مطالعه تحرک پذیری حاملین بار در نیمرسانای گالیوم آرسنایدآلاییده با Cr وCo مورد استفاده در سلول های خورشیدی شاتلهای فضایی

حسن خالقی

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

چکیده

گالیوم آرسنید نیمرسانایی از ترکیب ستون های III-V جدول تناوبی است. این نیمرسانا دارای گاف مستقیم ۱/۴۲ eV در دمای اتاق می باشد و از آن استفاده‌ی گسترده‌ای در تکنولوژی و ساخت قطعات نیمرسانا مانند سلول های خورشیدی می شود از این جهت مطالعه ی خواص آن حایز اهمیت است.در این مقاله خواص ترابردی 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 وCo آلاییده شده اند. این ناخالصی ها ناهمگنی زیادی را در شبکه ی GaAs به وجود می آورند و از این لحاظ مکانیزم پراکندگی خاصی را برای حاملین بار در GaAs ایجاد می‌کنند. در این کار تجربی تحرک پذیری حاملین در گستره ی دمایی (۴۰۰-۱۰۰) درجه ی کلوین برای هر سه نمونه مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل بزرگ بودن گاف انرژی GaAs، در بازه ی دمایی فوق رسانش از نوع رسانش غیرذاتی است. با بررسی منحنی های تحرک پذیری حاملها بر حسب دما مشخص شد دو نوع پراکندگی شامل پراکندگی یونی و پراکندگی شبکه ای در نمونه ها دارای اهمیت هستند. به طوری که در دماهای پایین پراکندگی یونها ناخالصی و در دماهای بالا پراکندگی شبکه ای حاکم است.

کلیدواژگان

نیمرسانا، تحرک پذیری، سلول های خورشیدی

The study of the Mobility of charge carriers in Gallium Arsenide semiconductor doped with Cr and Co used in solar cell of space shuttles

Hassan khaleghi

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

Abstract

GaAs is a binary III-V compound semiconductor in the periodic table. Having a direct energy gap of 1.42 eV at room temperature, GaAs is one of the widely used semiconductors in the technology and creation of solid state electronic devices such as solar cells. From this view point, study of the electronic properties of GaAs single crystals is of prime importance. In this experimental work, transport properties 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. Analysis of the temperature dependency of mobility, shows that, two kinds of scattering mechanisms namely, ionic and lattice scatterings are the dominant mechanisms at low and high temperatures, respectively.

Keywords

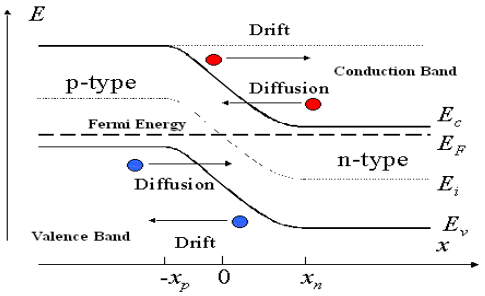
semiconductor, mobility, solar cells

۱- مقدمه

با اتصال یک نیمه هادی نوع p به یک نیمه هادی نوع n ، الکترون‌ها از ناحیه n به ناحیه p و حفره‌ها از ناحیه p به ناحیه n منتقل می‌شوند. با انتقال هر الکترون به ناحیه p، یک یون مثبت در ناحیه n و با انتقال هر حفره به ناحیه n، یک یون منفی در ناحیه p باقی می‌ماند. یون‌های مثبت و منفی میدان الکتریکی داخلی ایجاد می‌کنند که جهت آن از ناحیه n به ناحیه p است. این میدان با انتقال بیشتر باربرها (الکترون‌ها و حفره‌ها)، قوی‌تر و قوی تر شده تا جایی که انتقال خالص باربرها به صفر می‌رسد. در این شرایط ترازهای فرمی دو ناحیه با یکدیگر هم سطح شده‌اند و یک میدان الکتریکی داخلی نیز شکل گرفته‌است.

