مطالعه برخی خواص الکتریکی و ترموالکتریکی ترکیب $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ بهازای دو مول درصد مختلف x=۰/۵ و x=۱ در محدوده دمایی K(۱۰۰-۴۰۰)

حسن بیدادی — استاد دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه تبریز
مرتضی فراهانی — کارشناس ارشد دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه تبریز

چکیده

در این کار تجربی ابتدا نمونههای بسبلور ترکیب سهتایی $InGaTe_2$ و ترکیب دوتایی PbTe سنتز و سپس با در نظر گرفتن جرمهای اتمی ترکیبات فوق، مقادیر معینی از PbTe و $InGaTe_2$ (بهعنوان ناخالصی) با هم مخلوط و دو نوع ترکیب با فرمول $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ بهترتیب با مول درصدهای x=۰/۵ و x=۱ سنتز گردید. در مرحله بعد، با استفاده از یک زمپا، تغییرات قدرت ترموالکتریک (α) و رسانندگی الکتریکی (σ) نمونهها برحسب دما بررسی و با استفاده از روش الکتریکی- گرمایی، گاف انرژی برای دو ترکیب فوق استنتاج و همچنین تغییرات آن برحسب مول درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان میدهد که ترکیب PbTe خالص یک نیمرسانای نوع p میباشد ولی با اضافه کردن x=۰/۵ و x=۱ مول درصد از ترکیب $InGaTe_2$ به آن، نوع رسانندگی از p به n تغییر میکند. گاف انرژی PbTe با افزایش درصد ناخالصی $InGaTe_2$ افزایش پیدا میکند. افزایش ناخالصی تا یک مقدار مشخص (حدود ۰/۵ درصد مولی) موجب افزایش رسانندگی الکتریکی شده و افزایش بیشتر از آن موجب کاهش رسانندگی الکتریکی میگردد. قدرت ترموالکتریکی با افزایش دما افزایش مییابد و مقدار بیشینه آن برای ترکیبی که ناخالصی آن کمتر میباشد، بیشتر است.

کلمات کلیدی: بسبلور، رسانندگی الکتریکی، قدرت ترموالکتریک، گاف انرژی.

Study of Some Electric and Thermoelectric Properties of the Composition $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ for Two Different Mole Percentages of x=0.5 and x=1, in the Temperature Range (100-400) K

H. Bidadi and M. Farahani
Faculty of Physics, Tabriz University, Tabriz, Iran

Abstract

In this experimental work, the polycrystalline samples of ternary compound $InGaTe_2$ and binary compound PbTe were initially synthesized and then by grinding and mixing given amounts of PbTe and $InGaTe_2$ (as impurity), two types of compounds given by the formula $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ having two different mole percentages of x=0.5 and x=1 were synthesized, respectively. By studying the variations of thermoelectric power (α) and electrical conductivity (σ) of samples versus the temperature, the values of energy gap for the above two compounds were evaluated. Experimental results show that, the pure PbTe is a typical p type semiconductor, but introducing the ternary compound $InGaTe_2$ into the crystal, its conductivity changes from p to n. The energy gap of PbTe is increased by increasing the mole percentage of the $InGaTe_2$ impurity. Increasing the impurity content, up to x=0.5 mole percent causes the conductivity to increase, but further increase of the impurity content, causes the conductivity to decrease. Thermoelectric power increases with the temperature and its maximum value is larger for the compound with lesser impurity content.

Key words: Polycrystal, Electrical conductivity, Thermoelectric power, Energy gap.

۱- مقدمه

با توجه بهاینکه نیمرساناهای گروه IV-VI بهویژه دو نیمرسانای PbSe و PbTe جزو نیمرساناهای گاف باریک هستند و در ساخت مولدها و مبردهای ترموالکتریک، لیزرهای مادون قرمز و مخصوصاً در آشکارسازهای امواج مادون قرمز در محدوده طول موجی (۵-۴) میکرون بهطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۲]، در این مقاله ابتدا روش سنتز بسبلورهای PbTe و $InGaTe_2$ و ترکیب $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ با دو مول درصد x=۰/۵ و x=۱ بهاختصار تشریح و سپس تغییرات رسانندگی الکتریکی (σ) و قدرت ترموالکتریک (α) نمونهها برحسب دما و نیز تغییرات گاف انرژی نمونهها برحسب مول درصد ناخالصی $InGaTe_2$ ارائه شده است.

