

ادامه فصل ٦ گاز فرمی الکترون آزاد

از کتاب علی عمر

عناوین

- گاز فرمی الکترون آزاد
- ترازهای انرژی
- اثر دما روی توزیع فرمی - دیراک
- رسانندگی الکتریکی در فلزات
- ظرفیت گرمایی گاز الکترون آزاد
- سطح فرمی
- رسانندگی گرمایی فلزات
- اثر اعمال میدان مغناطیسی بر فلز
- گسیل گرمایونی
- شکست مدل الکترون آزاد

حرکت در میدان مغناطیسی، تشدید سیکلوترونی و اثر هال

در اثر اعمال میدان مغناطیسی بر یک فلز پدیده های جالبی ایجاد می شود که ناشی از الکترون های رسانش اند. تشدید سیکلوترونی و اثر هال دو پدیده ای هستند که از آن ها برای بررسی خواص الکترون های ظرفیت استفاده می گردد.

تشدید سیکلوترونی

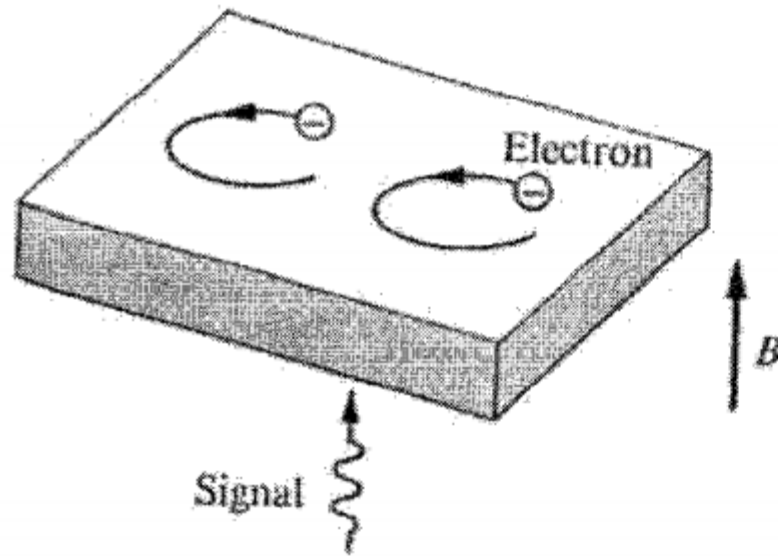
شکل (۴-۱۰) پدیده تشدید سیکلوترونی را نشان می دهد. میدان مغناطیسی در یک بره ی مغناطیسی اعمال می گردد و الکترون ها را وادار می کند که در جهت پاد ساعت گرد در صفحه ای عمود بر میدان حرکت کنند. فرکانس این حرکت که به نام فرکانس سیکلوترونی نامیده می شود با رابطه ی زیر بیان می گردد:

$$\omega_c = \frac{eB}{m^*} \quad (4-38)$$

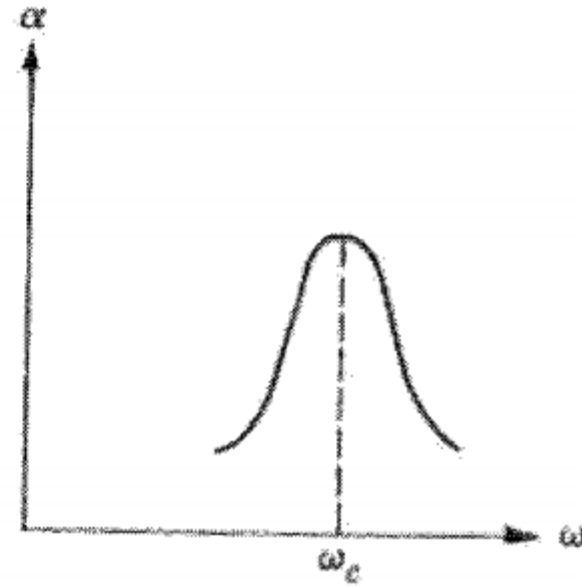
اگر مقدار جرم الکترون آزاد را جای گزین کنیم خواهیم داشت:

$$\nu_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 2.8B \text{ GHz}$$

که در آن B بر حسب کیلو گاوس است. برای $B = 1 \text{ KG}$ فرکانس سیکلو ترونی $\nu_c = 2.8 \text{ GHz}$ است که در ناحیه ی میکرو موج است.