اگر در چنین شرایطی، نور خورشید به پیوند بتابد، فوتون‌هایی که انرژی آنها از انرژی شکاف نیمه هادی بیشتر است، زوج الکترون-حفره تولید کرده و زوج‌هایی که در ناحیه تهی یا حوالی آن تولید شده‌اند، شانس زیادی دارند که قبل از بازترکیب، توسط میدان داخلی پیوند از هم جدا شوند.

مطابق شکل(۱) میدان الکتریکی، الکترون‌ها را به ناحیه n و حفره‌ها را به ناحیه p سوق می‌دهد. به این ترتیب تراکم بار منفی در ناحیه n و تراکم بار مثبت در ناحیه p زیاد می‌شود. این تراکم بار، به شکل ولتاژی در دو سر پیوند قابل اندازه‌گیری است. اگر دو سر پیوند با یک سیم، به یکدیگر اتصال کوتاه شود، الکترون‌های اضافی ناحیه n، از طریق سیم به ناحیه p رفته و جریان اتصال کوتاهی را شکل می‌دهند. اگر به جای سیم از یک مصرف کننده استفاده شود، عبور جریان از مصرف کننده، به آن انرژی می‌دهد. به این ترتیب انرژی فوتون‌های نور خورشید به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود[۱].



شکل ۱. دیاگرام انرژی سلول خورشیدی

هر چه میدان الکتریکی درون پیوند قوی‌تر باشد، ولتاژ مدار باز بزرگتری بدست می‌آید. برای دست یافتن به یک میدان الکتریکی بزرگ، باید اختلاف ترازهای فرمی دو ماده p و n از یکدیگر زیاد باشد. برای این منظور باید گاف انرژی نیمرسانا بزرگ انتخاب شود؛ بنابراین ولتاژ مدار باز یک سلول خورشیدی با گاف انرژی آن افزایش می‌یابد. اما افزایش گاف انرژی سبب می‌شود، فوتون‌های کمتری توانایی تولید زوج الکترون–حفره داشته باشند و بنابراین جریان اتصال کوتاه کمتری نیز تولید شود؛ بنابراین افزایش گاف انرژی، روی ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول دو اثر متفاوت دارد.

در حال حاضر دو فناوری در ساخت سلول‌های خورشیدی غالب است: فناوری نسل اول بر پایه ویفرهای سیلیکونی با ضخامت ۴۰۰–۳۰۰ میکرومتر است که ساختاری بلوری یا چند بلوری دارند که یا از بریدن شمش بدست می‌آیند یا از روش EFG و با کمک خاصیت موبینگی رشد داده می‌شوند. فناوری نسل دوم یا تکنولوژی لایه نازک، براساس لایه نشانی نیمه هادی روی بسترهای شیشه‌ای، فلزی یا پلیمری است[۲].

هزینه مواد اولیه در تکنولوژی نسل دوم، پایین‌تر است و از آن گذشته، اندازه سلول تا ۱۰۰ برابر بزرگتر از اندازه سلول ساخته شده با تکنولوژی نسل اول است که مزیتی برای تولید انبوه آن محسوب می‌شود. در عوض بازدهی سلول‌های نسل اول، که اغلب سلول‌های بازار را تشکیل می‌دهند، به دلیل کیفیت بالاتر مواد، از بازدهی سلول‌های نسل دوم بیشتر است. انتظار می‌رود اختلاف بازدهی میان سلول‌های دو نسل با گذشت زمان کمتر شده و تکنولوژی نسل دوم جایگزین نسل اول شود[۳].

در سال ۱۹۶۱، Shockley و Queisser با در نظر گرفتن یک سلول خورشیدی پیوندی به شکل یک جسم سیاه با دمای ۳۰۰ کلوین نشان دادند که بیشترین بازدهی یک سلول خورشیدی صرف نظر از نوع تکنولوژی بکار رفته در آن، ۳۰٪ است که در گاف انرژی ۱/۴ الکترون ولت یعنی گاف انرژی گالیم آرسنایدبدست می‌آید. بنابراین بازدهی سلول‌های خورشید نسل اول و دوم حتی در بهترین حالت نمی‌تواند از حوالی ۳۰٪ بیشتر شود. این در حالی است که حد کارنو برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی ۹۵٪ است و این مقدار تقریباً سه برابر بیشتر از بازدهی نهایی سلول‌های نسل اول و دوم است[۴].

