



طراحی و ساخت ترموپیل لایه نازک Bi-Cu و Bi-Sb به روش چندلایه‌ای برای آشکارسازی پرتوهای حرارتی فروسرخ

رضا افضل زاده*، سید رضا طباطبایی بفرولی

گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

چکیده: ترموپیل‌های لایه نازک برای ساخت انواع حسگرهای بسیار کوچک، به ویژه برای آشکارسازی پرتوهای حرارتی فروسرخ (IR) کاربرد فراوان دارند. در این مقاله نحوه طراحی و ساخت ترموپیل‌های لایه نازک Bi-Cu به صورت خطی و به روش تک لایه با ۸ و ۱۱ اتصال سری، همچنین طراحی و ساخت ترموپیل‌های لایه نازک Bi-Sb و Bi-Cu دایره‌ای شکل به روش چند لایه‌ای با ۱۰۰ اتصال سری به عنوان آشکارساز فروسرخ عرضه شده است. در این مقاله، زیرلایه‌ای متشکل از الیاف شیشه‌ای که دو طرف آن را لایه مسی پوشانده بکار رفته است. نتایج آزمایشها نشان می‌دهند این ترموپیل‌ها بسیار حساس و تغییرات ولتاژ خروجی تولید شده که حدود چندین mV است با افزایش دما کاملاً خطی بوده و نسبت به دما بسیار حساس است.

واژه‌های کلیدی: ترموپیل، لایه نازک، بیسموت، آنتیموان، مس، حسگر، ترموکوپل

Design and Fabrication of Thin Film Bi-Sb and Bi-Cu Thermopiles for IR Thermal Radiation Detection

R. Afzalzadeh*, S. R. Tabatabaie Baffroie

Department of physics, K. N. Toosi University of Technology, P.O.Box: 15875- 4416, Tehran - Iran

Abstract: Thin film thermopiles are widely used as small size sensors, in particular to sense infra-red thermal radiations. In this paper a method for designing and fabrication of thin films Bi-Cu thermopiles in linear array of 8 and 11 elements in series and mono-layer is introduced. Also, fabrication of Bi-Sb and Bi-Cu thin film thermopiles, which are used as IR radiation sensors, made in multilayer form with 100 series junctions in circular shape are presented. The samples are fabricated on a PCB board with double-sided copper laminated as a substrate. The results of our measurements show that the output voltage produced due to temperature difference between junctions, is very sensitive and linear to temperature difference.

Keywords: thermopile, thin film, Bi, Sb, Cu, Sensor, thermocouple



۱- مقدمه

یکی از انواع آشکارسازهای فروسرخ که به سبب داشتن مزایای ویژه بسیار مورد توجه قرار گرفته، آشکارساز ترموالکتریکی است که براساس اثر سبک^(۱) کار می کند [۱ و ۲ و ۴]. براساس این اثر، که در ۱۸۲۲ کشف شد، هرگاه دو رسانای مختلف در دو نقطه به یکدیگر متصل شوند و بین نقاط اتصال آنها اختلاف دمای ΔT برقرار شود اختلاف پتانسیلی بین این دو نقطه در مدار ایجاد می شود که با اختلاف دمای بین دو اتصال سرد و گرم و اختلاف ضرایب سبک دو ماده متناسب است. در گذشته، برای ساخت ترموپیل، سیمهای نازک بکار می رفت اما پیشرفت دستگاههای ایجاد خلاء و روشهای لایه نشانی، همچنین کشف مواد جدید با ضریب سبک بالا باعث توجه روزافزون به ساخت ترموپیل های لایه نازک شده است. ضریب سبک با رابطه $(\mu V/^{\circ}C)$ ، یعنی نسبت تغییر ولتاژ به اختلاف دما تعریف می شود. یکی از مهمترین پارامترهای ترموالکتریکیها عدد شایستگی^(۲) است که با رابطه زیر تعریف می شود:

$$Z_{AB} = \frac{(S_A - S_B)^2}{\left[\left(\frac{\lambda_A}{\sigma_A} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_B}{\sigma_B} \right)^2 \right]^2}$$

که در آن؛ S_A و S_B ضرایبهای سبک، σ_A و σ_B ضریبهای هدایت الکتریکی و λ_A و λ_B ضریبهای هدایت گرمایی دو ماده A و B می باشند [۴]. در این کار پژوهشی ضرایب سبک مواد انتخاب شده برابرند با: $-65 \mu V/^{\circ}C$ و $S_{Bi} = 35 \mu V/^{\circ}C$ و $S_{Cu} = 1/8 \mu V/^{\circ}C$. مثلاً در اتصال مواد انتخاب شده Bi و Sb ، ولتاژ تولید شده به ازای یک درجه سانتیگراد اختلاف دما در دو سر یک اتصال برابر است با $S_{Sb} - S_{Bi} \approx 35 - (-65) = 100 \mu V/^{\circ}C$. اتصال Bi و Sb بالاترین عدد شایستگی در مقایسه با عناصر دیگر را دارد [۵]، همچنین لایه نشانی

