

فیزیک الکتریسیته و مغناطیس

فصل پنجم: ویژگی های الکتریکی مواد مختلف

حسین شناور

گروه فیزیک، دانشکده علوم



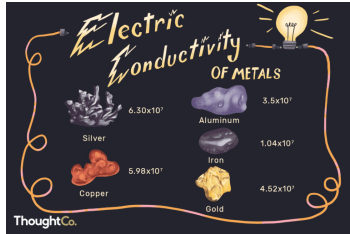
دانشگاه هرمزگان

- این مجموعه درس در ایام همه گیری کرونا در بهار سال ۱۳۹۹ و با سرعتی بیش از حد معمول تهیه شده است؛ بنابراین، امکان وجود اشتباهات در این ارائه وجود دارد.
 - خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:
- h.shenavar@gmail.com
- از همکاران محترم در دانشگاه صنعتی قوچان که با تلاش بسیار امکان ارائه آنلاین این مجموعه درس را فراهم آورده اند، سپاسگزارم.

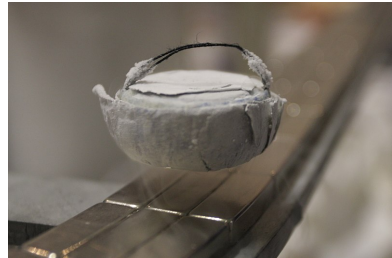
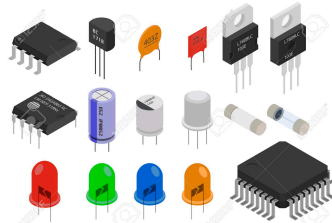
۱ فصل پنجم: ویژگی های الکتریکی مواد مختلف

- انواع مواد از نظر رسانندگی الکتریکی
- نگاهی دقیق تر به رساناها

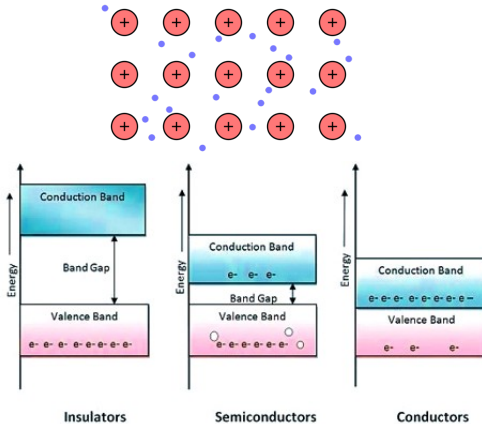
مواد مختلف رسانندگی های الکتریکی متفاوتی از خود نشان می دهند.



شکل ها از نت.



ساختار ریزمقیاس مواد مسئول تفاوت در رفتار الکتریکی آنهاست.



۱ تفاوت در ویژگی های الکتریکی مواد مختلف مربوط به اختلاف در ساختار ریزمقیاس آنهاست.

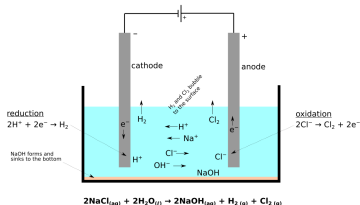
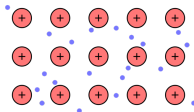
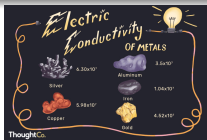
۲ منظور از ساختار ریزمقیاس، ساختار اتمی-مولکولی و شیوه قرار گرفتن اتم ها و مولکول ها در کنار هم است.

۳ در حالت کلی، هرچقدر تعداد حامل های بار (معمولاً الکترون) در ماده مورد نظر بیشتر باشد، رسانندگی بیشتر است.

۴ در محلول های الکترولیت، یون ها وظیفه انتقال الکتریسته را برعهده دارند.

شکل از: qsstudy.com

رساناها



شکل ها از نت.

رساناها: مانند بسیاری از فلزات (شکل مقابل، بالا).

در بسیاری از فلزات، هر اتم یک یا دو الکترون از تراز ظرفیت خود را به ساختار فلز می دهد (شکل مقابل، وسط).

این الکترون ها، مانند ذرات گاز، تقریباً آزاد هستند و به آنها دریای الکترون های فلز گفته می شود. اینجا را کلیک کنید.
هسته های فلز در جای خود ثابت، ولی در حال ارتعاش هستند.

