آزمایش ترموالکتریک

هدف آزمایش:

مطالعه ترموالکتریک (اثر سیبک Seebeck و اثر پلتیر Peltier) مدرج کردن ترموکوپل‌ها.

مگنت ترموالکتریک، ترموکوپل با عربه مغناطیسی.

وسایل آزمایش:

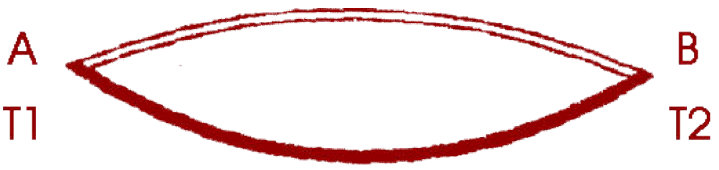
ترموکوپل‌های(مس- کنستانتان، آهن- کنستانتان، کرم نیکل- کنستانتان)، ترموکوپل با عقربه مغناطیسی، مگنت ترموالکتریک، ترمومتر (۲ عدد)، چراغ بنزن، سه پایه ، توری نسوز، جک آزمایشگاهی، بشر ۴۰۰ml(۲عدد)، پایه Vشکل بزرگ(۳ عدد)، گیره حلقه‌دار (۲ عدد)، گیره چند منظوره(۴ عدد)، گیره چنگکدار (۲عدد)، منبع تغذیه DC ، ۵ A-۰و۱۵ V-۰، میکروولتمتر، سیم ترموکوپل(Cu،Cons،Ni Cr)

کالریمتر(۲ عدد)،میله (۳ عدد)،سیم گیره سوسماری(۲عدد)،سیسم رابط معمولی ۱۰۰cm (۲عدد) ،سیم BNC فیشدار (۱عدد)

ملاحظات نظری:

آثار ترموالکتریک شامل اثر سیبک، اثر پلیتر و اثر تامسون، اثر گالوانر مغناطیسی، اثر اتینگزهاوزن (Ettingshausen) و اثر نرنست Nernst می‌باشد. برخی از این آثار کاربردهای وسیعی پیدا کرده‌اند لذا مطالعه آنها نه تنها آموزنده است بلکه از نظر کاربردی جالب توجه می‌باشد.

اثر سیبک Seebeck effect: در سال ۱۸۲۲ میلادی سیبک (T.J.Seebeck) دریافت که در مداری که شامل دو قطعه رسانای ۱ و ۲ از دو مادهٔ مختلف که در دو انتهای A و B به یکدیگر متصل و این دو انتها در دو دمای متفاوت T_1 و T_2 قرار گرفته‌اند نیروی محرکهٔ (V_T) ایجاد می‌گردد. به شکل ۱۲ نگاه کنید.



شکل ۱۲:

این نیروی محرکه (V_T)، نیروی محرکهٔ گرمائی Thermal e.m.f نامیده می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در فواصل محدود دمائی، V_T با اختلاف دمای بین نقاط A و B متناسب است.

$$V_T = \alpha(T_1 - T_2)$$

ضریب تناسب $\alpha = \frac{dV_T}{dt}$، شیب و یا ضریب ویژهٔ توان ترموالکتریکی نامیده می‌شود که به جنس رساناها و دما بستگی دارد.

برای نیروی محرکه گرمائی سه منشاء وجود دارد. جریان جهت‌دار حامل‌های بار رسانا در اثر وجود شیب (گرادیان) دما (مؤلفهٔ حجمی V_V)، تغییر مکان تراز فرمی (مؤلفهٔ اتصالی V_j) و کشش الکترون‌ها توسط فونون‌ها (اثر کشش فونونی).