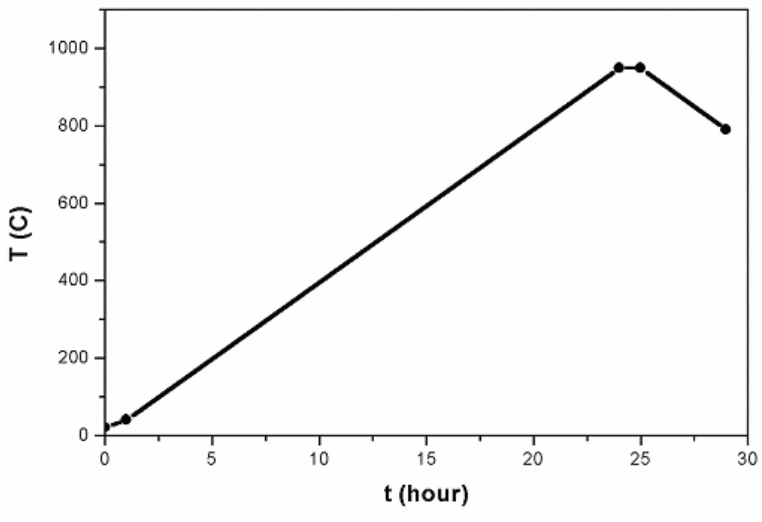
۲- روشهای تجربی

در این بخش خلاصهای از روشهای سنتز بسبلورهای PbTe و $InGaTe_2$، روش آلایش PbTe با درصدهای مختلفی از $InGaTe_2$، روش آمادهسازی نمونهها و روشهای تجربی بهکار رفته جهت اندازهگیری الکتریکی (σ) و نیروی الکتروموتوری حرارتی $\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta T}$ ارائه می‌شود.

برای تهیه ترکیبهای PbTe، $InGaTe_2$ و $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ با دو مول درصد مختلف x=۰/۵ و x=۱ ، از عناصر اولیه سرب، تلور، ایندیم و گالیم با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹ با در نظر گرفتن جرم ملکولی آنها، استفاده گردید. مواد پس از توزین با ترازوی دقیق دیجیتالی در کپسولهائی از جنس کوارتز که قبلاً با استفاده از محلول اسید سولفوکرومیک (۵ گرم $K_2Cr_2O_7$ + ۵ میلی‌لیتر آب مقطر +۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ) و آب مقطر تمیز و خشک شده بودند، ریخته و هوای داخل کپسولهای کوارتز تا فشار 10^{-4} میلی‌متر جیوه تخلیه و سپس سر آنها با استفاده از شعله مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن مسدود گردید. برای سنتز ترکیبهای PbTe، $InGaTe_2$ و $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ بازای x=۰/۵ و x=۱ مول درصد، کپسولهای مربوطه در کورهٔ سنتز که دمای آن با ترموکوپل کرومل- آلومل کنترل می‌شد، قرار داده شد. کورهٔ سنتز قادر بود حول یک محور افقی که از وسط کوره عبور می‌کرد به اندازه ۴۵ درجه یا بیشتر نسبت به محور قایم به سمت چپ و راست نوسان نماید. برای کنترل اتوماتیک دمای کوره سنتز، از یک سیستم کنترل کننده دما که قادر بود با آهنگهای مورد نظر دمای کوره را بالا و یا پایین ببرد، استفاده گردید. برای سنتز PbTe از آهنگ افزایشی ۴۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت استفاده و دمای کوره تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت. در این دما که پس از ۲۵ ساعت حاصل گردید، کوره بهمدت یک ساعت به نوسان در آمد و پس از بهمزدن کامل مذاب با همین آهنگ ۴۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت، دمای کوره کاهش داده شد تا به دمای اتاق برسد. رژیم دمایی کوره برای سنتز PbTe در جدول (۱) و نمودار رژیم دمایی کوره برحسب زمان در شکل (۱) داده شده است.

جدول ۱- تغییرات دمای کوره برحسب زمان برای سنتز PbTe

ردیف	زمان (ساعت)	دمای کوره °C
۰	۸/۵	دمای اتاق ۲۰
۱	۹/۵	۴۰
۲	۱۰/۵	۸۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۱۷	۱/۵	۶۸۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۲۴	۸/۵	۹۵۰
۲۵	۹/۵	۹۵۰
۲۶	۱۰/۵	۹۱۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۴۱	۱/۵	۳۱۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۴۸	۸/۵	۳۰