بنابراین دستیابی به سلول‌هایی با بازدهی‌هایی دو تا سه برابر بازدهی‌های کنونی، امکان‌پذیر است. سلول‌های خورشیدی که دارای چنین بازدهی‌هایی باشند، نسل سوم سلول‌های خورشیدی نامیده می‌شوند .سلول‌های متوالی، سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی، سلول‌های خورشیدی نقطه کوانتومی، سلول‌های حامل داغ، نسل سوم سلول‌های خورشیدی را تشکیل می‌دهند.

یکی از ضروری‌ترین موارد که باید در مبدل انرژی فتوولتائیک خورشیدی به کار برود تطبیق گاف انرژی با طیف خورشیدی و داشتن قابلیت تحرک پذیری بالا و طول عمر حامل‌ها می‌باشد. مواد نیمرسانای گالیوم آرسنایدد (GaAs)در سلول‌های خورشیدی لایه نازک تک کریستالی استفاده می‌شود. اگرچه سلول‌های GaAs بسیار گران هستند، آنها دارای بهترین بازده در سطح جهانی می‌باشند. بازده سلول خورشیدی تک اتصالی ۲۸/۸٪ می‌باشد. گالیم آرسنایدبیشتر در سلول‌های فتوولتائیک چند اتصالی برای پنل‌های خورشیدی در فضاپیماها استفاده می‌شود، زیرا که صنایع برای نیروی خورشیدی مبتنی بر فضا بازده را به قیمت ترجیح می‌دهند.

۲- تحرک‌پذیری [1] و سرعت سوق [2]

در نیمرسانا هنگامی که یک حامل در معرض میدان الکتریکی قرار می‌گیرد نیروی زیر به آن وارد شده و بسته به نوع حامل (الکترون یا حفره) باعث شتاب آن در جهت مخالف یا موافق امتداد میدان می شود :

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (۱)$$

حامل در خلال زمان بین برخورد با دیگر یون‌ها و شبکه‌ی نیمرسانا سرعتی به دست می‌آورد که تابعی از شدت میدان الکتریکی است. این سرعت به نام «سرعت سوق» شناخته شده است. از بقای اندازه‌حرکت می‌توان نشان داد که سرعت سوق متناسب با میدان الکتریکی اعمالی است و می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\vec{V} = \left(\frac{q\tau_C}{m^*}\right)\vec{E} \qquad (۲)$$

فاکتور تناسب به میانگین زمان آزاد بین برخوردها (τ_C) و جرم موثر الکترون (m^*) بستگی دارد. این فاکتور تناسب تحرک‌پذیری الکترون نامیده شده و به صورت زیر نمایش داده می‌شود :

$$\mu = \frac{q\tau_C}{m^*} \qquad (۳)$$

تحرک پذیری یک پارامتر مهم برای ترابرد حامل است زیرا آن قابلیت حرکت الکترونی را که تحت تاثیر میدان الکتریکی است، نشان می‌دهد. برای مثال، در دمای اتاق تحرک‌پذیری حامل در گالیوم آرسنید تقریباً شش برابر بزرگتر از تحرک‌پذیری حامل در سیلیسیوم است. به همین دلیل قطعات ساخته شده با GaAs می‌توانند با بسامد بیشتری نسبت به Si کار کنند[۵].

۳-آماده سازی نمونه ها و دستگاه اندازه گیری

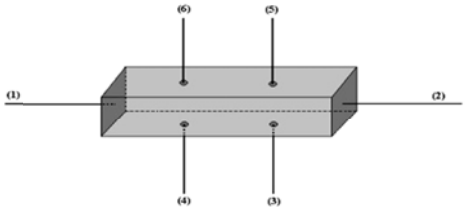
در این مقاله خواص ترابردی تک بلورهای GaAs مورد بررسی واقع شده است. این تک بلورها از نوع p هستند که با عناصر کروم و کوبالت آلاییده شده‌اند. تک بلورهای تحت بررسی به روش بریجمن تهیه و به صورت آماده از آکادمی علوم آذربایجان خریداری شده بودند. پس از برش دادن تک بلورها با استفاده از الماس شیشه‌بری به قطعات کوچک‌تر، وجوه آنها را سمباده زده تا سطحی صاف و یکنواخت پیدا کنند. بعد از این کار نمونه هایی به ابعاد mm^3 (۱/۴×۲/۸×۱۲) و mm^3 (۱/۱×۲/۷×۱۴) 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.