الف) مؤلفهٔ حجمی نیروی محرکه گرمائی V_V:

فرض می‌کنیم که اختلاف دمای ($T_2 - T_1$) به دو سر یک رسانای یکنواخت AB اعمال شده است لذا یک گرادیان دمای $\frac{dt}{dx}$ در امتداد B به A وجود دارد. حاملان شدت جریان در انتهای گرم آن دارای انرژی جنبشی و لذا سرعت حرکتی بیشتری نسبت به حاملان انتهای سرد آن خواهند داشت. در نتیجه در داخل رسانا جریانی از این حاملان بار از انتهای گرم بطرف انتهای سرد آن جاری می‌گردد. در حالاتی که حاملان جریان الکترون‌ها باشند، انتهای سرد، تجمعی از بارهای منفی، و انتهای گرم، بار مثبت خواهد یافت و اختلاف پتانسیل V_V بین این دو انتها بوجود می‌آید که همان مؤلفهٔ حجمی نیروی محرکه گرمائی است. توان ترموالکتریک جزئی مربوطه به این مؤلفه:

$$\alpha_V = \frac{\partial V_V}{\partial T}$$

می‌شود که ممکن است بصورت زیر برآورد گردد. فشار گاز الکترونی در رسانا برابر است با:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E}$$

که $\bar{E}$ میانگین انرژی الکترون‌های رسانا و n تجمع آنهاست.

گرادیان دما منجر به یک گرادیان فشار می‌شود که با میدان الکتریکی حاصله ε در تقابل قرار می‌گیرد بطوریکه:

$$e \varepsilon n = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial T} . \frac{\partial T}{\partial x}$$

از آن α_V بسادگی حاصل می‌شود:

$$\alpha_V = \frac{\partial V_V}{\partial T} = \frac{\varepsilon \partial X}{\partial T} = \varepsilon (\frac{\partial T}{\partial X})^{-1} = \frac{1}{ne} \frac{\partial p}{\partial T}$$

قاعدتاً در رسانای نوع -n، جهت α_V از انتهای گرم بطرف انتهای سرد آن است. اگرچه استثناهائی وجود دارد که ذیلاً تشریح خواهد شد.

ب- مؤلفهٔ اتصالی نیروی محرک گرمائی V_j:

تغییر دما منجر به تغییر در مکان تراز فرمی Fermi می‌گردد. در رساناهای نوع -n در نمودار انرژی با باالا رفتن دما تراز فرمی نزول می‌کند و در این رسانا بایستی در انتهای سرد بالاتر از انتهای گرم آن باشد.

اختلاف مکان تراز فرمی برابر است با اختلاف پتانسیل:

$$dv_j - \frac{1}{e} \frac{\partial \mu}{\partial T}$$

و این همان مؤلفهٔ اتصالی نیروی محرکهٔ گرمائی است. توان ترموالکتریکی جزئی مربوط به این مؤلفه:

$$\alpha_j = -\frac{1}{e} \frac{\partial \mu}{\partial T}$$

و توان ترموالکتریک جزئی منتجه عبارتست از:

$$\alpha = \frac{1}{ne} \frac{\partial p}{\partial T} - \frac{1}{e} \frac{\partial \mu}{\partial T}$$

رابطه اخیر در خصوص انواع مختلف رساناها قابل کاربرد است.

توان ترموالکتریکی فلزات:

با قرار دادن انرژی میانگین الکترون‌های گاز الکترونی ایجاد شده از رابطهٔ:

$$\bar{E} = \frac{3}{5} E_f \left[1 + \frac{5\pi^2}{12} \left(\frac{k_B T}{E_f} \right)^2 \right]$$

که از وابستگی توزیع فرمی- دیراک به دما حاصل شده است، در رابطهٔ اخیر، می‌توان رابطهٔ زیر را برای فشار الکترونی فلز بدست آورد.

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{5} n E_f + \frac{\pi^2}{6 E_f} (k_B T)^2$$

با مشتق‌گیری از این رابطه نسبت به T و ضریب کردن آن در $\frac{1}{ne}$ داریم:

$$\alpha_V = \frac{k_B}{e} \frac{\pi^2}{3} \frac{k_B T}{E_f}$$

وابستگی تراز فرمی با دما در مورد فلزات از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$\mu = E_f \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{k_B T}{E_f} \right)^2 \right]$$

با مشتق‌گیری از آن نسبت به T و تقسیم کردن آن به e داریم:

$$\alpha_j = + \frac{\pi^2 k_B}{6e} \frac{k_B T}{E_f}$$

و لذا:

$$\alpha_m = \alpha_v + \alpha_j = \frac{\pi^2 k_B}{3e} \left(1 + \frac{1}{2} \right) \frac{k_B T}{E_f}$$

این رابطه متناسب بودن α با T را در مورد فلزات نشان می‌دهد که با آزمایش توافق کاملی دارد.

