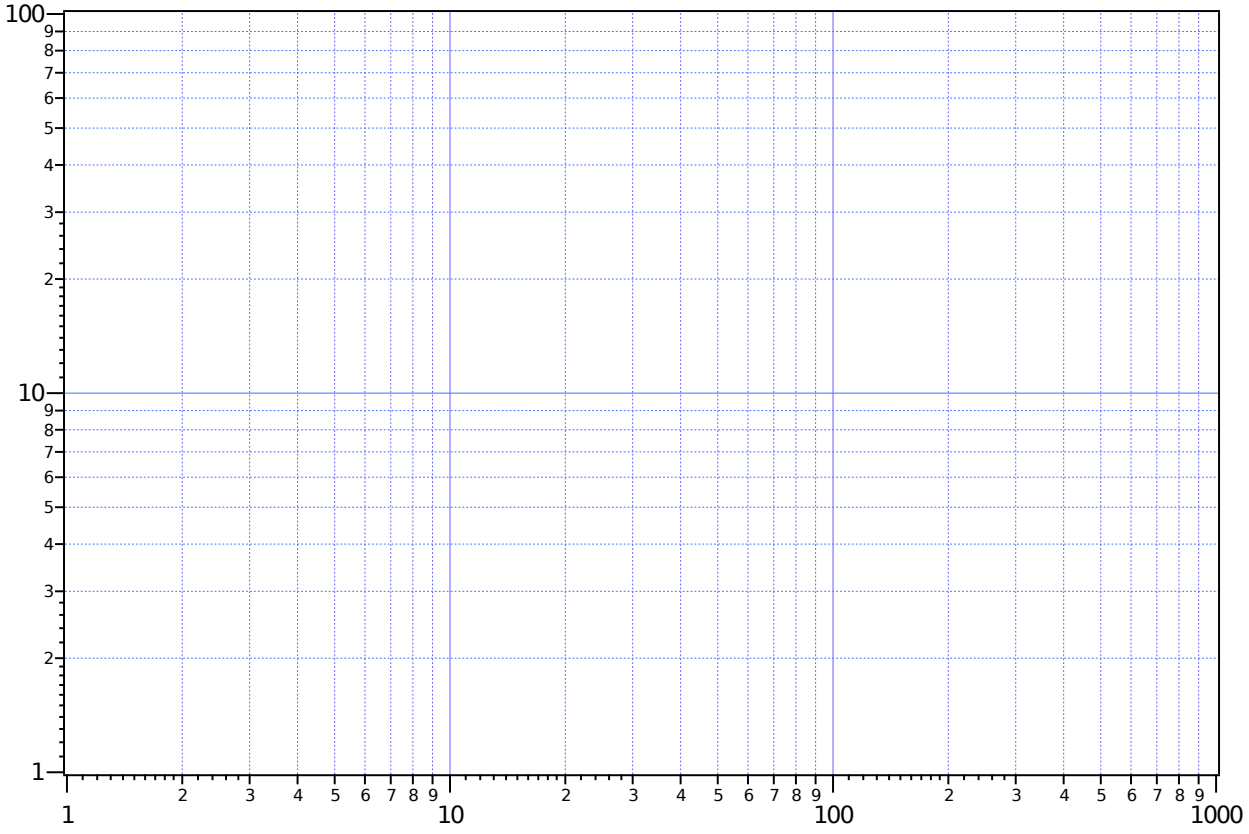
(0.1 pt) **B.5**

Experiment
persion (Iran)

A2-5

(0.5 pt) **C.1**

(1.0 pt) **C.2**



(1.0 pt) **C.3**

(0.8 pt) **D.1**

(0.5 pt) **D.2**

(0.2 pt) **D.3**

(0.5 pt) **D.4**

Problem 2 : Solution – Jumping Beads - a model for phase transitions and instabilities *(10 points)*

Part A. Critical driving amplitude (3.3 points)

A1 (1.2 pts)