شکل ۱- نمودار رژیم دمایی کوره برحسب زمان

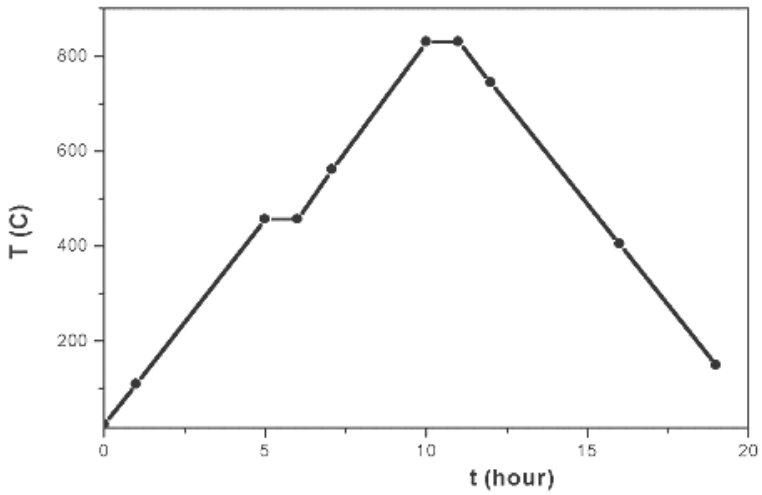
برای سنتز $InGaTe_2$، دمای کوره سنتز روی ۴۵۷ درجه سانتی‌گراد که بالاتر از نقاط ذوب هر سه عنصر (In, Ga, Te) بهطور منفرد است، تنظیم گردید. در این دما بهمدت یک ساعت به کوره حرکت نوسانی داده شد تا عناصر در حالت مذاب بهطور یکنواخت با هم مخلوط شوند. سپس دمای کوره مجدداً افزایش داده شد تا دما به ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد برابر نقطه ذوب ترکیب $InGaTe_2$ برسد. در این دما مجدداً یک ساعت به کوره حرکت نوسانی داده و سپس به آرامی درجه حرارت آن کاهش داده شد. چگونگی انجام این سنتز در جدول (۲) و نمودار رژیم دمایی کوره برحسب زمان در شکل (۲) نشان داده شده است.

سنتز بسلورهای $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ با مول درصد x=۰/۵ نیز مشابه با سنتز بسلورهای قبلی پس از توزین مقادیر معینی از مواد PbTe و $InGaTe_2$ و قرار دادن آنها در کپسول کوارتز و سپس در کوره سنتز انجام گرفت. مراحل مختلف سنتز در جدول (۳) و نمودار رژیم دمایی کوره برحسب زمان در شکل (۳) نشان داده شده است.

چنانچه از شکل (۳) ملاحظه می‌شود، پس از رسیدن دمای کوره به ۹۴۵°C، سیستم نوسانی بهمدت یک ساعت بهکار افتاده است تا مواد داخل کپسول بهخوبی مخلوط شوند. با توجه بهجدول (۳)، مشاهده می‌شود که برای رساندن دما به ۹۴۵°C، از آهنگهای افزایشی ۴۰، ۱۶۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت و برای کاهش دما فقط از آهنگ ۴۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت استفاده شده است.

جدول ۲- تغییرات دمای کوره برحسب زمان برای سنتز $InGaTe_2$

ردیف	زمان (ساعت)	دمای کوره °C
۰	۸	دمای اتاق ۲۵
۱	۹	۱۱۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۵	۱۳	۴۵۷
۶	۱۴	۴۵۷
۷	۱۵	۵۶۷
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۱۰	۱۸	۸۳۰
۱۱	۱۹	۸۳۰
۱۲	۲۰	۷۲۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۱۶	۲۴	۴۸۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۰	۰	۰
۱۹	۳	۲۸۰
۰	۰	
۰	۰	دمای اتاق
۰	۰	



شکل ۲- نمودار رژیم دمایی کوره برحسب زمان

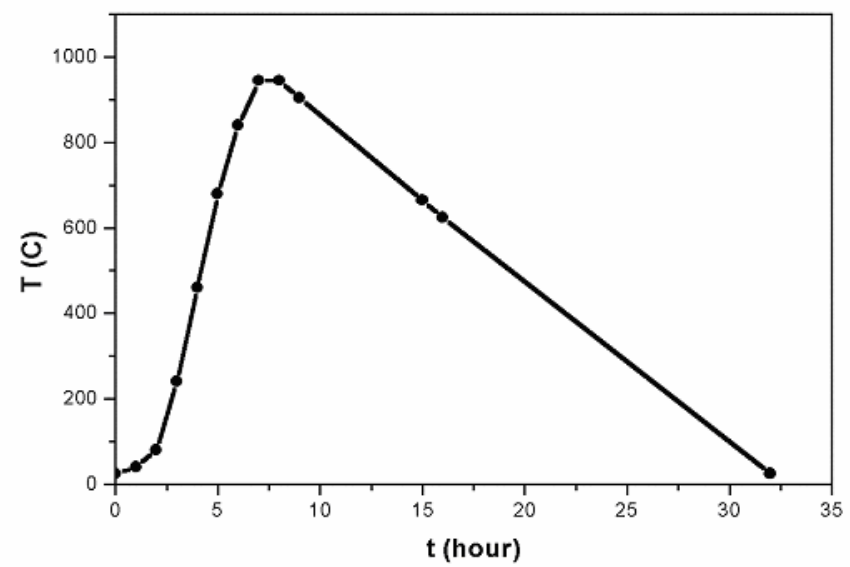
جدول ۳- تغییرات دمای کوره برحسب زمان برای سنتز بسبلور $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ با مول درصد x=۰/۵

