

# رسانندگی الکتریکی حاملین بار در نیمرسانای گالیوم آرسناید آلاینده با Cr و Co مورد استفاده در سلول های خورشیدی و آشکارسازهای فیبر نوری

حسن خالقی

مربی، گروه علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
h.khaleghi@semnaniau.ac.ir، پست الکترونیکی ۳۵۱۹۷-۵۵۷۷۸

## چکیده

گالیوم آرسناید ترکیبی از عنصرهای گروه‌های III-V جدول تناوبی عناصر است. گالیوم آرسناید در ساختاری بلوری مشهور به zinc blende متبلور می‌شود. این ساختار به ساختار شبکه‌ی بلوری الماس بسیار شبیه است، اما در الماس فقط یک نوع اتم (کربن) وجود دارد در حالی که در این ماده هر موضع اتمی به تناوب توسط یکی از اتم‌های آرسنیک یا گالیوم اشغال می‌شود. از این نیمرسانای استفاده‌ی گسترده‌ای در تکنولوژی و ساخت قطعات نیمرسانا مانند مدارهای مجتمع، دیودهای مادون قرمز، دیودهای لیزری و سلول های خورشیدی می‌شود از این جهت مطالعه‌ی خواص آن حایز اهمیت است. در این مقاله رسانندگی الکتریکی نیمرسانای GaAs از نوع p مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های تحت بررسی که شامل دو نمونه نیمرسانای GaAs هستند به ترتیب با عناصر Cr و Co آلاینده شده اند. این ناخالصی ها ناهمگنی زیادی را در شبکه‌ی GaAs به وجود می‌آورند و از این لحاظ مکانیزم پراکندگی خاصی را برای حاملین بار در GaAs ایجاد می‌کنند. در این کار تجربی رسانندگی الکتریکی حاملین در گسترده‌ی دمایی (۴۰۰-۱۰۰) درجه‌ی کلون برای هر دو نمونه مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل بزرگ بودن گاف انرژی GaAs، در بازه‌ی دمایی فوق رسانش از نوع رسانش غیرذاتی است.

## کلیدواژگان

نیمرسانا، رسانندگی الکتریکی، سلول های خورشیدی

## The Electrical Conductivity of charge carriers in Gallium Arsenide semiconductor doped with Cr and Co used in solar cell and optical fiber detectors

Hassan khaleghi

Basic Sciences Group, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
P.O.B. 3519755778 Semnan, Iran, h.khaleghi@semnaniau.ac.ir

### Abstract

Gallium arsenide is a compound of the elements gallium and arsenic. It is a III-V direct band gap semiconductor with a zinc blende crystal structure. GaAs is used in the manufacture of devices such as microwave frequency integrated circuits, monolithic microwave integrated circuits, infrared light-emitting diodes, laser diodes, solar cells and optical windows. GaAs is often used as a substrate material for the epitaxial growth of other III-V semiconductors including: Indium gallium arsenide, aluminum gallium arsenide and others. From this view point, study of the electronic properties of GaAs single crystals is of prime importance. In this experimental work, electrical conductivity of two kinds of p-type GaAs samples each doped with Cr and Co have been studied in the wide temperature range (100-400) K. Apart from temperature dependency of mobility of charge carriers also different predominant scattering mechanisms occurring in these crystals have been given.

### Keywords

semiconductor, electrical conductivity, solar cells

آلاینش نیمرسانا به دو روش مختلف انجام می‌شود. یک روش آن است که اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد و

روش دیگر آن است که اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد.

برای توجیه پدیده‌ی رسانایی الکتریکی در جامدات، دیگر نظریه‌ی کلاسیک الکترون آزاد پاسخگو نیست و نظریه‌ی نواری، که مبتنی بر فیزیک کوانتوم است، برای تفسیر این پدیده استفاده می‌شود. افزایش دما موجب افزایش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مواد رسانا می‌شود. علت

## ۱-مقدمه

یکی از ویژگی‌های جالب مواد نیمرسانا، که آنها را از مواد رسانا متمایز می‌کند، چگونگی تغییر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آنها با تغییرات دما است. برخلاف رسانا، در نیمرسانا افزایش دما موجب کاهش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمرسانا می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد ذراتی با بار مثبت و هم‌جرم الکترون نیز در رسانایی الکتریکی نیمرساناها نقش دارند این ذرات را که جای خالی الکترون‌ها در هر لایه هستند، حفره می‌گوییم. علاوه بر افزایش دما، با اضافه کردن مقادیر کمی ناخالصی به ماده‌ی نیمرسانا نیز می‌توان تعداد حاملان بار الکتریکی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