1.Mobility
2.Drift Velocity

نقطه‌ی ذوب فلز ایندیم ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. بنابراین برای دماهای پایین تر از۱۵۰ 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 (۲) نقاط (۵) و (۶) باید بترتیب دقیقاً مقابل نقاط (۳) و(۴) قرار بگیرید.

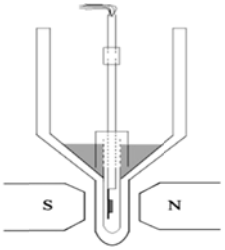


شکل۲. نمونه مورد بررسی با ۶ اتصال

۳-۱- 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 زمپا[1] صورت گیرد. از آنجایی که در این پروژه، سیال سرد کننده ازت مایع می‌باشد حداکثر دمای قابل دسترسی در حوالی نقطه‌ی جوش آن یعنی $77\ K^{\circ}$ است. در بهترین شرایط که به معنی انتخاب ابعاد کوچکی از نمونه و حداقل افت سرمایی می‌باشد به طور عملی به دمایی برابر با $85\ K^{\circ}$ دست یافته‌ایم.

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



شکل۳. زامپای شیشه ای دو جداره

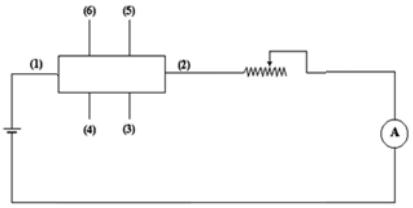
چنانکه از شکل(۳) ملاحظه می‌شود, قسمت بیرونی این زامپا دو جداره بوده و برای جلوگیری از تبخیر سریع ازت مایع که برای سرمایش نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد, هوای داخل آن تا فشار 5×10^{-6} تور تخلیه شده است. قسمت داخلی آن از یک لوله شیشه‌ای به قطر ۹ میلیمتراز همان جنس جهت قرار دادن پروب که حامل نمونه, گرمکن الکتریکی, ترموکوپل و سیم‌های اتصال می‌باشد, ساخته شده است.

برای ساخت گرمکن الکتریکی از لایه‌های نازک میکا و سیم تسمه‌ای کروم- نیکل استفاده گردید. مقاومت گرمکن برابر ۸ اهم بوده و جریان‌های مختلفی تا ۳ آمپر و یا بیشتر را می‌توان 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 می‌تواند برای بالا بردن دمای نمونه، تولید کند.

نحوه‌ی 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 می‌ریزیم. بلافاصله ترموکوپل کاهش دمای نمونه را نشان می‌دهد. در این زمپا از ترموکوپل‌های مس - کنستانتن استفاده شده است. با ریختن ازت مایع , دمای نمونه را می توان تا دمای نزدیک به $85\ K^{\circ}$ پایین برد. ابتدا می‌توان با ریختن مقداری ازت خود نمونه را مستقیماً در معرض ازت مایع قرار داده سپس با عبور جریان‌های الکتریکی مختلف از گرمکن, می‌توان دمای نمونه را تغییر داده و وابستگی دمای تحرک پذیری نمونه را مورد مطالعه قرارداد. برای اندازه‌گیری پارامتر مذکور در دماهای بالاتر از دمای اتاق, مستقیماً از گرمکن برای بالا بردن دمای نمونه‌ها استفاده گردید.