روش آزمایش:

آزمایش ۱: بشر را پر از آب کنید و آنرا روی توری و سه پایه قرار داده و چراغ بنزن را زیر آنها قرار دهید. دماسنج را توسط نخ محکمی طوری آویزان کنید که درون آن و تقریباً در وسط بشر قرار گیرد. یکی از ترموکوپل‌ها (مثلاً آهن- کنستانتان) را بردارید و دو سر آن را به میکروولتمتر متصل نمائید.

مثداری یخ به آب بشر اضافه نموده و صبر کنید تا دما به صفر درجه سلسیوس برسد در این لحظه میکروولتمتر را صفر کنید و جدولی مطابق جدول ذیل تهیه تا نتایج را در آن ثبت نمائید.

جدول ۵

	T(◦c)	V(mv)
۱	۰	۰
۲		
۳		
۴		
۵		

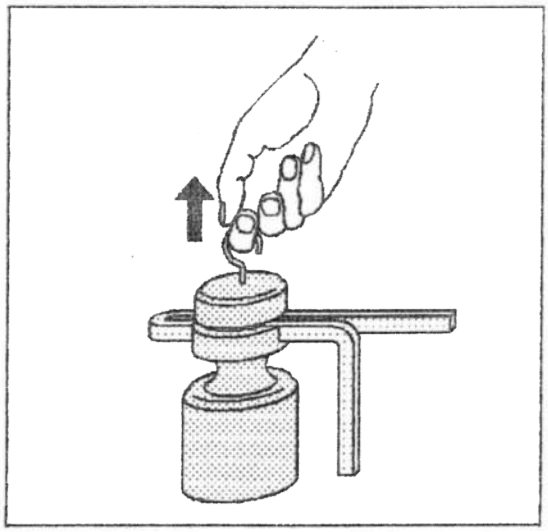
یخ‌های اضافی را از بشر خارج نموده و چراغ بنزن را روشن کنید تا آب گرم شود و سعی کنید شعله کم باشد تا بتوانید دما را کنترل کنید. آب بشر را هم بزنید تا یکنواخت بماند. چراغ بنزن را از زیر بشر دور کنید و پس از ثابت شدن دما، میزان دما و ولتاژ (نیروی محرکه گرمائی) را قرائت و در جدول درج نمائید. این کار را تا بالاترین دمای قابل دسترس (نزدیکی نقطه جوش آب) ادامه دهید.

برای دماهای بالاتر می‌توانید از روغن اتومبیل و اگر امکان داشته باشد از روغن سیلیکون استفاده نمایید.

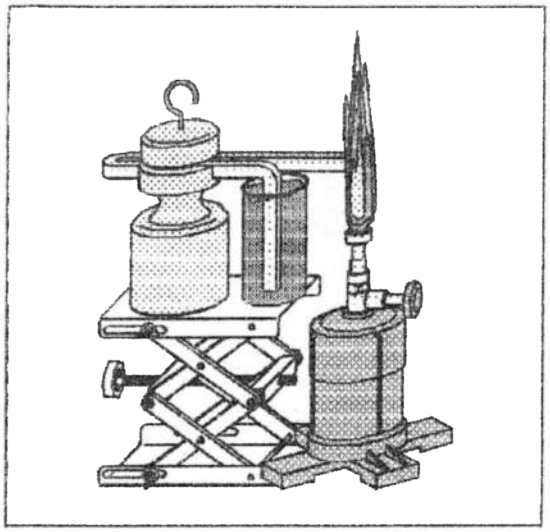
آزمایش مشابهی را برای سایر ترموکوپل‌ها انجام داده منحنی تغییرات نیروی محرکه گرمائی با دمای T را رسم و رابطه خطی آنها را مشاهده کنید.