ردیف	زمان (ساعت)	دمای کوره °C
۰	۹	دمای اتاق۲۵
۱	۱۰	۴۰
۲	۱۱	۸۰
۳	۱۲	۲۴۰
۴	۱۳	۴۶۰
۵	۱۴	۶۸۰
۶	۱۵	۸۴۰
۷	۱۶	۹۴۵
۸	۱۷	۹۴۵
۹	۱۸	۹۰۵
.	.	.
.	.	.
.	.	.
۱۵	۲۴	۶۶۵
۱۶	۱	۶۲۵
.	.	.
.	.	.
.	.	.
۳۲	۱۷	۲۵

سنتز بسبلورهای $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ با مول درصد x=۱ کاملاً مشابه با سنتز همان ترکیب با مول درصد x=۰/۵ بوده و تنها رژیم دمایی یک مقدار جزئی تغییر می‌کند. در این حالت، دستگاه کنترل کننده دما روی ۹۴۰°C و آهنگ افزایش دما ۱۶۰ درجه سانتیگراد بر ساعت و آهنگ کاهشی دمای کوره ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد بر ساعت تنظیم شده است.

فرایند پخت (تابکاری) نمونهها در دمای ثابت ۶۰۰°C در یک کوره ساخت شرکت اکساتیون به مدت طولانی ۱۰ شبانهروز و کاهش تدریجی دمای ترکیب تا دمای اتاق انجام گرفت. پس از فرایند پخت، بسبلورهای حاصله با استفاده از دستگاه برش بلور برش داده شده و نمونههایی به اندازههای مورد نیاز تهیه شدند. برای آمادهسازی نمونهها از لحاظ صافی سطح و ضخامت، کاغذهای سنباده با درجات زبری مختلف مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین نوع حاملین بار از دستگاهی که به همین منظور ساخته شده است، استفاده گردید. ابتدا برای حصول اطمینان از اینکه دستگاه بهدرستی کار می‌کند، یک نمونه معلوم از Bi_2Te_3 را که نوع حاملهای آن مشخص بود (از نوع p) روی دستگاه سوار و با انحراف عقربه گالوانومتر به سمت راست مشخص شد که انحراف به سمت راست نشان دهنده نیمرسانای نـوع p و انحراف به چپ مشخص کننده نیمرسانای نـوع n می‌باشد.

این آزمایش نشان داد که نمونههای $(PbTe)_{1-x}(InGaTe_2)_x$ تهیه شده با مول درصدهای مختلف x=۰/۵ و x=۱ هر دو از نوع n بوده و با شماره های ۱ و ۲ مشخص شدند.