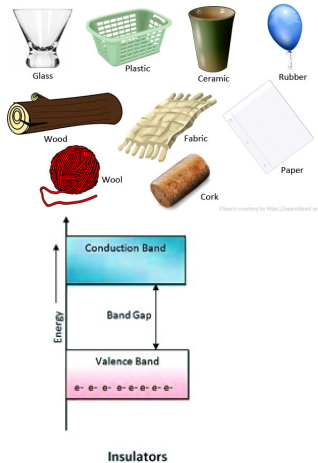
اگر رسانا در میدان الکتریکی قرار بگیرد، آنگاه حامل های بار در رسانا تحت تاثیر میدان قرار می گیرند.

مثلاً، در فلزات حامل های بار (الکترون ها) در خلاف جهت میدان به حرکت در می آیند، زیرا $\vec{F} = q\vec{E}$.

محلول های یونی هم رسانای خوب الکتریسیته هستند (شکل مقابل، پایین).

منبع انیمیشن ها: <http://weelookang.blogspot.com/>

نارساناها



شکل ها از نت.

نارساناها: مانند پلاستیک، شیشه، سرامیک و ...

در این مواد اختلاف انرژی بین تراز ظرفیت و تراز رسانش به حدی زیاد است که در شرایط عادی (دما و ...) امکان رسانش وجود ندارد.

به عبارت دیگر الکترون های نارسانا به شدت به ساختار اتمی آن مقیدند و بنابراین تعداد حامل های بار آزاد کم است.

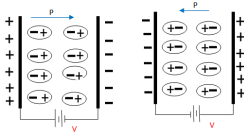
با این وجود رسانش حتی در این مواد هم می تواند تحت شرایط خاصی رخ دهد.

جایزه نوبل شیمی سال ۲۰۰۰: رسانندگی الکتریکی در پلیمرها.

نارساناها در مقابل میدان الکتریکی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند.

فروالکتریک: اگر یک ماده فروالکتریک در میدان الکتریکی قرار گیرد، جهت قطبش مولکول ها حتی پس از حذف میدان هم حفظ خواهد شد.

نارساناها



مولکول های موجود در برخی نارساناها جهت دوقطبی دائمی دارند. هرچند، به این دلیل که این دوقطبی ها در جهت های تصادفی قرار گرفته اند، نارسانا در شرایط عادی خاصیت الکتریکی از خود بروز نمی دهد.

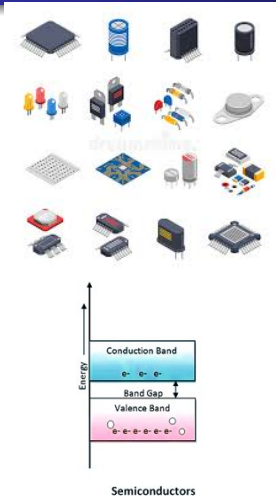
نارساناها در مقابل میدان الکتریکی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند. مثلاً، اگر مولکول های رسانا دوقطبی باشند، در اثر اعمال میدان همراه می شوند. شکل مقابل، بالا.

فروالکتریک: اگر یک ماده فروالکتریک در میدان الکتریکی قرار گیرد، جهت قطبش مولکول ها حتی پس از حذف میدان هم حفظ خواهد شد.

فروشکست دی الکتریک: اگر نارسانا (دی الکتریک) در یک میدان الکتریکی بسیار قوی قرار گیرد، میدان مورد نظر می تواند مولکول های نارسانا را یونیزه کرده و جریان الکتریکی را در نارسانا برقرار کند. این پدیده را فروشکست دی الکتریک می نامند. دو شکل پایین را ببینید.

شکل ها از نت.

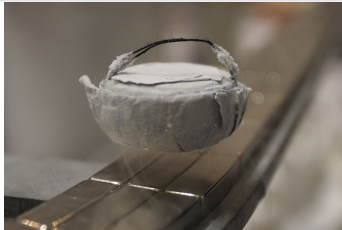
نیم رساناها



شکل ها از نت.

- نیم رساناها: مانند سیلیسیوم و ژرمانیوم.
- فاصله تراز رسانش و ظرفیت در نیم رساناها کمتر از نارساناهاست.
- از بین هر 10^{10} تا 10^{12} اتم ممکن است فقط یکی از آنها در رسانش مشارکت کند. این عدد بسیار کوچکی در مقابل رساناهاست، ولی به هرحال در مقایسه با نارساناها بسیار بزرگ است.
- از نیم رساناها برای ساخت قطعاتی مانند دیود، ترانزیستور، آی سی و ... استفاده می شود.
- برای توضیحات مفصل تر درباره نیم رساناها به جلد چهارم فیزیک هالیدی مراجعه کنید.