با گذار الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش، تعدادی جای خالی الکترون در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. جای خالی الکترون در نوار ظرفیت را حفره می‌گوییم. حالا با ایجاد این جاهای خالی در نوار ظرفیت، الکترون‌های این نوار هم می‌توانند گذار انجام دهند و از تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر بروند. این مسئله موجب رسانایی الکتریکی می‌شود. گذار الکترون از تراز اولیه خود به تراز خالی، مشابه آن است که بگوییم حفره از تراز بالاتر به تراز اولیه الکترون گذار کرده است. بنابراین به جای آن‌که بگوییم الکترون درون نوار ظرفیت گذار کرده است، می‌گوییم حفره تراز خود را تغییر داده است. در واقع زیاد بودن تعداد الکترون‌ها، بررسی گذار آن‌ها را دشوار می‌کند؛ اما چون تعداد حفره‌ها کم است، در نظر گرفتن آنها ساده‌تر است. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد، نحوه تعیین بار حفره‌های نوار ظرفیت است. از آنجاییکه حفره‌ها، برخلاف الکترون‌ها، از تراز بالاتر به تراز پایین‌تر گذار می‌کنند؛ قرارداد می‌کنیم که بار آنها را مثبت در نظر بگیریم. بنابراین در نیمرسانا دو نوع حامل بار الکتریکی داریم؛ یکی الکترون‌های نوار رسانش و دیگری حفره‌های نوار ظرفیت.

## ۲- برخورد و پراکندگی

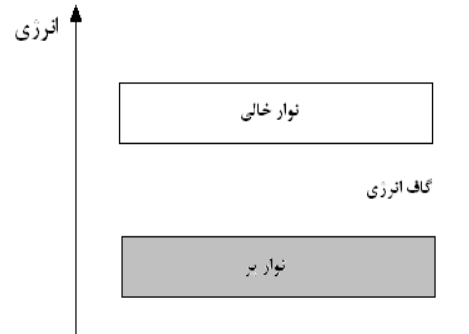
در یک جامد، الکترونی که تحت تاثیر میدان الکتریکی حرکت می‌کند با اتم‌ها و با ساختار شبکه‌ی غیر ایده‌آل برهم‌کنش انجام می‌دهد. در نتیجه‌ی این برهم‌کنش بیشتر انرژی الکترون تلف می‌شود و این فرآیند مرتباً تکرار می‌گردد. این فرآیند برخورد به عنوان «پراکندگی» شناخته شده است. هنگامی که الکترون در حال عبور از یک شبکه ثابت<sup>۱</sup> کاملاً دوره‌ای است. برطبق محاسبات مکانیک کوانتومی، پراکندگی برای حامل رخ نمی‌دهد و در نتیجه هیچ تبادل انرژی نیز صورت نمی‌گیرد. در این حالت پویای آزاد حامل‌ها بی‌نهایت است [۲]. یک شبکه غیر ثابت هنگامی که اتم‌های شبکه به واسطه‌ی کسب گرما ارتعاش می‌کنند، حاصل می‌شود. هنگامی که شبکه خاصیت دوره‌ای خود را از دست بدهد در آن مکانیزم‌های پراکندگی مختلفی به وجود می‌آید.

پراکندگی تنها به برخورد مستقیم بین الکترون‌ها و یون‌ها نسبت داده نمی‌شود بلکه بیشتر به واسطه‌ی تغییر در توزیع‌های پتانسیل در جامد، هنگامی که ساختار بلور کاملاً دوره‌ای صحیح نیست، رخ می‌دهد [۳]. غیر دوره‌ای بودن توسط سه عامل ایجاد می‌شود. این سه عامل عبارتند از: بالا رفتن دمای جامد از صفر کلوین، وجود نواقص<sup>۲</sup> در جامد و حضور ناخالصی‌ها. بنابراین سه پدیده وجود دارد که به تنهایی یا باهم باعث انحراف پتانسیل دوره‌ای می‌شوند.