۳-۲ طریقه‌ی اندازه‌گیری رسانندگی و ضریب ثابت هال

برای اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی و ضریب هال باید ولتاژهای بین اتصالات را با شرایط خاصی اندازه‌گیری کنیم. برای بدست آوردن رسانندگی الکتریکی σ جریان ثابتی از نمونه‌ها عبور می‌دهیم. برای این منظور از یک منبع تغذیه ۶ ولتی استفاده می‌شود. جریان عبوری از نمونه ۱۰mA می‌باشد. باید از مقدار جریان کوچک استفاده کرد تا خطای ناشی از گرم‌شدن 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 (۴) قرار می‌گیرد.



شکل۴. 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 اندازه‌گیری می‌کنیم و به ترتیب آنها را با V_{56} و V_{34} نشان می‌دهیم. با معکوس کردن جهت جریان V_{-56} و V_{-34} را نیز اندازه‌گیری می‌کنیم. معکوس کردن جهت جریان به این دلیل است که خطای ناشی از نامتقارن بودن نمونه و نقص‌های بلوری را کاهش دهیم. با استفاده از میانگین‌گیری می‌توانیم روابط زیر را بنویسیم:

$$\overline{V_1} = \frac{V_{34} + V_{-34}}{2} \qquad (۴)$$

$$\overline{V_2} = \frac{V_{56} + V_{-56}}{2} \qquad (۵)$$

$$V_{\sigma} = \frac{\overline{V_1} + \overline{V_2}}{2} \qquad (۶)$$

رسانندگی الکتریکی نمونه طبق فرمول بندی زیر بدست می آید:

$$\sigma = \frac{I}{V_{\sigma}} \cdot \frac{l}{s} \qquad (۷)$$

1.Cryostat

l فاصله دو اتصال (۳) , (۴) و یا (۵) , (۶) بوده و s سطح مقطع نمونه است. حال با داشتن مقدار I , V_σ که مقدار ثابتی است, می‌توانیم مقدار σ را محاسبه کنیم.

برای اندازه گیری ولتاژ هال, در حالی که نمونه در دمای ثابت است و از آن جریان معین I عبور می‌کند, میدان مغناطیسی B را برقرار می‌کنیم. در این حالت اختلاف پتانسیل بین سیم‌های (۶), (۴) و (۵) , (۳) را با استفاده از گالوانومتر نوری اندازه‌گیری می‌کنیم .این ولتاژ را با V_{46} و V_{35} نمایش می‌دهیم. با معکوس کردن جهت جریان, ولتاژهای قبلی را دوباره اندازه‌گیری می‌کنیم و آنها را با V_{-46} و V_{-35} نشان می‌دهیم. با استفاده از مقدار میانگین خواهیم داشت:

$$V = \frac{V_{46} + V_{-46}}{2} \qquad (۸)$$

$$V' = \frac{V_{35} + V_{-35}}{2} \qquad (۹)$$

$$V_H = \frac{V + V'}{2} \qquad (۱۰)$$

با مشخص شدن V_H می‌توانیم ضریب ثابت هال را با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه کنیم:

$$R_H = \frac{V_H \times b \times 10^8}{B \times I} \qquad (cm^3 c^{-1}) \qquad (۱۱)$$

b ضخامت نمونه برحسب سانتی‌متر, B میدان مغناطیسی برحسب گوس, V_H ولتاژ هال برحسب میلی‌ولت و I جریان عبوری از نمونه برحسب میلی‌آمپر می‌باشد. با روشن کردن گرمکن و تغییر جریان عبوری از آن می‌توان دمای نمونه را تغییر داد و اندازه‌گیری‌ها را در دماهای مختلف تکرار کرد. برای اندازه‌گیری دما از یک ترموکوپل مس-کنستانتن که بر روی نمونه نصب شده است , استفاده می‌کنیم.

۳-۳- محاسبه تحرک پذیری حاملین بار

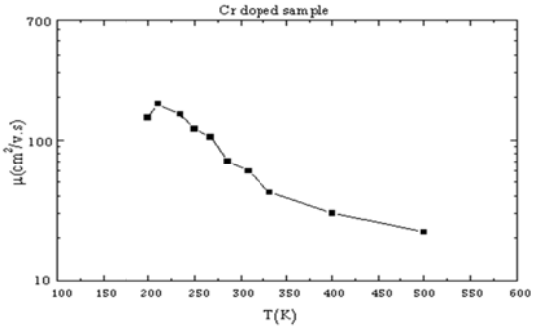
با استفاده از قانون اهم می‌توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$\mu = R_H \cdot \sigma \qquad (۱۲)$$

بنابراین با استفاده از داده‌های تجربی در مورد ضریب هال و رسانندگی الکتریکی می‌توان تحرک‌پذیری را در دماهای مختلف به دست آورد.