آزمایش ۲: وزنهٔ مگنت ترموالکتریک را روی جک آزمایشگاهی قرار دهید. ترموکوپل مس- کنستانتان مخصوص آن را درون شیارهای مگنت قرار داده و قرص حلقه‌دار (قطب دوم آهنربا) را روی آن بگذارید و قطب مزبور را روی قطب اول ضمن اینکه می‌فشارید، به صورت دورانی حرکت دهید تا فاصله هوائی بین دو قطب تا حد ممکن کاهش یابد.

جک آزمایشگای را بالا ببرید بطوریکه ارتفاع آن بحدی برسد که شعله چراغ بنزن بتواند انتهای افقی ترموکوپل را دربرگیرد و بشر را مملو از آب سرد کرده و روی جک مطابق شکل (۲) طوری قرار دهید که قسمت اعظم انتهای قائم ترموکوپل داخل آب قرار گیرد.



شکل ۱۳: شکل ۳

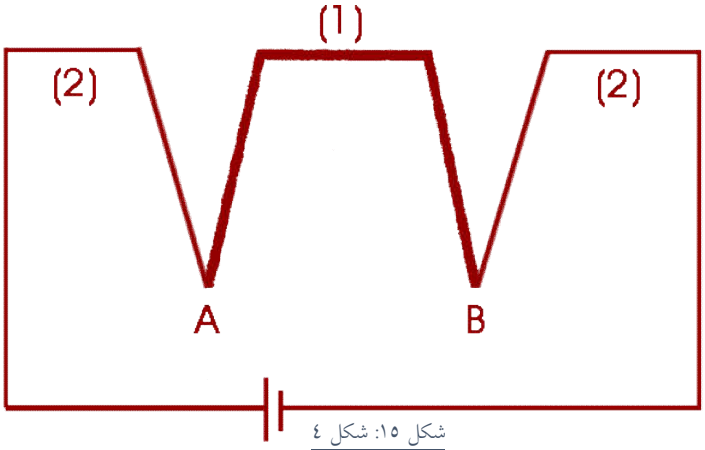


شکل ١٤ :شکل۲

چراغ بنزن را روشن کنید و شعله آن را به انتهای افقی ترموکوپل بگیرید و صبر کنید تا گرمای آن بخوبی به ترموکوپل منتقل شود. پس از حدود ۱۰ دقیقه حلقه قطب فوقانی را به آهستگی بالا بکشید. ملاحظه خواهید کرد که دو قسمت مگنت به یکدیگر چسبیده‌اند و در اثر عبور جریان شدید (حدود ۱۰۰ آمپر) از میله مسی (حلقه جریان ترموکوپل) بخش میانی وزنه، آهنربا شده و قرص آهنی را جذب نموده و نگه می‌دارد. اگرچه ولتاژ ایجاد

شده در ترموکوپل اندک است (حدود ۱۵mv) لیکن بعلت ناچیز بودن مقاومت ترموکوپل شدت جریان زیاد در آن ایجاد می گردد.

اثر پلتیر Peltier effect: فرض کنید شدت جریان I از مداری متشکل از دو رسانای ناهمسان (۱) و (۲) مطابق شکل (۴) می گذرد.



شکل ۱۵: شکل ٤

گرمای ژول ایجاد شده در محل‌های اتصال A و B از رابطهٔ $Q = RI^2t$ که در آن R مقاومت محل اتصال و t زمان عبور جریان است، بدست می‌آید. این گرمائی است که فقط در محل اتصال رساناهای مورد نظر تولید می‌شود وگرنه تفاوتی بین اتصال و سایر قسمت‌های رسانا وجود ندارد. در عین حال در نقاط اتصال مواد مختلف علاوه بر گرمای ژول، گرمای دیگری ایجاد و یا جذب می گردد، که بترتیب موجب گرم شدن و یا سرد شدن نقطه اتصال می‌شود. این پدیده برای اولین بار در سال ۱۸۳۴ میلادی توسط J.C.A. Peltier کشف گردید و به اثر پلتیر معروف است.