در دماهای معمولی، اتم‌های شبکه حول مکان تعادل‌شان ارتعاش می‌کنند. این ارتعاشات باعث آشفته شدن تناوب شبکه شده و پتانسیل تناوبی تغییر می‌کند. در نتیجه یک میدان الکتریکی در جامد ایجاد شده که باعث پراکنده شدن حامل‌ها می‌شود. پراکندگی هم در اثر برخورد حامل با خود اتم‌های ارتعاشی به وجود می‌آید و هم در اثر تغییر میدان پتانسیل در اثر جابجایی اتم‌های ارتعاشی، حاصل می‌شود. در دماهای بالا، مقدار ارتعاشات اتمی بیشتر است در نتیجه سطح مقطع پراکندگی و انحراف میدان پتانسیل نیز بزرگ می‌گردد بنابراین احتمال وقوع پراکندگی در اثر افزایش دما بیشتر می‌شود. این مکانیزم پراکندگی به پراکندگی شبکه‌ای مشهور است و

این پدیده نیز افزایش تعداد و شدت برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های در حال نوسان در جسم رسانا است. با افزایش دما، جنبش ذرات تشکیل‌دهنده‌ی جسم بیشتر می‌شود و بنابراین تعداد و شدت برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های جسم افزایش می‌یابد. یعنی الکترون‌ها که حاملان بار الکتریکی در جسم جامد رسانا هستند، برای انتقال بار الکتریکی با موانع بیشتری برخورد می‌کنند و در نتیجه رسانایی الکتریکی جسم کاهش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد، برخلاف رسانا، در نیمرسانا افزایش دما موجب کاهش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمرسانا می‌شود [۱]. توجیه این پدیده در نیمرسانا تنها با استفاده از نظریه‌ی نواری امکان‌پذیر است.

در شکل (۱) ساختار نواری یک نیمرسانا نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویر می‌بینیم در دماهای پایین نوار ظرفیت نیمرسانا کاملاً پر از الکترون و نوار رسانش کاملاً خالی از الکترون است. از این رو نه نوار ظرفیت در رسانش نقشی دارد (چون نوار کاملاً پر است و هیچ الکترونی امکان گذار درون نوار را ندارد) و نه در نوار رسانش الکترونی هست تا موجب رسانایی الکتریکی شود. بنابراین در دماهای پایین، نیمرسانا مشابه نارسانا رفتار می‌کند. با افزایش دما، تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار می‌کنند. بدین ترتیب هم الکترون‌هایی که در نوار رسانش قرار می‌گیرند، موجب رسانایی الکتریکی می‌شوند و هم تعدادی تراز خالی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. از این‌رو امکان گذار برای الکترون‌های نوار ظرفیت نیز (در همان نوار) فراهم می‌شود. به بیان دیگر، در این حالت هم نوار رسانش در رسانایی الکتریکی نقش دارد و هم نوار ظرفیت. به همین ترتیب با افزایش دما هم تعداد الکترون‌های نوار رسانش بیشتر می‌شود و هم ترازهای خالی نوار ظرفیت افزایش می‌یابد. این مسئله سبب افزایش رسانایی الکتریکی نیمرسانا می‌شود.



شکل ۱ ساختار نواری یک جسم نیمرسانا

آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که مقدار جریان الکتریکی در نیمرسانا بیشتر از آن است که فقط با عبور الکترون‌ها ایجاد شده باشد. این پدیده ایده‌ی وجود ذرات دیگری را به عنوان حامل بار الکتریکی مطرح می‌کند. به عبارت دیگر ما تاکنون فقط الکترون‌ها را به عنوان حاملان بار الکتریکی در نظر می‌گرفتیم، اما آزمایش‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد ذراتی با بار مثبت و هم جرم الکترون نیز در رسانایی الکتریکی نیمرسانا نقش دارند. این اتفاق با استفاده از نظریه‌ی نواری این گونه توجیه می‌شود؛ در نیمرسانا علاوه بر الکترون‌هایی که در نوار رسانش قرار می‌گیرند و در رسانایی الکتریکی نقش دارند، جای خالی ایجاد شده در نوار ظرفیت نیز (که به دلیل گذار الکترون‌ها به نوار رسانش تشکیل شده)، موجب رسانایی الکتریکی می‌شود.

1. Stationary Lattice  
2. Imperfections

که  $\mu_h > \mu_e$  به ترتیب تحرک پذیری الکترون و حفره و  $n_h > n_e$  به ترتیب چگالی الکترون و حفره است. برای یک نیمرسانای ذاتی، بنابراین  $n_e = n_h = n_i$ :

$$\sigma_i = n_i e (\mu_e + \mu_h) = n_i e \mu_h \left( \frac{\mu_e}{\mu_h} + 1 \right) \quad (4)$$

$$\sigma_i = \frac{e}{4\pi^3} \left( \frac{2\pi(m_e^* m_h^*)^{1/2} k_B T}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/2k_B T} \mu_h \left( \frac{\mu_e}{\mu_h} + 1 \right) \quad (5)$$