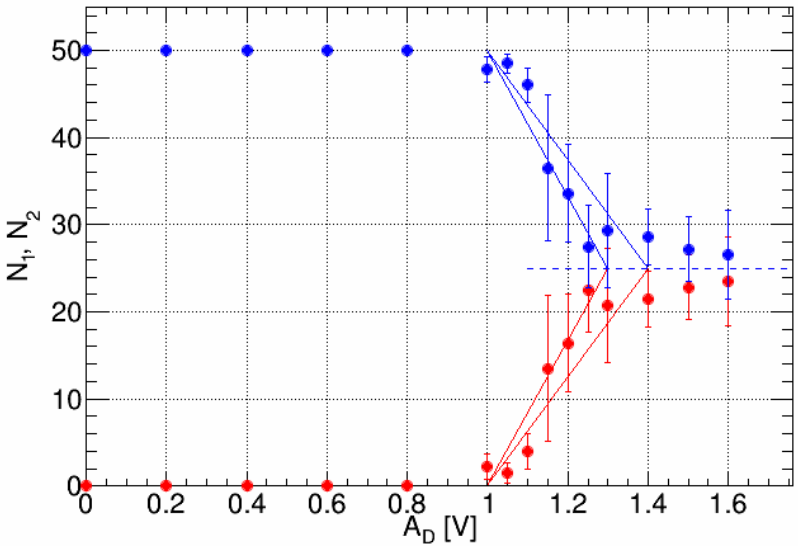
Total number of seeds: $N_0 = 50$.

Number of readings: $n = 6$.

A_D, [V]	N_1						$\bar{N}_1 = \frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n} N_1^i$	$\bar{N}_2 = N_0 - \bar{N}_1$	$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1}^{n}(N_i - \bar{N})^2}{n-1}}$	SE $= \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
1.00	1	5	2	1	2	2	**2.2**	**47.8**	**1.5**	**0.6**
1.05	1	0	2	3	1	2	**1.5**	**48.5**	**1.1**	**0.5**
1.10	4	4	1	7	3	5	**4.0**	**46.0**	**2.0**	**0.8**
1.15	26	5	18	7	18	7	**13.5**	**36.5**	**8.4**	**3.4**
1.20	13	16	27	12	17	13	**16.4**	**33.7**	**5.6**	**2.3**
1.25	26	28	22	22	14	23	**22.5**	**27.5**	**4.8**	**2.0**
1.30	27	24	8	22	22	21	**20.7**	**29.3**	**6.6**	**2.7**
1.40	22	18	17	23	23	25	**21.4**	**28.7**	**3.2**	**1.3**
1.50	19	27	27	24	19	21	**22.8**	**27.2**	**3.7**	**1.5**
1.60	27	15	23	23	23	30	**23.5**	**26.5**	**5.1**	**2.1**

Plot the data in the graph A2.

A2 (1.1 pts)



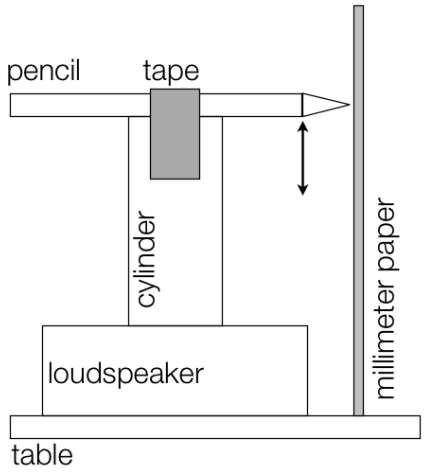
Error bars represent either standard deviation (σ) or standard error (SE).

A3 (1.0 pts)

$A_{D,\text{crit}} = (1.25 \pm 0.05)$ V

Part B. Calibration (3.2 points)

B1 (0.5 pts)