ابر رساناها



شکل از نت.

ابر رساناها: حتی بهترین رساناها هم از خود مقاومت نشان می دهند. ولی مواد خاصی وجود دارند که در دماهای پایین (نزدیک به صفر کلوین) مقاومت الکتریکی دقیقاً برابر با صفر دارند به این خاصیت ابر رسانایی می گویند.

ابرسانایی برای مواد بسیاری، از جمله قلع و آلومینیوم، گزارش شده است ولی تاکنون برای طلا و نقره مشاهده نشده است. همچنین پدیده ابرسانایی در فلزات فرومغناطیس هم دیده نشده است.

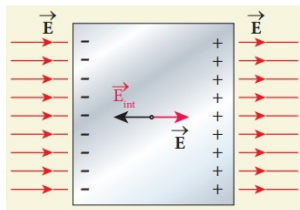
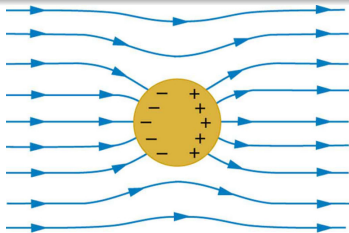
دمای پایین ابرسانایی استفاده تکنولوژیک از آن را مشکل ساخته است.

کشف ابرسانایی دمای بالا (۹۰ کلوین) در سال ۱۹۸۶.

برای دیدن یک پدیده بسیار جالب ابر رسانایی اینجا را کلیک کنید.
این پدیده آهنربای معلق روی یک ابرسانای سرد شده توسط نیتروژن مایع، تحت تأثیر اثر مایسنر، را نشان می دهد. منبع: www.supraconductivite.fr

فیزیک دانان هنوز هم موفق به یافتن توضیح جامعی برای پدیده ابرسانایی نشده اند.

رسانا در میدان الکتریکی - حالت استاتیک



شکل ها از نت.

اگر رسانا در یک میدان الکتریکی قرار گیرد، هر الکترون در ساختار رسانا تحت تاثیر نیروی $\vec{F} = -e\vec{E}$ قرار خواهد گرفت. در اثر این نیرو الکترون های آزاد جابه جا خواهند شد. الکترون ها به سمت چپ حرکت کرده و بنابراین سمت چپ رسانا (در شکل مقابل) دارای فزونی بار منفی خواهد شد. شکل مقابل (بالا) را ببینید. نبود الکترون در سمت راست را با بار مثبت نشان می دهیم.

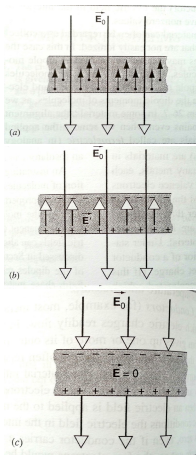
اگر الکترون ها نتوانند همچنان حرکت کنند، یعنی مداری که در اختیار آنها قرار دارد محدود باشد، در انتها متوقف خواهند شد. در این حالت می گوییم که حالت استاتیکی رخ داده است. حالت دینامیکی را در ادامه توضیح خواهیم داد.

توزیع بار ”القایی” یاد شده، خود میدانی را ایجاد خواهد کرد که آن را $\vec{E}_{int}$ می نامیم. جهت این میدان در خلاف جهت میدان خارجی است.

انتقال بار القایی به دوسر رسانا تا آنجا ادامه پیدا خواهد کرد که میدان کل در رسانا، بنا به قانون گوس، صفر شود:

$$\vec{E}_{tot} = \vec{E} + \vec{E}_{int} = \vec{0}$$

مثال



رسانای بسیار خوبی، مطابق شکل مقابل، عمود بر یک میدان خارجی ($E_0 = 10^6 \text{ N/C}$) قرار گرفته است. چگالی سطحی القایی در دو طرف رسانا را بیابید.

پاسخ: میدان الکتریکی خارجی باعث می شود که به صورت همزمان تجمعی از بارهای مثبت در پایین رسانا و تجمعی از بارهای منفی در بالای رسانا ایجاد شود. اندازه این بارها با هم برابر است. همچنین، اندازه میدان ایجاد شده توسط هر کدام از این بارهای القایی برابر است با (قانون گوس):

$$E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

که در آن σ چگالی سطحی بار است.