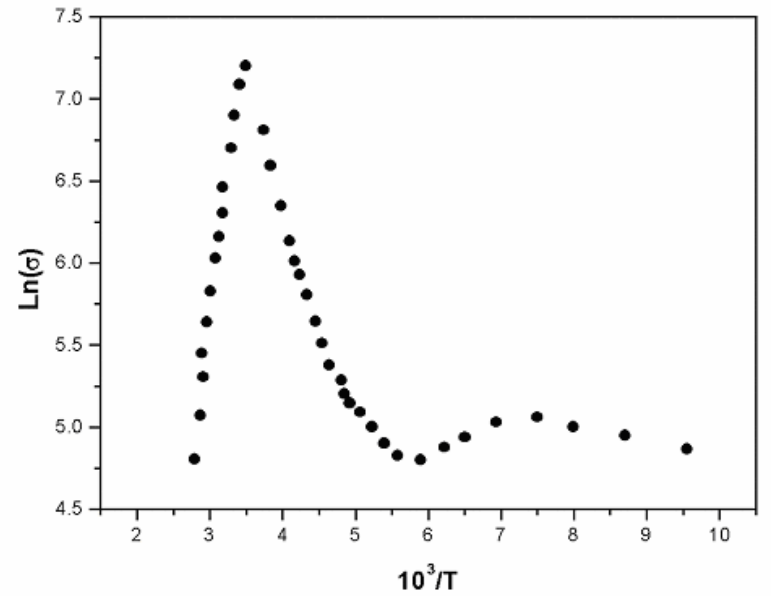


شکل ۳- نمودار رژیم دمایی کوره برحسب زمان

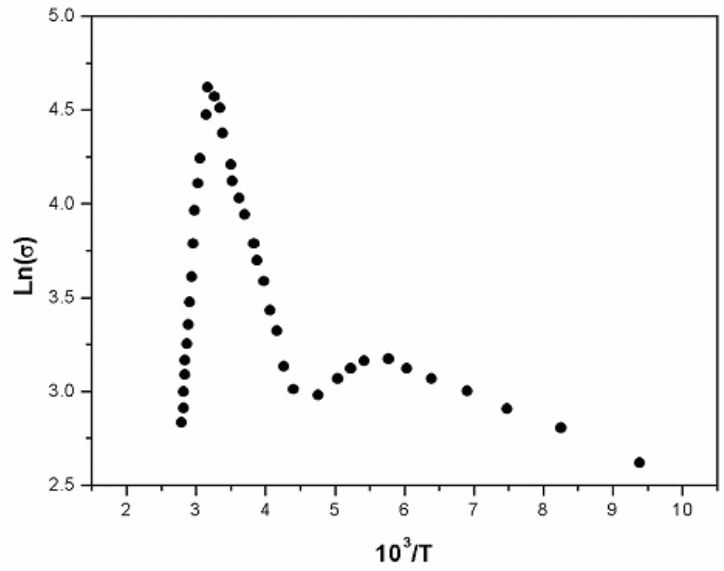
برای اندازهگیری رسانندگی الکتریکی (σ) و نیروی الکتروموتوری حرارتی (α) از یک زمپا ساخت کشور روسیه که قادر بود با استفاده از ازت مایع دمای نمونه را تا ۹۰ درجه کلوین پایین برده و یا با استفاده از یک گرمکن الکتریکی دمای نمونه را تا ۴۵۰ درجه کلوین بالا ببرد، استفاده گردید. اتصال سیمها از جنس مولیبدون به نمونهها با استفاده از تخلیه الکتریکی یک خازن ۲۵۰ میکروفارادی صورت گرفت. برای اندازهگیری دمای نمونهها از ترموکوپلهای کرومل- آلومل استفاده گردید.

۳- نتایج تجربی و بحث

تغییرات $Ln\sigma$ برحسب $\frac{1}{T}$ برای نمونههای ۱ و ۲ در شکلهای (۴) و (۵) داده شدهاند.



شکل ۴- منحنی تغییرات $Ln\sigma$ برحسب $\frac{1}{T}$ برای نمونهٔ شمارهٔ (۱)



شکل ۵- منحنی تغییرات $Ln\sigma$ برحسب $\frac{1}{T}$ برای نمونهٔ شمارهٔ (۲)

چنانکه ملاحظه می‌شود، این نمودارها مشخصه یک نیمرسانای نوعی را نشان می‌دهند، نیمرسانایی که علاوه بر دارا بودن رسانش ذاتی، دارای رسانش غیر ذاتی نیز می‌باشد. یکی از روشهای تعیین گاف انرژی در نیمرساناها، استفاده از وابستگی رسانش ذاتی به دما است که ما از این روش برای تعیین گاف انرژی نمونهها استفاده کردهایم. این روش به نام روش الکتریکی- گرمایی بوده و غالباً ناشی از وابستگی شدید چگالی حاملها به دما است [۳].

رسانندگی الکتریکی متناسب با چگالی حاملها و چگالی حاملها متناسب با $\exp(-\frac{\varepsilon_g}{2k_BT})$ است، بطوریکه می‌توان نوشت:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\frac{\varepsilon_g}{2k_BT})$$

که در آن σ_0 تابعی از $T^{3/2}$ و ابعاد نمونه می‌باشد. بنابراین با توجه به معادله اخیر و با ترسیم $Ln\sigma$ برحسب $\frac{1}{T}$ و بهدست آوردن شیب منحنی حاصله، گاف انرژی ε_g قابل محاسبه است. در تعیین مقدار گاف انرژی به روش الکتریکی- گرمایی دو تقریب بهکار برده می‌شود:

۱) از اثر جمله $T^{3/2}$ در مقابل جمله نمایی $\exp(-\frac{\varepsilon_g}{2k_BT})$ صرفنظر می‌شود.

۲) تغییرات اندازه گاف انرژی با دما کوچک است یا اینکه گاف انرژی ثابت فرض می‌شود.

گاف انرژی در نیمرساناها وابسته به دما است و در حدود ده درصد بین صفر کلوین تا دمای اتاق تغییرات دارد. دو دلیل اصلی برای تغییر گاف انرژی در اثر تغییر دما وجود دارد:

۱- تغییر پتانسیل تناوبی شبکه (که الکترونها احساس می‌کنند) در اثر انبساط حرارتی.

۲- اثر نوسانات شبکه روی ساختار نوار انرژی [۴].