(a)



(b)

شکل ۱۰-۴ (الف) حرکت سیکلو ترونی، (ب) ضریب جذب α بر حسب ω

حال فرض می کنیم که یک سیگنال الکترومغناطیسی، همان طور که در شکل نشان داده شده است، در جهتی موازی با B از بره بگذرد. میدان الکتریکی سیگنال روی الکترون ها عمل می کند و مقداری از انرژی سیگنال جذب می گردد. آهنگ جذب وقتی بیش ترین مقدار است که فرکانس سیگنال دقیقاً مساوی فرکانس سیکلوترون باشد یعنی:

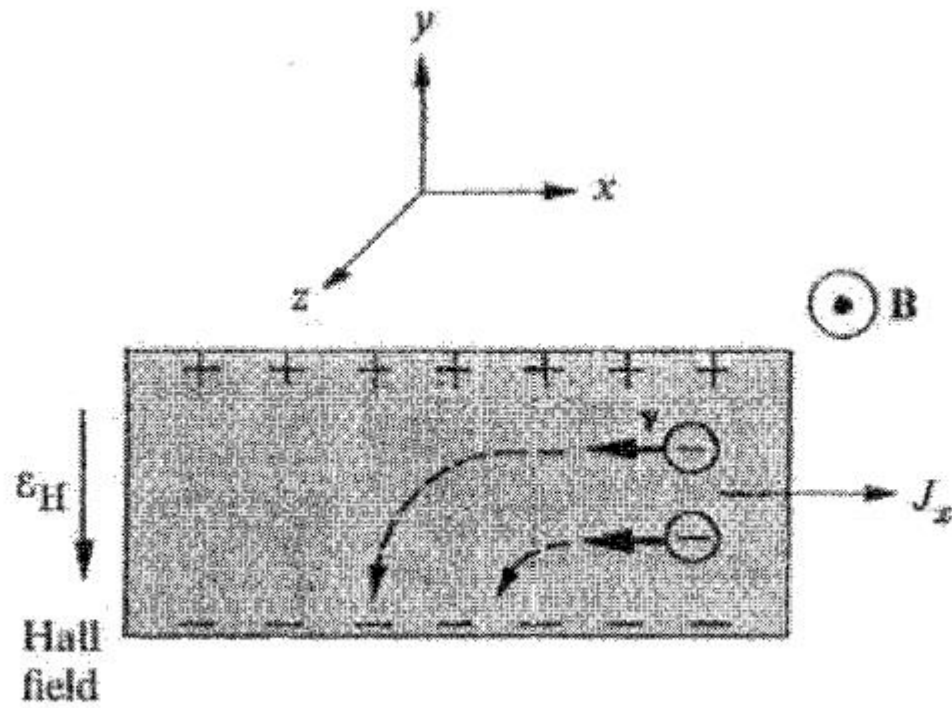
$$\omega = \omega_c \quad (4-39)$$

دلیل این امر این است که وقتی شرط فوق برقرار شد. هر الکترون در طول حلقه ی مسیر به طور هم زمان با موج حرکت می کند. بنابراین جذب انرژی در تمام مدتی که الکترون حلقه را دور می زند ادامه می یابد. پس معادله ی (4-39) شرط تشدید سیکلوترونی است. از طرف دیگر هنگامی که معادله ی (4-39) ارضاء نمی شود، الکترون تنها در یک جزئی از سیکل با موج هم فاز است و فقط در خلال این مدت الکترون از موج انرژی جذب می کند. در باقی مانده ی سیکل، الکترون با موج در فاز مخالف است و انرژی را به موج بر می گرداند. منحنی جذب به صورت تابعی از فرکانس در شکل (10-4ب) نشان داده شده است.^۱