بنابه قانون گوس، اندازه میدان کل داخل رسانا (در حالت استاتیکی) باید صفر باشد. بنابراین

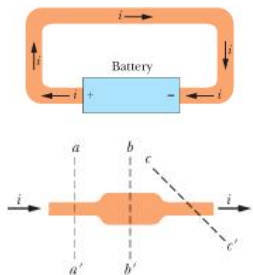
$$E_0 - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 0 \Rightarrow E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

و یا

$$\sigma = \epsilon_0 E_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

شکل ها از فیزیک هالیدی، ویرایش پنجم.

رسانا در میدان الکتریکی - حالت دینامیکی



شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش

دهم.

جریان الکتریکی جهت دارد، ولی اسکالر است!

جهت جریان، به صورت قراردادی، جهت حرکت بارهای مثبت است؛ هرچند، معمولاً بارهای منفی درحال حرکت هستند.

اگر الکترون هایی که تحت تاثیر میدان قرار گرفته اند بتوانند حرکت نامحدود خود را حفظ کنند (بر عکس مورد قبل) آنگاه می گوییم که حالت دینامیکی رسانا برقرار است. به عبارت دیگر جریان الکتریکی داریم.

میزان بار عبورکننده از هر مقطع سیم در واحد زمان را جریان الکتریکی می نامیم:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \text{or} \quad i \equiv \frac{dq}{dt}$$

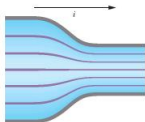
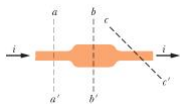
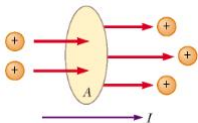
واحد جریان کولن بر ثانیه $A = C/s$ است که آن را آمپر می نامیم.

کل بار عبورکننده در یک زمان مشخص، مثل t_0 ، را می توان با انتگرال گیری از رابطه بالا به دست آورد:

$$q = \int_0^{t_0} i \, dt$$

بار عبوری از هر کدام از سه مقطع نشان داده شده در شکل برابر است با میزان بار عبوری از مقاطع دیگر.

رسانا در میدان الکتریکی - حالت دینامیکی



شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی،
ویرایش دهم.

می توان کمیتی برداری، به نام چگالی جریان، را تعریف کرد که اندازه آن برابر $j = i/A$ می باشد و جهت آن در جهت جریان است. در اینجا A مساحت مقطع رساناست. چگالی جریان عبارت از جریان در یکای سطح است.

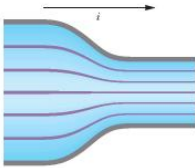
تعریف اخیر در حالت بسیار ساده ای که چگالی جریان در همه نقاط ثابت باشد و جهت آن با المان مساحت یکی باشد برقرار است. در حالت کلی، رابطه عمومی معرف چگالی جریان به صورت زیر است:

$$i = \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

که در آن $d\vec{A}$ المان مساحت مقطع رساناست.

در شکل مقابل واضح است که جریان عبوری از هر مقطع رسانا تغییری نمی کند، زیرا پایداری بار الکتریکی برقرار است. ولی چگالی جریان گذرنده از هر مقطع لزوماً معادل با چگالی جریان گذرنده از مقاطع دیگر نیست.

مثال



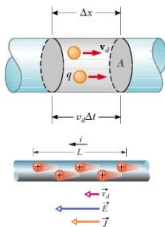
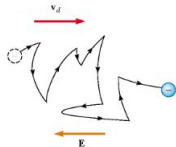
شکل از مبانی فیزیک هالیدی،
ویرایش هشتم.

یک انتهای یک سیم آلومینیومی به قطر 4 mm را به
سریک سیم مسی به قطر 2.8 mm وصل می کنیم. اگر
جریان عبوری برابر 3 A باشد، چگالی جریان در هر کدام
از سیم ها چقدر است؟

$$j_{Al} = \frac{i}{A_{Al}} = \frac{3}{\frac{1}{4}\pi(4/0 \times 10^{-3})^2} = 2.4 \times 10^5 \frac{A}{m^2}$$

$$j_{Cu} = \frac{i}{A_{Cu}} = \frac{3}{\frac{1}{4}\pi(2.8 \times 10^{-3})^2} = 4.8 \times 10^5 \frac{A}{m^2}$$

شارش حامل های بار از دید میکروسکوپی



در اثر اعمال میدان در یک رسانا، الکترون ها با سرعت بسیار زیاد در خلاف جهت میدان حرکت می کنند. هرچند، الکترون ها به دلیل برخورد های بسیار زیاد با شبکه بلور به جهت های تصادفی پرتاب می شوند. بنابراین، سرعت حرکت تجمعی الکترون ها در خلاف میدان الکتریکی، بسیار کوچکتر از سرعت حرکت تک تک آن هاست.