چنانکه از شکلهای (۴) و (۵) ملاحظه می‌شود، در دماهای خیلی پایین با افزایش دما رسانندگی با یک آهنگ کندی افزایش می‌یابد که این ناشی از افزایش چگالی حاملهای آزاد یعنی الکترونها (چون نمونهها نوع n هستند) در اثر یونیزاسیون ناخالصیهای دهنده می‌باشد. وقتی دما بالاتر می‌رود، یونیزاسیون ناخالصی‌ها به حالت اشباع می‌رسد، یعنی همه اتمهای ناخالصي دهنده یونیده شده و الکترونهایشان را آزاد می‌کنند. دمای اشباع یونش اتمهای ناخالصی دهنده برای نمونه شماره (۱) $T = 133K$ و برای نمونه شماره (۲) $T = 173K$ می‌باشد. وقتی دما از دمای اشباع هم بالاتر برود، در بازه کوچکی از افزایش دما که چگالی حاملهای آزاد مستقل از دما بوده و هنوز حاملهای ذاتی شروع به آزاد شدن نکردهاند، رسانش نیمرسانا فقط به تحرک حاملها بستگی دارد. بنابراین در این بازه دمایی،

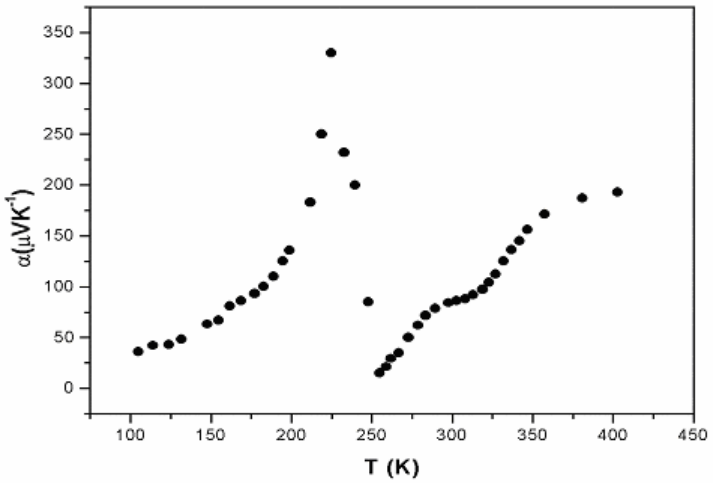
به علت نوسانات گرمایی شبکه، پراکندگی الکترونها افزایش یافته و باعث کاهش رسانندگی الکتریکی می‌شود که از شکلهای فوق دیده می‌شود. بازههای دمایی ذکر شده برای نمونه شماره (۱) $T=(133-170)K^{\circ}$ و برای نمونه شماره (۲)، $T=(173-222)K$ می‌باشد. اگر دما را بیشتر افزایش دهیم در منطقه رسانش ذاتی که برای نمونه شماره (۱) $T=170^{\circ}K$ و برای نمونه شماره (۲) $T=222^{\circ}K$ می‌باشد، رسانندگی الکتریکی با آهنگ کندی افزایش پیدا می‌کند. در این منطقه، چگالی حاملهای ذاتی بهطور نمایی افزایش می‌یابد در حالیکه تحرک حاملها با یک تابع توانی کاهش می‌یابد.

گافهای انرژی ذاتی و غیر ذاتی برای نمونههای شماره (۱) و (۲) بهترتیب:

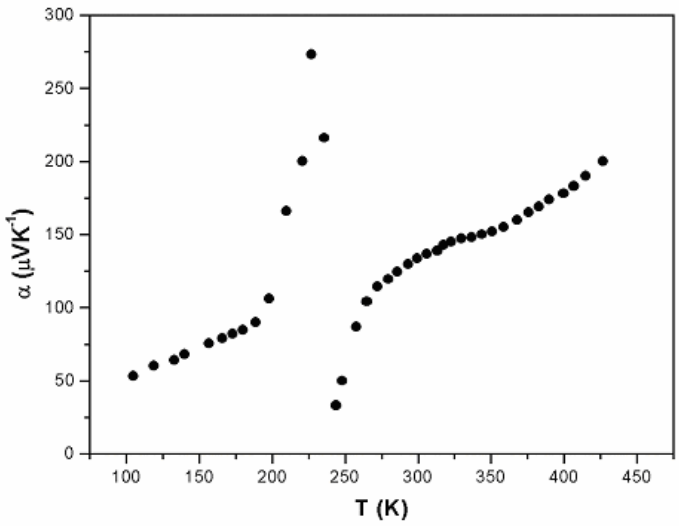
$$\varepsilon_{g1}=0.34eV, \varepsilon_{d1}=0.028eV,$$
$$\varepsilon_{g2}=0.38eV, \varepsilon_{d2}=0.035eV$$

برآورد گردید.