گرمای اضافی آزاد و یا جذب شده در محل اتصال، گرمای پلتیر Q_P نامیده می‌شود.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که Q_P متناسب با شدت جریان و مدت زمان عبور آن است.

$$Q_P = \Pi It$$

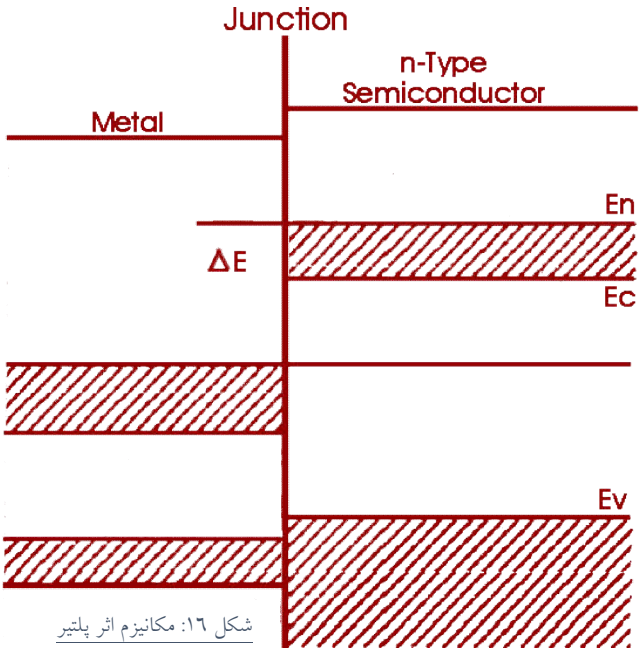
و ضریب تناسب Π، ضریب پلتیر نامیده می‌شود که مقدار آن بستگی به جنس مواد و دما دارد.

رابطهٔ مستقیمی بین آثار پلتیر و سی‌بک وجود دارد: اختلاف دما در مداری که شامل مواد متفاوت باشد ایجاد شدت جریان می کند و عبور شدت جریان از چنین مداری اختلاف دما بوجود می‌آورد. عامل ارتباطی این امر انرژی است.

تامسون (لردکلوین)، که مؤلف نظریه ترمودینامیکِ اثر ترموالکتریک است، نشان داد که:

$$\alpha = \frac{\Pi}{t} \qquad (a)$$

اثر پلتیر به اختلاف انرژی متوسط الکترون‌های رسانشی مواد ناهمسان مربوط می‌شود. به عنوان مثال، اتصال یک فلز با یک نیمه هادی نوع n- را مطابق شکل (۵) در نظر بگیرید.



شکل ۱۶: مکانیزم اثر پلتیر

شکل ۵- در این آرایهٔ، باند انرژی اتصال فلز- نیمه رسانا- مکانیسم اثر پلتیر را نشان می‌دهد. پس از رسیدنی به حالت تعادل، تراز فرمی آنها یکسان می‌شود. فقط الکترون‌های نزدیک‌تر از فرمی که میانگین انرژی آنها عملاً مساوی انرژی فرمی است در هدایت فلز مشارکت می کند.

میانگین انرژی الکترون‌ها در نیمه رسانا را با $\bar{E}n$ نشان می‌دهیم. این انرژی با انرژی گرمائی الکترون‌ها $(\frac{۳}{۲}k_BT)$ برابر نیست، زیرا در جریان الکتریکی، حرکت الکترون‌های سریع نقش عمده‌تری نسبت به الکترون-های کند دارد. محاسبه در مورد گاز الکترونی نشان می‌دهد که:

$$\bar{E}n = (r+۲)k_BT$$

که r توان رابطهٔ: $\lambda \alpha \bar{E}^{r}$ است که در آن λ مسیر آزاد متوسط الکترون با انرژی E می‌باشد.

تصور کنید که شدت جریان الکتریکی جاری در محل اتصال طوری است که الکترون‌ها از نیمه رسانا به فلز می‌روند. از شکل فوق می‌توان دید که هر الکترونی که از نیمه رسانا به فلز می‌رود یک انرژی اضافی به اندازهٔ:

$$\Delta E = \bar{E}n + (-\mu_n)$$

با خود حمل می‌نماید. این انرژی گرمای پلتیر است و در نزدیکی محل اتصال آزاد می‌گردد. وقتی که جهت شدت جریان عوض می‌شود، الکترون‌هائی که از فلز به نیمه هادی می‌روند، گرما را جذب نموده و محل اتصال را سرد می‌کنند. با تقسیم کردن ΔE به بار الکتریکی الکترون (e-) ضریب پلتیر حاصل می‌شود

$$\Pi_{mn} = -\frac{\Delta E}{e} = -\frac{1}{e}(\bar{E}n - \mu_n)$$

با قرار دادن مقدار μ از رابطه:

$$\mu = k_B T \ln\left[\frac{N}{V}\left(\frac{h^2}{2\pi m k_B T}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$$

