آزمایش شکاف انرژی نیمه هادیها

هدف آزمایش

تعیین ضریب تغییرات دمائی مقاومت و شکاف انرژی نیمه هادی خالص

تئوری آزمایش

مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) برای یک ماده برابر مقاومت الکتریکی یک مکعب واحد آن است (جریان از یک سطح مکعب به سطح مقابل آن می‌رود). واحد معمولی آن ($\Omega - cm$) یا ($\Omega - m$) می‌باشد اگرچه در مورد مقاومت کم از واحد ($\mu\Omega - cm$) یا در موارد مقاومت زیاد ($M\Omega - cm$) نیز استفاده می‌شود. هدایت الکتریکی σ برابر $1/\rho$ می‌باشد. مقاومت الکتریکی مواد و به خصوص جامدات، در علوم کاربردی دارای اهمیت فراوان می‌باشد. نه تنها مقدار ρ بلکه بستگی آن به دما، ساختمن و مقدار خلوص آن نیز حائز اهمیت است، بر این اساس می‌توان ماده را به سه نوع تقسیم کرد: هادیها، نیمه هادیها و عایقها.

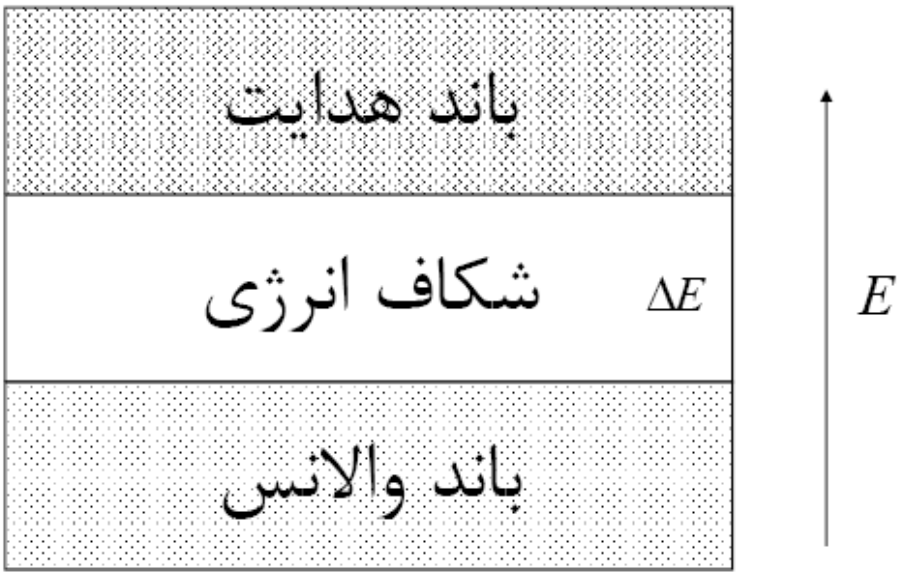
در عایقهای جامد در دمای صفر کلوین یالاترین باند انرژی اشغال شده، یعنی باند والانس، با الکترونها کاملاً پر شده است و هیچ حالت خالی و یا الکترون اضافی وجود ندارد، باند بعدی که قابل پر شدن است اما هنوز اشغال نشده است را می‌تواند باند هدایت در نظر گرفت ولی این باند از بالاترین باند والانس از لحاظ انرژی حدود چندین الکترون ولت بالاتر است. وقتی هیچ میدان الکتریکی بکار نرود، الکترونهای باند والانس به تساوی در تمام جهات حرکت می‌کنند و هیچ جریانی وجود نخواهد داشت؛ وقتی میدان اعمال میشود اصل طرد پائولی مانع از آن می‌شود تا الکترونها اندازهٔحرکت و انرژی خود را تغییر بدهند. از آن‌جا که تمام حالات کوانتومی موجود اشغال شده‌اند حداکثر جفتهای الکترون می‌توانند با هم تبادل حالت کنند که این امر نیز سبب ایجاد جریان نمی‌شود . در دماهای معمولی

توزیع توزیع بولتزمن نشان می‌دهد که عملاً هیچ الکترونی نمی‌تواند تحریک شده و از شکاف انرژی چندین الکترون ولتی گذشته و به باند مجاز بعدی برود. در دماهای نزدیک نقطهٔ جوش ماده الکترونهای بیشتری می‌توانند تحریک شوندو عایق ممکن است در این حالت تجزیه شود.