تشدید سیکلوترونی عموماً برای اندازه گیری جرم الکترون در فلزات و نیمه رساناها استفاده می گردد. فرکانس سیکلوترونی از منحنی جذب تعیین می گردد و سپس این مقدار در رابطه‌ی ۳۸-۴ جایگزین می گردد تا جرم موثر محاسبه شود. دقت تعیین m^* به دقت اندازه گیری ω_c و B بستگی دارد. فرکانس سیکلوترونی ω_c را می توان خیلی دقیق تعیین کرد، به ویژه اگر از باریکه‌ی لیزر استفاده گردد. بنابراین دقت اندازه گیری m^* فقط محدود به دقت اندازه گیری میدان مغناطیسی و یک نواخت بودن در داخل نمونه می باشد.

اثر هال

فرایند فیزیکی مربوط به اثر هال در شکل (۱۱-۴) نشان داده شده است. فرض کنید جریان الکتریکی J_x در سیمی در جهت محور x ها جریان یابد و میدان مغناطیسی B_z عمود بر سیم و در جهت محور z ها اعمال گردد. نشان خواهیم داد که این امر منجر به یک میدان الکتریکی اضافی، عمود بر هر دوی J_x و B_z می شود که در امتداد محور y ها است.



شکل ۱۱-۴ منشأ میدان و اثر هال.

ابتدا موقعیت قبل از اعمال میدان مغناطیسی را بررسی می کنیم. یک جریان الکتریکی در امتداد مثبت محور x ها جریان می یابد که بدین معنی است که الکترونهای رسانش با سرعت U در جهت

منفی محور x ها حرکت می کنند هنگامی که میدان مغناطیسی اعمال گردد، نیروی لورنتس $F = e(v \times B)$ سبب می شود، مسیر الکترون ها هم چنان که در شکل نشان داده شده است، به سمت پائین خم شود و در آن جا یک بار خالص منفی تولید گردد. به طور هم زمان یک بار خالص مثبت در سطح بالایی ظاهر می گردد. زیرا در آن جا کمبود الکترون وجود دارد. این ترکیب بارهای مثبت و منفی سطحی یک میدان الکتریکی به سمت پائین ایجاد می کند که میدان هال نامیده می شود.

حال این میدان هال را محاسبه می کنیم نیروی لورنتس که سبب انباشت بار می شود در جهت محور y ها است و مقدار زیر را دارد :

$$F_L = ev_x B$$

که مطابق شکل علامت F_L منفی است. (یادآوری می کنیم که v_x به طرف چپ و منفی است). میدانی که توسط بارهای سطحی ایجاد می شود، نیروئی اعمال می کنند که با نیروی لورنتس مخالفت می کند. فرآیند انباشت بار تا آن جا ادامه می یابد که نیروی هال کاملاً نیروی لورنتس را خنثی کند. بنابراین در حالت پایا، $F_H = F_L$.

$$-e\varepsilon_H = -ev_x B \quad \text{یا} \quad \varepsilon_H = v_x B$$

که ε_H میدان هال است. مناسب تر است میدان هال بر حسب کمیت های قابل اندازه گیری بیان گردد. بدین منظور سرعت v_x بر حسب چگالی جریان $J_x = N(-e)v_x$ بیان می شود. بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$\varepsilon_H = -\frac{1}{Ne} J_x B \quad (4-40)$$

بنابراین میدان هال هم با جریان و هم با میدان مغناطیسی متناسب است. ضریب تناسب که مساوی عبارت $\frac{\varepsilon_H}{J_x B}$ می باشد به نام ثابت هال خوانده می شود و معمولاً با R_H بیان می شود. بدین ترتیب

$$\varepsilon_H = R_H J_x B \quad R_H = -\frac{1}{Ne} \quad (4-41)$$

نتیجه (۴-۴۱) در عمل بسیار مفید است. از آن جا که R_H به طور معکوس با چگالی الکترونی N متناسب است، می توان با اندازه گیری میدان هال، N را تعیین کرد. در واقع این روش، تکنیک استاندارد برای تعیین چگالی الکترونی است. این تکنیک به ویژه بدین لحاظ ارزشمند است که R_H به غیر از N به تنها کمیتی که وابسته است، $-e$ بار الکترون است که یک ثابت فیزیکی بنیادی است و مقدار آن با دقت زیاد معلوم است. ثابت های هال برای چند فاز متعارف در جدول ۳-۴ بیان گردیده است.