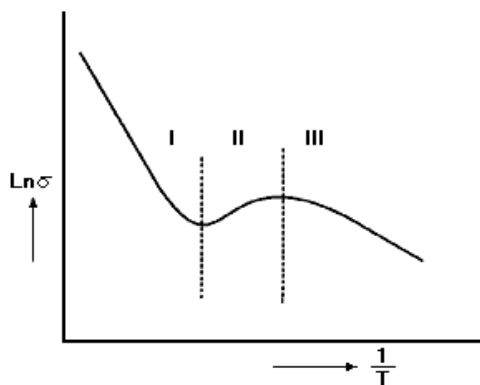
$\mu_h$  معمولاً دارای بستگی دمایی است به طوری که تغییرات دمایی  $T^{3/2}$  در گروه ی معادله ی اخیر را خنثی می کند [۷]. از طرفی نسبت  $\mu_e$  به  $\mu_h$  دارای بستگی قوی به دما نیست به طوری که می توان از آن در برابر جمله ی نمایی صرف نظر کرد. در نتیجه بستگی دمایی فقط در جمله ی نمایی باقی می ماند. به طوری که می توان رابطه ی زیر را نوشت:

$$\sigma_i = Const \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (6)$$

بنابراین منحنی  $\ln \sigma_i$  برحسب  $\frac{1}{T}$  یک خط راست خواهد بود که

دارای شیب  $\frac{E_g}{2k_B}$  است. در نتیجه با محاسبه ی شیب این خط مقدار  $E_g$

برای نیمرسانا به دست می آید. در مورد نیمرسانای غیرذاتی دوباره فرمولی مشابه با رابطه ی (۶) بدست می آید. با این تفاوت که  $E_a$ ، انرژی یونش ناخالصی، جانشین  $E_g$  می شود. در واقع برای اندازه گیری  $E_g$  نیمرسانا باید از شیب منحنی  $\ln \sigma$  برحسب  $\frac{1}{T}$  در دماهای بالا استفاده کرد. زیرا در دماهای بالا الکترون های تراز ظرفیت انرژی کافی برای رسیدن به باند رسانش را دارند. اما در دماهای پایین تر تنها گذار بین ترازهای ناخالصی و باند ظرفیت یا رسانش ممکن است. بنابراین برای محاسبه  $E_a$  باید از شیب منحنی  $\ln \sigma$  بر حسب  $\frac{1}{T}$  در دماهای پایین بهره برد.



شکل ۲ منحنی  $\ln \sigma$  بر حسب  $\frac{1}{T}$  برای یک نیم رسانای نوع n

تحرک پذیری حامل ها به واسطه ی آن با  $T^{-3/2}$  متناسب است. مکانیزم دومی که پراکندگی را ایجاد می کند از حضور اتم های ناخالصی یونیده ناشی می شود. این اتم ها یک میدان الکتریکی ایجاد می کنند که توزیع پتانسیل در بلور را تغییر می دهد. این نوع پراکندگی در دماهای پایین تر، هنگامی که پراکندگی شبکه ای ضعیف تر است، دارای اهمیت بیشتری می باشد. با بالا رفتن غلظت ناخالصی در بلور، احتمال وقوع پراکندگی یونیده بیشتر می شود. در پراکندگی یونیده یا ناخالصی تحرک پذیری حاملین با  $T^{3/2}$  متناسب است.

عامل سوم ایجاد کننده ی پراکندگی، از عیوب شبکه مانند جاهای خالی و از نواقص بلوری ناشی می شود. این نوع پراکندگی نسبت به پراکندگی شبکه ای و پراکندگی ناخالصی، دارای اهمیت کمتری است [۴]. عیوب شبکه باعث تغییر در پتانسیل دوره ای می شود و در نتیجه یک میدان الکتریکی ایجاد می کند. الکترون عبوری از نزدیک یک نقص شبکه ای با میدان آن برهم کنش می کند و این مسئله باعث تغییر جهت حرکت آن می شود [۵].

با توجه به توضیحات فوق، در دماهای پایین پراکندگی ناخالصی بیشتر حاکم است در حالی که در دماهای بالاتر پراکندگی شبکه ای موثرتر می باشد.