فلزات و اغلب آلیاژها مواد رسانای جامد می‌باشند. بخشی از بالاترین باند اشغال شده توسط الکترونها پر شده در این صورت برخی (حدود یک درصد در دمای اتاق) می‌توانند آزادانه حرکت کرده و مقدار اندازهٔ حرکت و انرژی خود را با بالا رفتن به حالات کوانتومی اشغال نشده تغییر دهند. این نوع الکترونها در یک شبکه بی‌نقص بدون هیچ مزاحمتی حرکت می‌کنند یعنی $\rho = 0$، اما در واقعیت هیچ شبکه بلوریی بی‌نقص وجود ندارد زیرا نوسانات حرارتی ذرات اتمی در هر دمای غیر صفر آن را نامنظم می‌کند و علاوه بر آن وجود ناخالصی و نقایص حاصل از جابجایی اتمها در هر بلور ایجاد بی‌نظمی می‌کند و بنابراین مقدار ρ هیچ‌وقت صفر نمی‌شود. ρ برای یک هادی در T=0k با مقدار محدودی شروع می‌شود، همان طوری که دمای T افزایش می‌یابد مقدار ρ اول به آهستگی و بعد تقریباً به صورت خطی با T زیاد می‌شود، در دماهای بالاتر ρ ممکن است سریعتر از T بالا برود (در بحث بالا حالت ابررسانایی در نظر گرفته نشده است) نیمه‌هادیهای خالص، عناصری مانند ژرمانیم یا سیلیکن و ترکیبات شیمیایی متفاوت آنها مثل عایقها هستند و یک باند والانس پر دارند با این تفاوت که باند مجاز بعدی فقط حدود یک الکترون ولت بالاتر است، در دماهای پایین ρ خیلی بزرگ است اما در دمای اتاق یا در دماهای بالاتر تعداد قابل توجهی از الکترونها به باند بالاتر می‌رسند در این‌جا الکترونها می‌توانند با آزادی حرکت کرده و حامل جریان باشند و به طور همزمان حالت اشغال نشده یا حفره ها در باند والانس باقی می‌مانند در نتیجه یک حفره به مانند یک بار مثبت e+ عمل می‌کنند که می‌تواند حرکت کرده و حامل جریان باشد (در حقیقت یک الکترون همسایه حفره را پر می‌کند و حالا محل حفره صرفاً با محل اولیهٔ این الکترون جابجا شده است)، مقاومت یک چنین نیمه هادیی به سرعت با ازدیاد دما کاهش می‌یابد.

نیمه هادیهای ناخالص دارای اتمهای ناخالص انتخاب شده می‌باشند، معمولاً این مقدار برابر چند قسمت در یک میلیون (ppm) است، یک اتم ناخالص دهنده (donor) دارای یک الکترون آزاد (یا قابل آزاد شدن) بیشتر از اتمهای مادهٔ اصلی می‌باشد بنابراین در اینجا تعداد الکترون در حالات کوانتمی با انرژی قسمتی از یک الکترون. ولت بالای باند والانس وجود دارد یعنی در دمای معمولی الکترونهای آزاد موجود می‌باشند. این نوع نیمه هادی را نیمه هادی نوع n (از کلمهٔ Negative) گونه می‌نامند، چون الکترونهای معمولی حاملهای بار منفی می‌باشند. یک اتم ناخالص قبول کننده Acceptor یک الکترون والانس کمتر از اتمهای حامل اصلی دارد و بنابراین سعی می‌کند یک الکترون از باند والانس پر شده خارج کند و در نتیجه یک حفره بجا می‌گذارد که حامل جریان است، این نیمه هادی از نوع p

می‌باشد (p از positive است،) چون حاملهای جریان حفره‌ها هستند که دارای بارمثبت می‌باشند. هر دو نوع n و p دارای ρهای نسبتاً بزرگی هستند ولی کوچکتر از نیمه هادیهای خالص می‌باشند و به تغییرات دما هم حساسیت کمتری دارند.



شکل (۱): نمایش نوارهای ظرفیت و هدایت

وسایل الکترونیکی حالت جامد مثل دیودها و ترانزیستورها مجموعه‌ای از نیمه هادیهای نوع n و p می‌باشند. ضریب دمایی مقاومت در نیمه هادیها منفی و بزرگ می‌باشد. بررسی این خاصیت نیمه هادی اجازهٔ تعیین پهنای شکاف انرژی آن را می‌دهد.

ضریب دمایی مقاومت به این صورت تعریف می‌شود:

$$\alpha = (\Delta R / R_0) \times \Delta T^{-1}$$

ΔT مقدار تغییر دما، ΔR مقدار تغییر مقاومت و R_0 مقاومت در یک دمای معین است.