۲- نمودار ها و تحلیل آن

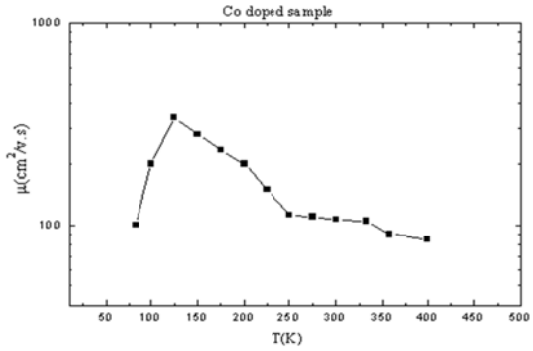
با توجه به منحنی تجربی تحرک پذیری شکل های (۵) و (۶)، در هر دو نمونه‌ی مورد مطالعه مشاهده می‌شود که با افزایش دما تحرک پذیری حاملین به تدریج افزایش یافته تا دمای معینی که به بیشینه مقدار خود رسیده است, بعد از آن با افزایش دما تحرک‌پذیری کاهش یافته است.



شکل ۵. نمودار تغییرات تحرک پذیری تجربی

برحسب دما برای نمونه ی GaAs آلاییده با Cr

در واقع در دماهای پایین تعداد یون‌های ناخالصی زیاد می‌باشد و این یون‌ها باعث پراکندگی شدید حاملین می‌شوند به همین دلیل تحرک‌پذیری آنها را کاهش می‌دهند. به تدریج که دما افزایش می‌یابد الکترون‌های موجود در باند ظرفیت، انرژی کافی برای برانگیخته شدن به ترازهای ناخالصی را بدست می‌آورند و به این ترتیب یون‌های ناخالصی را بتدریج خنثی می‌کنند. بنابراین با افزایش دما از تعداد این یون‌ها و در نتیجه از تعداد مراکز پراکندگی کاسته می‌شود. به همین دلیل تحرک‌پذیری حامل‌ها تا دمای معینی که اکثریت یون‌ها خنثی شده‌اند, افزایش می‌یابد و به بیشینه مقدار خود می‌رسد[۶].



شکل ۶. نمودار تغییرات تحرک پذیری تجربی

برحسب دما برای نمونه ی GaAs آلاییده با Co

بعد از این دما، اتم‌های شبکه بلور در اثر بدست آوردن انرژی گرمایی شروع به ارتعاش می‌کنند و این ارتعاشات شبکه باعث پراکندگی شدید حاملین می‌شود. هر چه دما بیشتر شود ارتعاشات شبکه نیز بیشتر می‌شود، درنتیجه تحرک‌پذیری کاهش می‌یابد. بنابراین در دماهای پایین پراکندگی حاصل از یونهای ناخالصی و در دماهای بالا پراکندگی ناشی از ارتعاشات شبکه‌ای حاکم است.

۳- مراجع

[1] Kano, Kanaan. 1988. *Semiconductor devices.* Prentice-Hall, Inc.

[2] J.F. Randall, *Designing Indoor Solar Products – Photovoltaic Technologies for AES*, John Willey & Sons, 2005.

[3] M.A. Green, *Physica E 14* (2002) 65-70.

[4] M.A. Green, *Solar Cells Operating Principles ,Technology and System Applications*, Prentice-Hall, 1986.

[5] Hummel, Rolf . 2001. *Electronic properties of materials*. Springer. p.51.

[6] Saxena,T.K., Bala, Shashi. 1980. *Electron transport in heavily doped and compensated n-type GaAs in the temperature rang 2.4-300 K.* Phe. Rev. B. Vol 22. No 6 (2962).