در یک بلور واقعی، این سه مکانیزم عمده ی پراکندگی به طور همزمان رخ می دهند. به طوری که سهم آنها نسبت به پراکندگی کل به شدت با دما و غلظت ناخالصی ها تغییر می کند. در این حالت تحرک پذیری کل حامل به تحرک پذیری پراکندگی های مختلف به صورت زیر ربط داده می شود:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_D} \quad (1)$$

در رابطه ی فوق  $\mu$  تحرک پذیری کل،  $\mu_L$  تحرک پذیری ناشی از ارتعاشات شبکه،  $\mu_I$  تحرک پذیری ناشی از حضور یون های ناخالصی و  $\mu_D$  تحرک پذیری ناشی از عیوب شبکه است. به دلیل ناچیز بودن  $\mu_D$  در برابر  $\mu_L$  و  $\mu_I$ ، رابطه ی فوق غالباً به صورت زیر در می آید:

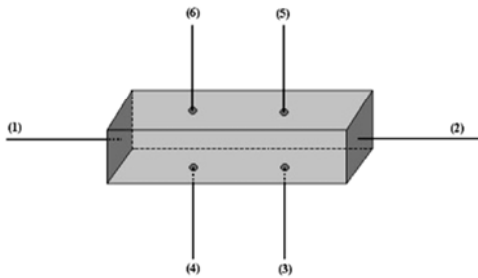
$$\frac{1}{\mu} \approx \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} \quad (2)$$

### ۳- رسانندگی الکتریکی نیمرساناها

رسانندگی الکتریکی نیمرساناها در اثر حرکت الکترون ها و حفره هایی که تحت نفوذ میدان الکتریکی اعمالی هستند، به وجود می آید. طبق قرارداد، جهت جریان در جهت حرکت بارهای مثبت فرض می شود. در نتیجه جهت جریان در هر دو نوع نیمرسانای n و p در جهت حرکت حفره ها خواهد بود [۶]. از آنجا که طبق قرارداد، جریان الکترون در همان جهت جریان حفره است، رسانندگی نیمرسانا به وسیله ی رابطه ی زیر داده می شود:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_h = e(n_e \mu_e + n_h \mu_h) \quad (3)$$

نقطه‌ی ذوب فلز ایندیم ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. بنابراین برای دماهای پایین تر از ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد از ماده‌ی ایندیم برای ایجاد اتصال استفاده شد و برای دماهای بالاتر از خمیر نقره استفاده گردید. محل اتصالات در روی نمونه خیلی مهم هستند. مطابق شکل (۳) نقاط (۵) و (۶) باید بترتیب دقیقاً مقابل نقاط (۳) و (۴) قرار بگیرد.

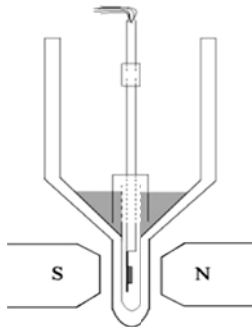


شکل ۳ نمونه مورد بررسی با ۶ اتصال

#### ۴-۱- اندازه‌گیری در دماهای پایین

جهت تشخیص و تعیین مکانیزم‌های حاکم بر پارامترهای ترابردی مواد، نیاز به بررسی رفتار این کمیت‌ها در محدوده دمایی وسیعی است. بنابراین اندازه‌گیری‌ها باید در یک زمیا صورت گیرد. از آنجایی که در این پروژه، سیال سرد کننده ازت مایع می‌باشد حداکثر دمای قابل دسترسی در حوالی نقطه‌ی جوش آن یعنی  $77 K$  است. در بهترین شرایط که به معنی انتخاب ابعاد کوچکی از نمونه و حداقل افت سرمایی می‌باشد به طور عملی به دمایی برابر با  $85 K$  دست یافته‌ایم.

برای بررسی تحرک پذیری حاملین بار  $\mu$  در نمونه‌ها از یک زامپای شیشه‌ای استفاده گردید. این زامپا از یک نوع شیشه که دارای ناخالصی مولیبدون ساخته شده است.



شکل ۴ زامپای شیشه‌ای دو جداره

چنانکه از شکل (۴) ملاحظه می‌شود، قسمت بیرونی این زامپا دو جداره بوده و برای جلوگیری از تبخیر سریع ازت مایع که برای سرمایش نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد، هوای داخل آن تا فشار  $10^{-6} \times 5$  تور تخلیه شده است. قسمت داخلی آن از یک لوله شیشه‌ای به قطر ۹ میلی‌متر از همان جنس جهت

در شکل (۲) قسمت اول منحنی، ناحیه ذاتی را نمایش می‌دهد. شیب این خط مقدار  $E_g$  را بدست می‌دهد. ناحیه غیر ذاتی در قسمت سوم شکل (۲) نشان داده شده است. شیب خط در این ناحیه مقدار  $E_a$  را به ما خواهد داد.