حاملهای بار در یک نیمه هادی خالص توسط تحریک حرارتی الکترونها از باند والانس به باند هدایت به وجود می‌آیند. رابطهٔ مقاومت ρ برای یک نیمه هادی خالص به شکل زیر است:

$$\rho = A\exp(\Delta E / 2kT) \quad \Omega - cm$$

در اینجا:

A تابعی آهسته از دما می‌باشد. ΔE عرض شکاف انرژی بین باند والانس و باند هدایت است. k ثابت بولتزمن و T درجهٔ حرارت برحسب کلوین است. شبیه رابطهٔ بالا را می‌توان برای مقاومت در دمای T ، R(T) ، به صورت زیر نوشت:

$$R(T) = R_0 \times \exp(\Delta E / 2kT)$$

بنابراین با تقریب خوبی می‌توان شکاف انرژی ΔE را برای یک نیمه هادی خالص از روی شیب منحنی $\ln(R(T)/R_0)$ برحسب 1/T محاسبه نمود:

$$\Delta E = +2kT \times \ln[R(T)/R_0]$$

آزمایش

قطعهٔ دربردارندهٔ نیمه هادی دارای مقاومتی است که می‌توان آن را با استفاده از اهم‌متر دیجیتال به دست آورد.

روش آزمایش

در نظر داشته باشید که قسمتی از قطعهٔ مزبور **شکننده** است. از این رو از زدن ضربه یا ایجاد فشار زیاد بر آن خودداری کنید.

قطعهٔ دربردارندهٔ نیمه هادی را با دقت زیاد در داخل کوره قرار دهید.

پروب اندازه‌گیر دما را با دقت در داخل کوره قرار دهید، به طوری که در نزدیکی نیمه هادی قرار گیرد، سپس آن را به ترمومتر دیجیتالی متصل کنید. ترمومتر دیجیتالی را روشن کرده و دمای محیط را یادداشت کنید.

توجه کنید که هرگز نباید دمای نیمه هادی از 100^0C تجاوز کند، در صورتی که متوجه شدید که دمای آن از این حد بیشتر می‌شود، بلافاصله آن را از کوره خارج کنید.

مدار را بسته و مقاومت مربوط به دمای محیط را به دست آورید.

واریاک را روشن کرده و بر روی مقدار 80 V قرار دهید، سپس با افزایش تدریجی دمای کوره، به طور متناوب، مقدار مقاومت R_1 را برحسب دمای کورهٔ T در جدول یادداشت کنید.

هنگامی که دمای کوره به نزدیکی ^{0}C 100 می‌رسد واریاک را روی درجهٔ صفر برده خاموش کنید و اندازه‌گیری را تا دمای ^{0}C 100 ادامه دهید.

حال از روی نتایج به دست آمده می‌توانید منحنی R=R(T) را رسم کنید.

خواسته‌های آزمایش

۱. از روی منحنی ضریب تغییرات دمایی مقاومت (α) را به دست آورید و آن را با ضریب مربوط به اجسام زیر مقایسه کنید:

   مس، آلومینیوم، پلاتین، جیوه، منیزیم.

۲. در صورت امکان مقاومت مخصوص نیمه هادی را در دمای اتاق به دست آورده و با مقاومت مخصوص اجسام زیر مقایسه کنید:

شیشه پیرکس، روغن پارافین، کربن (گرافیت)، گـوگرد زرد، بـرن (BORON)، مـس، جیـوه، برنج (Brass) ، و آلیاژ INCONEL X .

از اجسام بالا کدام را هادی، نیمه هادی یا عایق طبقه‌بندی می‌کنید؟

۳. شکاف انرژی نیم هادی را با رسم منحنی $\ln(R/R_0)$ برحسب $1/T$ برای دو وضعیت افـزایش و کاهش دما به کمک منحنی آزمایش محاسبه کرده و با هم مقایسه کنید. کدامیک از مقـادیر شکاف انرژی صحیحتر است. چرا؟

مراجع

در مورد نیمه هادیهای خالص و بستگی مقاومت آنها به شکاف انرژی

1. Introdution to Solid State Physics, by: C. Kittel

مربوط به تغییرات مقاومت نیمه هادیها برحسب دما

2. Methods of Experimental Physics, Vol 1, Estermann (Ed.)

در مورد رسم کننده‌ها X-Y

3. Basic Electronics for Scientists, by:J.J Brophy

در مورد مقاومت مخصوص، ضریب مقاومت فلزات، مقاومت مخصوص آلیاژها مقاومـت مخصـوص عایقها و مقاومت مخصوص عناصر

4. CRC Handbook of Chemistry & Physics

در مورد شکاف انرژی نیمه هادیها

5. Experiments in Modern Physics by: A. C. Melissinos