تغییرات قدرت ترموالکتریک (ضریب زیبک) برحسب دما برای دو نمونه ۱ و ۲ در شکلهای (۶) و (۷) داده شدهاند.



شکل ۶- منحنی تغییرات ضریب ترموالکتریک α برحسب T برای نمونهٔ شمارهٔ (۱)

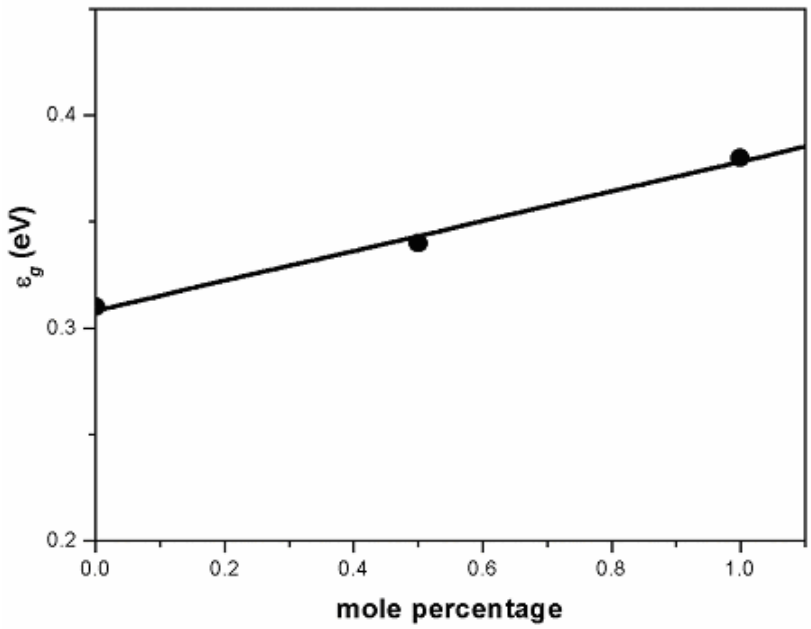


شکل ۷- منحنی تغییرات ضریب ترموالکتریک α برحسب T برای نمونهٔ شمارهٔ (۲)

از این نمودارها ملاحظه می‌شود که با افزایش دما قدرت ترموالکتریک افزایش می‌یابد، اما این افزایش در دماهای پایین دارای شیب کند و در دماهای بالا دارای شیب تند است.

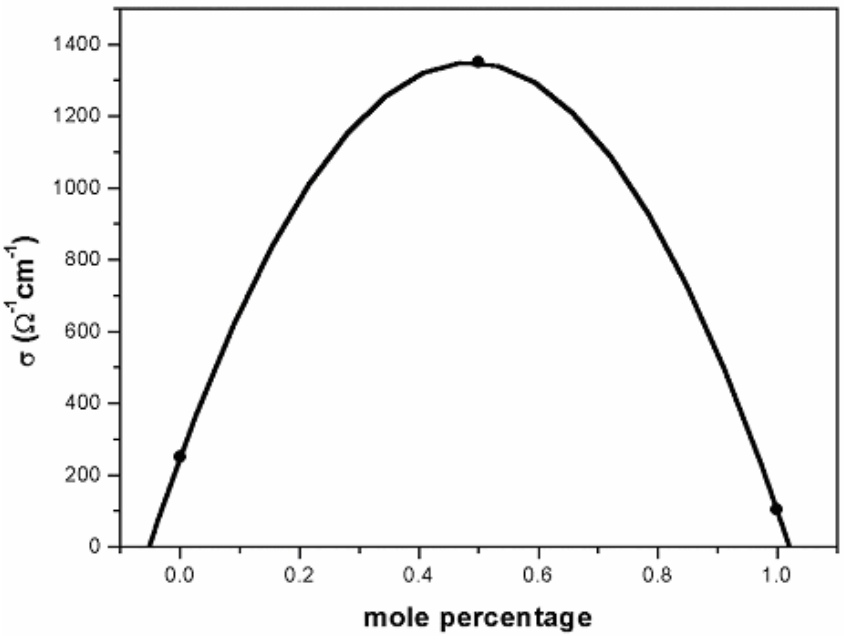
در دماهای پایین که افزایش کند α را مشاهده می‌کنیم، الکترونهای اتمهای ناخالصی در حال آزاد شدن می‌باشند. چون تعداد اتمهای ناخالصی نسبت به اتمهای ذاتی کم است یا بعبارت دیگر تعداد الکترونهای ناشی از ناخالصیها نسبت بهالکترونهای ذاتی کم می‌باشد، پس انتظار می‌رود که وقتی الکترونهای اتمهای ناخالصی در حال آزاد شدن می‌باشند، افزایش کند α را داشته و وقتی آزاد شدن الکترونهای ذاتی شروع می‌شود، افزایش تند α را مشاهده کنیم. ضمناً از شکلهای مذکور دیده می‌شود که آهنگ افزایش α با دمای T برای نمونه شماره (۱) نسبت به شماره (۲) تندتر می‌باشد، زیرا گاف انرژی برای نمونه شماره (۱) کمتر از گاف انرژی برای نمونه شماره (۲) است. همچنین وقتی قدرت ترموالکتریک $(\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta T})$ به بیشینه خود می‌رسد افت بسیار سریع و تندی را نشان می‌دهد و این بدان علت است که در روابط فوق در دماهای پایین ΔE مثبت است و وقتی دما افزایش می‌یابد، ΔE تغییر علامت می‌دهد و برای تغییر علامت باید به یک مقدار مینیمم برسد. پس برای تغییر علامت، افت سریعی در ΔE و در نتیجه در α خواهیم داشت و دوباره α با یک آهنگ تقریباً ثابت افزایش می‌یابد.