در بیشتر نیمرساناها، پراکندگی حامل از ترکیب پراکندگی شبکه‌ای (فونون) و پراکندگی ناخالصی حاصل می‌شود. پراکندگی شبکه‌ای در دمای بالا غالب است در حالیکه پراکندگی ناخالصی در دماهای پایین اثر بیشتری دارد. در ناحیه دمای میانی هیچ کدام از این مکانیزم‌های پراکندگی غالب نیست. این به عنوان ناحیه‌ی اشباع در قسمت دوم شکل (۲) رسم شده است.

اگر در اثر آلیش نیمرسانا با ناخالصی، ناهمگنی زیادی در شبکه‌ی نیمرسانا به وجود آید نیمرسانا به یک نیمرسانای آمورف (بی‌شکل) تبدیل می‌شود. در نیمرساناهای آمورف رابطه‌ی رسانندگی به صورت زیر است:

$$\sigma_A = en_A \mu_A \quad (7)$$

که  $n_A$  چگالی و  $\mu_A$  تحرک پذیری حامل‌ها می‌باشد. از آنجا که در نیمرساناهای آمورف الکترون‌ها به شدت به هسته‌های متناظرشان مقید هستند، چگالی حامل‌ها در آنها به شدت کوچک است. همچنین به خاطر نامنظمی شدید در شبکه‌ی نیمرسانا تحرک پذیری حاملین نیز کوچک می‌باشد. به طوری که در نیمرساناهای آمورف رسانندگی در دمای اتاق بسیار پایین است. بنابراین فرآیند رسانش در نیمرساناهای آمورف با رابطه‌ی زیر به انرژی یونش ناخالصی و دما ارتباط می‌یابد:

$$\sigma_A = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (8)$$

که  $\sigma_0$  رسانندگی در  $T \rightarrow \infty$  و  $E_a$  انرژی فعال‌سازی است [۸].

#### ۴-آماده سازی نمونه‌ها و دستگاه اندازه گیری

در این مقاله رسانندگی الکتریکی تک بلورهای GaAs مورد بررسی واقع شده است. این تک بلورها از نوع p هستند که با عناصر کروم و کوبالت آلیپیده شده‌اند. تک بلورهای تحت بررسی به روش بریچمن تهیه و به صورت آماده از آکادمی علوم آذربایجان خریداری شده بودند. پس از برش دادن تک بلورها با استفاده از الماس شیشه‌بری به قطعات کوچک‌تر، وجوه آنها را سمباده زده تا سطحی صاف و یکنواخت پیدا کنند. بعد از این کار نمونه‌هایی به ابعاد  $1.4 \times 1.8 \times 1.2$  mm<sup>3</sup> و  $1.1 \times 1.7 \times 1.4$  mm<sup>3</sup> آماده شد. طول نمونه‌ها باید بیشتر از دو برابر عرض آنها باشد. نمونه‌ها را بوسیله‌ی تمیز کننده‌ی ما فوق صوتی تمیز کرده و سپس برای سونش، آنها را داخل اسید نیتریک و اسید فلوریدریک قرار دادیم. پس از فرآیند سونش، نمونه‌ها با آب مقطر دوبار تقطیر شده، شستشو داده شده تا برای اتصال زدن آماده شوند.

برای ایجاد اتصال راههای مختلفی وجود دارد. روشی که در این کار تجربی مورد استفاده قرار گرفت استفاده از فلز ایندیم و خمیر نقره بود.

$$V_{\sigma} = \frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2}{2} \quad (11)$$

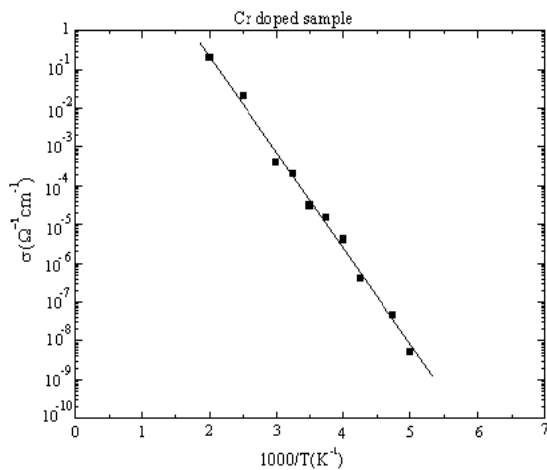
رسانندگی الکتریکی نمونه طبق فرمول بندی زیر بدست می آید:

$$\sigma = \frac{I}{V_{\sigma}} \cdot \frac{l}{s} \quad (12)$$

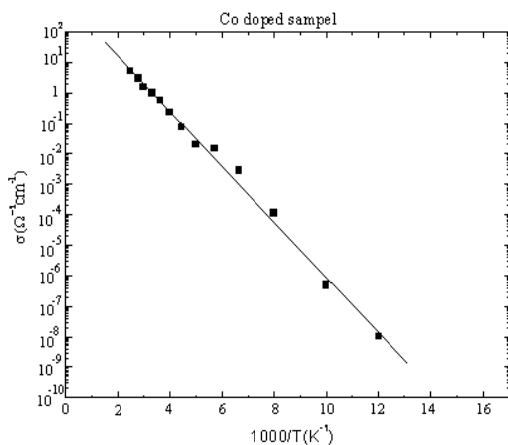
$l$  فاصله دو اتصال (۳)، (۴)، (۵) و (۶) بوده و  $S$  سطح مقطع نمونه است. حال با داشتن مقدار  $V_{\sigma}$ ،  $I$ ،  $V_{\sigma}$  که مقدار ثابتی است، می توانیم مقدار  $\sigma$  را محاسبه کنیم.

#### ۵- نمودارها و تحلیل آن

در شکل های (۶) و (۷) به ترتیب منحنی های  $\sigma$  بر حسب  $\frac{1000}{T}$  برای نمونه های GaAs آلیپیده با Cr و Co رسم شده است. با توجه به منحنی ها درمی یابیم که با افزایش دما رسانندگی نمونه ها نیز افزایش یافته است. این موضوع به دلیل افزایش تعداد حاملین بار در اثر افزایش دما است و از مشخصه های اصلی نیمرساناها می باشد.



شکل ۶ نمودار تغییرات رسانندگی  $\sigma$  بر حسب  $\frac{1000}{T}$  برای نمونه ی GaAs آلیپیده با Cr



شکل ۷ نمودار تغییرات رسانندگی  $\sigma$  بر حسب  $\frac{1000}{T}$  برای نمونه ی GaAs آلیپیده با Co

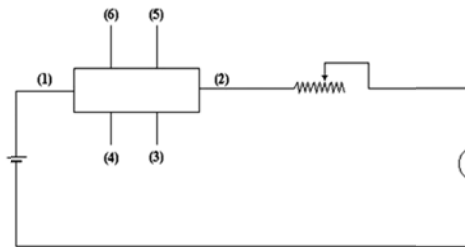
قرار دادن پروب که حامل نمونه، گرمکن الکتریکی، ترموکوپل و سیم های اتصال می باشد، ساخته شده است.

برای ساخت گرمکن الکتریکی از لایه های نازک میکا و سیم تسمه ای کرم- نیکل استفاده گردید. مقاومت گرمکن برابر ۸ اهم بوده و جریان های مختلفی تا ۳ آمپر و یا بیشتر را می توان از آن عبور داد. با این وصف توان مصرفی گرمکن با عبور جریان سه آمپری ۲۴ وات بوده و تا دمای حدود ۵۰۰ کلوین یا بالاتر را می تواند برای بالا بردن دمای نمونه، تولید کند.

نحوه ی تغییر دمای نمونه بدین صورت است که پس از نصب نمونه و قراردادن پروب در داخل زمپا، ابتدا مقدار کمی ازت مایع در مخزن زمپا می ریزیم. بلافاصله ترموکوپل کاهش دمای نمونه را نشان می دهد. در این زمپا از ترموکوپل های مس - کنستانن استفاده شده است. با ریختن ازت مایع، دمای نمونه را می توان تا دمای نزدیک به ۸۵ K پایین برد. ابتدا می توان با ریختن مقداری ازت خود نمونه را مستقیماً در معرض ازت مایع قرار داده سپس با عبور جریان های الکتریکی مختلف از گرمکن، می توان دمای نمونه را تغییر داده و وابستگی دمای تحرک پذیری نمونه را مورد مطالعه قرار داد. برای اندازه گیری پارامتر مذکور در دماهای بالاتر از دمای اتاق، مستقیماً از گرمکن برای بالا بردن دمای نمونه ها استفاده گردید.

#### ۴-۲- طریقه ی اندازه گیری رسانندگی

برای اندازه گیری رسانندگی الکتریکی باید ولتاژهای بین اتصالات را با شرایط خاصی اندازه گیری کنیم. برای بدست آوردن رسانندگی الکتریکی  $\sigma$  جریان ثابتی از نمونه ها عبور می دهیم. برای این منظور از یک منبع تغذیه ۶ ولتی استفاده می شود. جریان عبوری از نمونه ۱۰ mA می باشد. باید از مقدار جریان کوچک استفاده کرد تا خطای ناشی از گرم شدن نمونه در اثر عبور جریان بزرگ را نداشته باشیم. نمونه تهیه شده که در جای مناسب خود در سیستم زمپا نصب شده است و دارای ۶ اتصال است در مداری مطابق شکل (۵) قرار می گیرد.