جدول ۳-۴: ثابت های هال (بر حسب $Volt.m^3 / amp.weber$ در دمای اتاق)

Li	Na	Cu	Ag	Au	Zn	Cd	Al
$-1/7 \times 10^{-10}$	-۲/۵	-۰/۵۵	-۰/۸۴	-۰/۷۲	+۰/۳	+۰/۶	-۰/۳

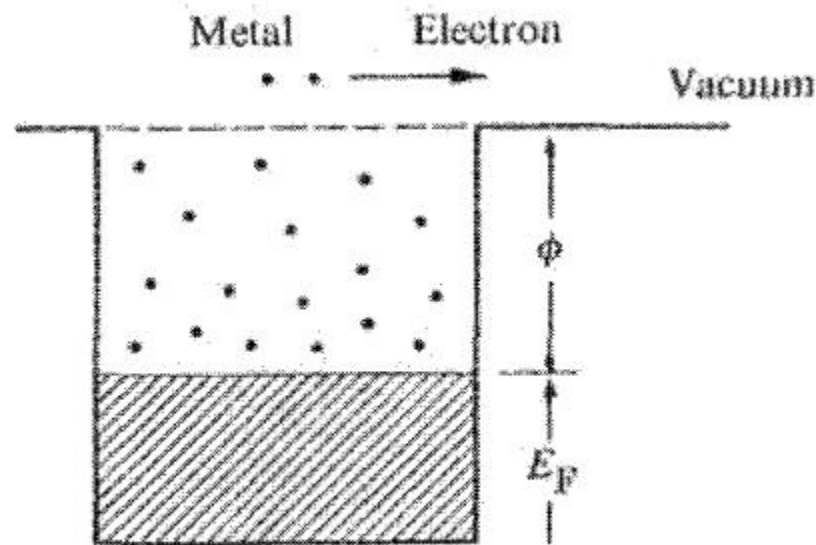
یک نکته ی مفید دیگر در مورد ثابت هال این است که علامت آن به علامت بار حامل های جریان بستگی دارد. پس ثابت هال برای الکترون ها که بار منفی دارند، منفی است. متقابلاً همان گونه که در فصل ۴-۵ ملاحظه خواهد شد، ضریب هال مربوط به رسانایی توسط حفره ها (که بار مثبت دارند) مثبت است^۱. بنابراین علامت R_H مبین علامت بارهای مربوطه است که به ویژه در نیمه رساناها حاوی اطلاعات بسیار با ارزشی است. مثلاً ثابت هال برای Zn و Cd مثبت است (جدول ۳-۴ را ملاحظه نمائید) و حاکی از این است که جریان در این مواد عمدتاً توسط حفره ها حمل می گردد.

سؤال: آیا میدان مغناطیسی روی جریان الکتریکی (کم یا زیاد کردن آن) تاثیری می گذارد؟ عبارتی مقاومت رسانا متأثر از میدان مغناطیسی است یا نه؟

تحلیل فوق جنبه‌ی دیگری از فرایندهای ترابری در حضور میدان مغناطیسی را نشان می دهد. خود جریان الکتریکی در امتداد محور x ها جریان می یابد و تحت تأثیر میدان قرار نمی گیرد. بنابراین مقاومت الکتریکی مستقل از میدان مغناطیسی است. این نتیجه گرچه یک نتیجه‌ی منفی است، از این لحاظ که غیر منتظره است، جالب است. نیروی لورنتس که می خواهد بر Jx تأثیر گذارد، با نیروی هال خنثی می شود، به طوری که الکترون ها در نمونه در امتداد افقی جریان می یابند و از میدان متأثر نمی شوند .