تغییرات گاف انرژی و رسانندگی برحسب مول درصد بهترتیب در شکلهای (۸) و (۹) داده شده‌اند.



شکل ۸- نمودار تغییرات گاف انرژی ε_g برحسب مول درصد

از شکل (۸) ملاحظه می‌شود که با افزایش ناخالصی، گاف انرژی افزایش می‌یابد. علت افزایش گاف انرژی PbTe با افزایش درصد ناخالصی، بزرگ بودن گاف انرژی $InGaTe_2$ است. چنانکه از شکل (۹) ملاحظه می‌شود، رسانندگی الکتریکی برای PbTe خالص برابر $\Omega^{-1}Cm^{-1}$ ۲۵۰ بوده و در اثر افزایش ناخالصی به اندازه x=۰/۵ مول درصد برای نمونه شماره (۱) به مقدار $\Omega^{-1}Cm^{-1}$ ۱۳۵۰ رسیده و در نمونه شماره (۲) که x=۱ مول درصد می‌باشد، کاهش رسانندگی تا مقدار $\Omega^{-1}Cm^{-1}$ ۱۰۴ مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که افزایش اولیه در رسانندگی الکتریکی مربوط به افزایش حاملهای آزاد در اثر افزایش ناخالصی از صفر تا ۰/۵ مول درصد بوده و کاهش آن در نمونه شماره (۲) با میزان ناخالصی x=۱ مول درصد، بهعلت کاهش تحرک حاملها در اثر افزایش تعداد مراکز پراکندگی یونهای ناخالصی است.



شکل ۹- منحنی تغییرات رسانندگی الکتریکی σ برحسب مول درصد

۴- نتیجهگیری

۱- ترکیب PbTe خالص یک نیمرسانای نوع p می‌باشد، ولی با اضافه کردن نیم و یک مول درصد از ترکیب $InGaTe_2$ به PbTe خالص، نوع حاملین بار از p به n تغییر می‌کند.

۲- با دخالت ناخالصی $InGaTe_2$ و افزایش مقدار آن به ترکیب خالص PbTe معلوم گردید که گاف انرژی افزایش می‌یابد، بطوری که گاف انرژی بـرای ترکیـب PbTe خالص در حدود ۰/۳۱eV بوده و در نمونههای شماره (۱) و شماره (۲) بهترتیب مقادیر ۰/۳۴eV و ۰/۳۸eV محاسبه شدهاند.

۳- از منحنی تغییرات رسانندگی الکتریکی برحسب مول درصد یعنی شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ناخالصی تا حد معینی باعث افزایش رسانندگی الکتریکی و بیشتر از آن کاهش رسانندگی الکتریکی را سبب می‌شود.

۴- از منحنی‌های مربوط بهضریب ترموالکتریک α یعنی اشکال (۶) و (۷) می‌توان نتیجه گرفت که قدرت ترموالکتریک با افزایش دما افزایش می‌یابد و مقدار بیشینه برای ترکیب شماره (۱) که میزان درصد ناخالصی آن کمتر می‌باشد، بیشتر است.

مراجع

[1] V. Hinkel et al. Phys. Rev., Vol. 40, No. 8, (1989), pp, 372-380.

[2] M. Orihashi, T. Kaibe, and A. Nishida, Materials Transaction, JIM, Vol. 39, No. 6, (1998), pp. 672-678.

[3] B. M. Tareev, N. V. Korslhova, V. M. Petrov and A. A. Preobraghensky, Electrical and radio engineering materials, Mir Publishers, Moscow, 1980.

[۴] مبانی قطعات نیمرسانا (ترجمه ناصر تجبر) مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۰.