شکل ۵ مداری که نمونه مورد بررسی در آن قرار می گیرد.

بعد از عبور جریان از نمونه اختلاف پتانسیل بین نقاط (۳)، (۴) و (۵)، (۶) را اندازه گیری می کنیم و به ترتیب آنها را با  $V_{56}$  و  $V_{34}$  نشان می دهیم. با معکوس کردن جهت جریان  $V_{56}$  و  $V_{34}$  را نیز اندازه گیری می کنیم. معکوس کردن جهت جریان به این دلیل است که خطای ناشی از نامتقارن بودن نمونه و نقص های بلوری را کاهش دهیم. با استفاده از میانگین گیری می توانیم روابط زیر را بنویسیم:

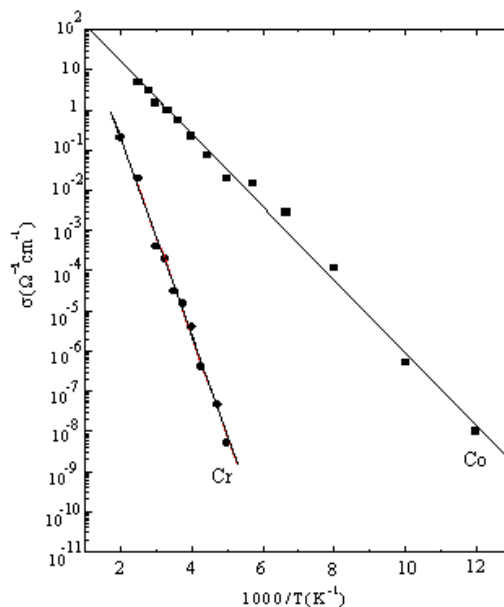
$$\bar{V}_1 = \frac{V_{34} + V_{-34}}{2} \quad (9)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{V_{56} + V_{-56}}{2} \quad (10)$$

## ۷- مراجع

- [1] Gupta, H.C. 1977. Solid state physics. p.247  
 [2] Kittel, C. 1996. Solid state physics. 7th Edition. Wiley, New York.  
 [3] Solymar, L and Walsh, D. 1998. Electrical properties of materials. 6th Edition. Oxford university press.  
 [4] Wolf, H.F. 1971. Semiconductors. Wiley-Interscience. P.278.  
 [5] Bube, R.H. 1992. Electrons in solids. Academic press, New York.  
 [6] Pippard, A.B.1965. The dynamics of conduction electrons. Gordon and Breach, New York.  
 [7] Gupta, H.C. 1977. Solid state physics. p.247.  
 [8] Hummel, Rolf. 2001. Electronic properties of materials. Springer. p.179.  
 [9] Smith, R.A. 1968. Semiconductors. Cambridge at the university press. P. 496.

در فلزات با افزایش دما رسانش الکتریکی کاهش می یابد زیرا با افزایش دما تعداد حاملین در فلزات افزایش نمی یابد بلکه ارتعاشات شبکه ای زیاد می شود و این مسئله باعث پراکندگی بیشتر حاملین بار گشته و مقاومت فلز را افزایش می دهد [۹].



شکل ۸ نمودارهای تغییرات رسانندگی  $\sigma$  بر حسب  $\frac{1000}{T}$  برای دو نمونه ی GaAs آلیپده با Cr و Co

در شکل (۸) منحنی  $\sigma$  بر حسب  $\frac{1000}{T}$  برای هر دو نمونه رسم شده است. با مقایسه ی آنها درمی یابیم که رسانندگی نمونه ی آلیپده با Co از رسانندگی نمونه ی آلیپده با Cr بیشتر است. این موضوع به دلیل ماهیت عناصر Co و Cr می باشد به طوری که Cr بیشترین ناهمگنی را در شبکه GaAs به وجود می آورد در نتیجه باعث پراکندگی شدید حاملین بار شده و رسانندگی نمونه را کاهش می دهد.

## ۶- فهرست علائم

|       |   |
|-------|---|
| $n$   | چگالی حاملین ( $\text{mol}^{-1}$ )              |
| $k_B$ | ثابت بولتزمن ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ) |
| $E_g$ | گاف انرژی (eV)                                  |
| $T$   | دما (K)   |

## علائم یونانی

|          |  |
|----------|--|
| $\mu$    | تحرك پذیری حاملین ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) |
| $\sigma$ | رسانندگی ویژه الکتریکی ( $\text{S m}^{-1}$ )                   |