گسیل گرما یونی

وقتی فلزی را گرما دهیم الکترون ها از سطح آن گسیل می یابند. این پدیده به نام گسیل گرما یونی موسوم است. این خاصیت در لوله های خلاء به کار می رود. در این لوله معمولاً کاتد فلزی گرم می شود تا الکترون های مورد نیاز لوله ی خلاء تامین گردند.



شکل ۱۳-۴ گسیل گرما یونی.

شکل ۱۳-۴ تراز انرژی الکترون ها در فلزات را بر مبنای مدل الکترون آزاد نشان می دهد. در $T = 0^\circ K$ تمام ترازها تا تراز فرمی E_F پر هستند، و بالای آن تمام ترازها خالی هستند. به دلیل وجود یک سد انرژی در سطح، الکترون نمی تواند از فلز فرار کند. ارتفاع این سد انرژی با ϕ نشان داده می شود و تابع کار خوانده می شود. تابع کار از یک فلز به فلز دیگر تغییر می کند، ولی عموماً در ناحیه $1/5 - 5 \text{ eV}$ قرار می گیرد.

در دمای $T = 0^\circ K$ هیچ الکترونی نمی تواند از فلز فرار کند، ولی با افزایش دما به دلیل انتقال الکترون ها از پائین E_F ، ترازهای بالای E_F شروع به اشغال شدن می کنند. حتی ترازهای بالای سد، که انرژی های بالاتر از $(E_F + \phi)$ دارند تا حدودی اشغال می شوند. الکترون های این ترازهای اخیر، حالا به اندازه ی کافی انرژی دارند که بر این سد غلبه کنند و این همان الکترون هائی هستند که از سطح فلز گسیل می شوند.

شکست مدل الکترون آزاد

مدل الکترون آزاد را به تفصیل بررسی کردیم تا نشان دهیم که تا چه اندازه این مدل در توجیه خواص مشاهده‌ی فلزات ارزشمند است. ولی این مدل فقط یک مدل تقریبی است و دارای محدودیت‌هایی است. نارسائی‌های مدل الکترون آزاد به قرار زیرند:

الف) این مدل پیشنهاد می‌کند که اگر کمیت‌های دیگر مساوی باشند، رسانائی الکتریکی بر طبق رابطه‌ی (۴-۹) با چگالی الکترونی متناسب است. نتیجه‌گیری معینی از داده‌های جدول (۴-۱) نمی‌توان داشت، چرا که کمیت‌های دیگر فرمول که بر حسب σ تعیین می‌گردند را نمی‌دانیم. ولی موجب تعجب است که فلزات دو ظرفیتی (Zn, Cd, Be و غیره) و حتی فلزات سه ظرفیتی (Al, In) به طور قابل ملاحظه‌ای از فلزات یک ظرفیتی (Au, Ag, Cu) رسانائی کمتری دارند و این به رغم این واقعیت است که فلزات دو یا سه ظرفیتی چگالی‌های الکترونی بیشتری دارند.

$$\sigma = \frac{Ne^2\tau}{m^*} \quad (4-9)$$

ب) ضربه‌ی کوبنده تر بر این مدل از این واقعیت ناشی می‌شود که ثابت هال بعضی از فلزات مانند De, Zn, Cd مثبت است (جدول ۳-۴ را ملاحظه نمائید). مدل الکترون آزاد همیشه یک ضریب هال منفی پیش بینی می‌کند.

ج) اندازه گیری های سطح فرمی دلالت بر این دارد که شکل این سطح اغلب غیر کروی است (بخش ۱۲-۵) این مطلب با مدل الکترون آزاد که یک سطح فرمی کروی را پیش بینی می‌کند در تناقض است.

این مشکلات و مشکلات دیگری که در این جا نیاز به ذکر آن ها نیست را می‌توان توسط یک تئوری جامع تر که بر هم کنش الکترون ها با شبکه را نیز به حساب می‌آورد بر طرف کرد. ما بررسی این موضوع را به فصل بعد وا می‌گذاریم.