و نیز مقدار $\bar{E}n$ در رابطه فوق داریم:

$$\Pi_{mn} = -\frac{k_B T}{e}\left[(r+2) + \ln\frac{2(2\pi m_n k_B T)^{\frac{3}{2}}}{nh^3}\right]$$

رابطه مشابهی نیز برای محل اتصال در خصوص فلز و نیمه هادی نوع P- بدست می‌آید:

$$\Pi_{mp} = -\frac{k_B T}{e}\left[(r+2) + \ln\frac{2(2\pi m_n k_B T)^{\frac{3}{2}}}{ph^3}\right]$$

در مورد اتصال دو فلز، ضریب پلتیر با استفاده از رابطه (α) داریم:

$$\Pi_{1,2} = (\alpha_1 - \alpha_2)T$$

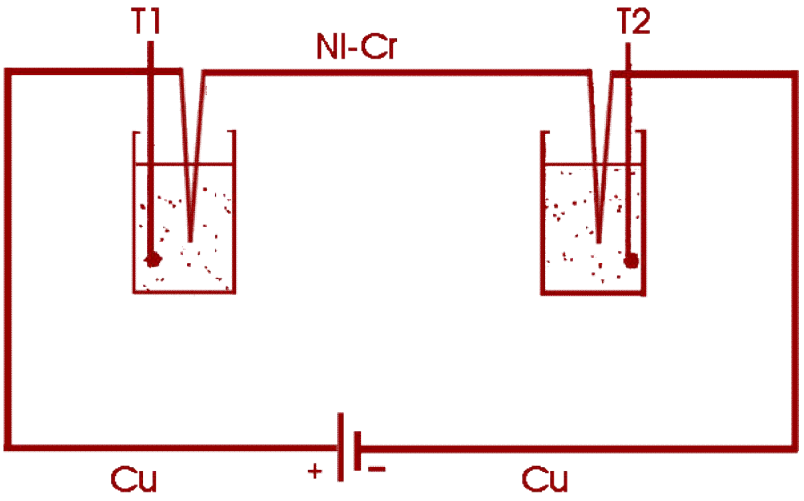
که با جایگذاری در آن خواهیم داشت:

$$\Pi_{1,2} = \frac{(\pi k_B T)^2}{3e}(1+r)\left(\frac{1}{E_{f1}} - \frac{1}{E_{f2}}\right)$$

آزمایش ۳: دو دستگاه کالریمتر یکسان انتخاب و درون هر دو به میزان مساوی آب با دمای یکسان بریزید و دمای آنها را یادداشت نمائید.

یک قطعه سیم کرم- نیکل به طول تقریبی ۵/ متر انتخاب و دو قطعه مساوی سیم مسی به دو انتهای آن متصل نمائید و دو اتصال مربوطه را به‌طور مشابه در آب کالریمترها وارد کنید (بطوریکه مقدار مساوی از هر دو انتها درون آب کالریمتر قرار گیرد). دو انتهای دیگر سیم‌های مسی را به منبع تغذیه متصل و شدت جریان مناسبی (در حدود ۳ آمپر) از مدار عبور دهید.

آب کالریمترها را به آهستگی به هم بزنید و پس از مدتی دماهای آنها را یادداشت و با مقدار اولیه مقایسه تا اثر پلتیر را دریابید.



شکل ۱۷

کالریمترها و منبع تغذیه را بردارید و به جای منبع تغذیه میکرو آمپر(یا گالوانومتر) قرار داده و یکی از دو اتصال را با شعله گرم کنید و جهت جریان را تعیین نموده و آثار سی‌بک و پلیتر را با یکدیگر مقایسه کنید.