این سرعت موثر جریان را سرعت سوق v_d می نامیم.

برای رسانای شکل مقابل می توان نوشت:

$$j = \frac{i}{A} = \frac{q}{At} \quad t = \frac{L}{v_d}$$

همچنین $q = enAL$ بار کل موجود در این قطعه سیم است که در آن n تعداد الکترون ها بر واحد حجم است.

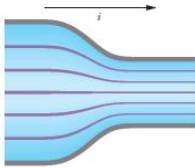
$$j = \frac{q}{At} = \frac{enAL}{AL/v_d}$$

و یا

$$\vec{j} = en\vec{v}_d$$

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی،
ویرایش هشتم.

مثال



● سوال: سرعت سوق را در سیم مسی در مثال قبل بیابید.

● پاسخ: برای پیدا کردن تعداد حامل های بار بر واحد حجم n از تناسب:

$$\frac{n}{N_A} = \frac{\rho_{Cu}}{M_{Cu}}$$

استفاده می کنیم. در اینجا ρ_{Cu} نشان دهنده چگالی مس و M_{Cu} جرم مولی آن است. بنابراین:

$$n = \frac{N_A \rho_{Cu}}{M_{Cu}}$$

$$= \frac{6.022 \times 10^{23} \frac{\text{electrons}}{\text{mol}} \times 8.96 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{63.5 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}$$

$$= 8.49 \times 10^{28} \frac{\text{electrons}}{\text{m}^3}$$

شکل از میانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.
بنابراین اندازه سرعت سوق برابر است با:

$$v_d = \frac{j}{ne}$$

$$= \frac{4.8 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}}{8.49 \times 10^{28} \frac{\text{electron}}{\text{m}^3} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{electron}}}$$

$$= 3.6 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید ویژگی های مهم رفتار الکتریکی مواد را بیان کنید. برای اینکار لازم است بتوانید به سوال های زیر پاسخ دهید:

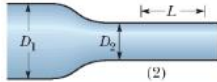
- ۱ تفاوت بین رساناها، نارساناها و نیم رساناها از لحاظ اختلاف ترازهای انرژی ظرفیت و رسانش چگونه است؟
- ۲ ابررساناها چه نوع موادی هستند؟
- ۳ القای بار در یک رسانا که در میدان الکتریکی قرار گرفته است چگونه رخ می دهد؟
- ۴ جریان و چگالی جریان را تعریف کرده و تعریف ریاضیاتی آنها را بنویسید.
- ۵ چرا سرعت سوق الکترون بسیار کوچکتر از سرعت حرکت کاتوره ای آنهاست؟

اگر درباره هرکدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفا درس را یک بار دیگر مرور کنید.

فراموش نکنیم که بهترین راه برای جذب مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوال زیر محک زده و تقویت کنید.



تمرین



شکل از مبانی فیزیک هالیدی، ویرایش هشتم.

جریان و شدت جریان:

در شکل مقابل جریانی به صورت یکنواخت از کابل عبور میکند. همچنین داریم: $D_1 = \frac{3}{5} D_2$. الف) اگر جریان ورودی از سمت راست برابر i باشد، جریان خروجی از سمت چپ چقدر است؟ چرا؟ ب) چگالی جریان J در سمت راست چند برابر چگالی جریان در سمت چپ است؟

مبحث بعدی: ادامه بررسی خواص الکتریکی مواد

- در جلسه بعد، جریان الکترون ها در رسانا را دقیق تر بررسی کرده و در ادامه تاثیر میدان الکتریکی بر رساناها را مطالعه خواهیم کرد.

مراجع

- ❶ Halliday, D., R. Resnick, and K. S. Krane. "Physics, 5th edn." (2002).
- ❷ Halliday, David, Robert Resnick, and Jearl Walker; Fundamentals of physics, 10th edn. John Wiley & Sons, 2014.
- ❸ Ohanian, Hans C., and John T. Markert. Physics for engineers and scientists, 3th edn. 2007.
- ❹ Young, Hugh D., Roger A. Freedman, and Albert Lewis Ford. Sears and Zeman-sky's university physics, 13th edn. Pearson education, 2006.

با سپاس از توجه شما