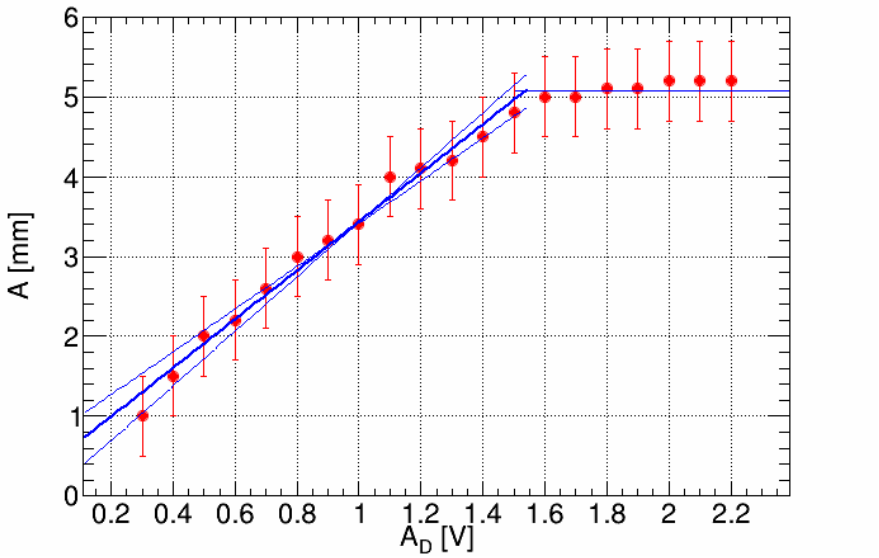


B2 (0.8 pts)

A_D [V]	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1
A [mm]	1.0	1.5	2.0	2.2	2.6	3.0	3.2	3.4	4.0	4.1	4.2	4.5	4.8	5.0	5.0	5.1	5.1	5.2	5.2

Instrumental error ± 0.5 mm.

B3 (1.0 pts)



B4 (0.8 pts)

$A = k_0 + k_1 \times A_D$,
where:
$k_0 = 0.2$ [mm], $k_1 = 3.1$ [mm/V]

B5 (0.1 pts)

$A_{\text{crit}} = (4.4 \pm 0.1)$ mm

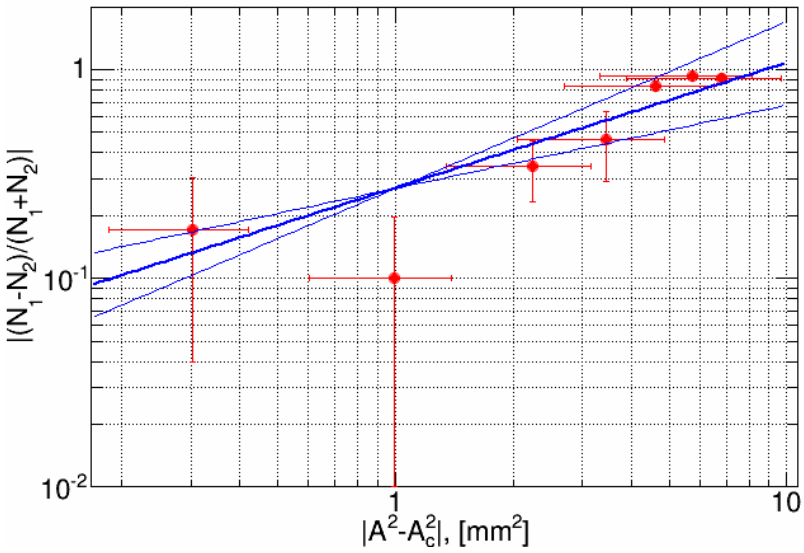
Part C. Critical exponent (3.5 points)

C1 (1.1 pts)

A_D, [V]	A, [mm]	$\lvert\frac{N_1-N_2}{N_1+N_2}\rvert$	$\lvert A^2 - A_0^2\rvert$
1.00	3.5	0.91	6.8
1.05	3.6	0.94	5.7
1.10	3.8	0.84	4.6
1.15	3.9	0.46	3.5
1.20	4.1	0.35	2.2
1.25	4.2	0.10	1.0
1.30	4.4	0.17	0.3
1.40	4.7	0.15	
1.50	5.0	0.09	
1.60	5.3	0.06	

Plot the data in the graph C2.

C2 (1.0 pts)



C3 (1.4 pts)

$y = a \cdot x^b$, where $x = |A^2 - A_0^2|$, $y = |\frac{N_1-N_2}{N_1+N_2}|$.

Critical exponent $b = 0.6 \pm 0.2$.