پدیده گرما- برقی (ترموالکتریک) به عنوان عامل آشکارسازی و مولد الکتریسته کاربردهای بسیار دارد. برای تولید الکتریسته، می توان با ایجاد اختلاف دما در دو سر کویل های ترموالکتریک و سری کردن تعداد زیادی از آنها (ترموپیل) الکتریسته تولید کرد. یکی از موارد جالب توجه، استفاده از انرژی هسته ای برای تولید حرارتی مستقیم الکتریسته توسط ترموپیل است. به عنوان مثال، از یک مخزن کروی شکل حاوی مواد پرتوزا برای تولید حرارت استفاده شده است تا به وسیله ۱۰۰۰ ترموکوپل، انرژی حرارتی مستقیماً به ۵ کیلووات انرژی الکتریکی تبدیل شود. این مولد دارای قطر خارجی ۲۲۰ سانتی متر و توان ویژه W/Kg ۱۰ و بازدهی حدود ۲ درصد بوده و در ماهواره به کار رفته است [۱]. کاربرد عمده ترموکوپلها در اندازه گیری دما با تماس و بدون تماس با ماده یا محلی است که می خواهند دمای آن را اندازه بگیرند. برای کنترل فرایندهای صنعتی، اندازه گیری غیرتماسی یکی از روشهای مناسبتر و متداول است. علاوه بر این، توسعه و بهبود آشکارسازهای حرارتی سبب شده است که این آشکارسازها در مواردی همچون طیف نگاری فروسرخ، دمانگاری پزشکی، سیستمهای امنیتی و نظامی و موارد دیگر به طور گسترده ای بکار می روند [۲]. اندیشه توسعه حسگرهای فروسرخ در سالهای متمادی بر روی آشکارسازهای لایه نازک نیمه رسانای ترکیبی متمرکز بوده است. این آشکارسازها ابعاد کوچک دارند و پاسخ آنها سریع است، اما فرایند تولید آنها پیچیده بوده و نیاز به فناوری بالایی دارد. عیب عمده این آشکارسازها دمای بسیار پایین کار با آنها است که باعث شده است کاربردهای تجارتي لازم را نیابند [۳].



کرده و ساخته‌ایم. با این تفاوت که به جای استفاده از ماسکهای برنجی از نوار چسب استفاده کرده‌ایم. با این روش، دو ترموپیل ۸ (در عکس نشان داده نشده) و ۱۱ اتصال ساخته شد (شکل ۲) که سطح حساس هر اتصال حدود ۳ میلی مترمربع و فاصله‌های بین اتصالات سرد و گرم به ترتیب ۶ و ۸ سانتی متر منظور شده است. طراحی این ترموپیل‌ها به گونه‌ای صورت گرفت که با لایه‌نشانی

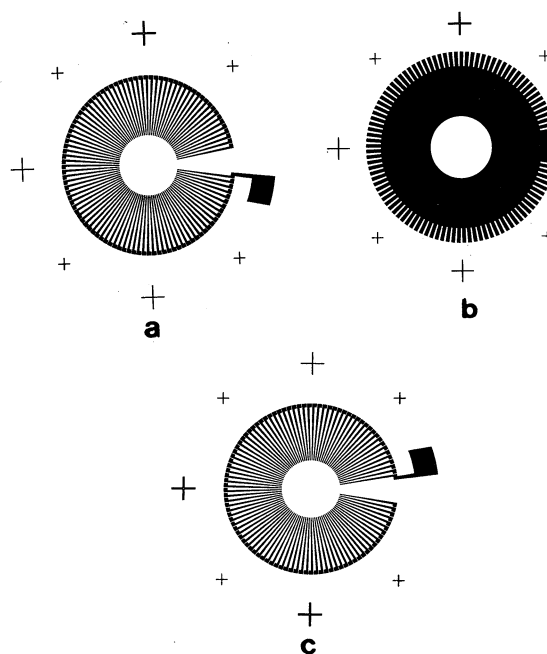
آنها با روش تبخیر گرمایی به آسانی امکان‌پذیر است.

۲- طراحی و ساخت ترموپیل‌ها

ماسکهای مورد استفاده در لیتوگرافی نوری طوری طراحی شده اند که با استفاده از پنجره‌های مناسب، همه اتصالات به طور سری به یکدیگر متصل شوند (شکل ۱)، ترموپیل‌های خطی و تک لایه Bi-Cu را در ابعاد نسبتاً بزرگ، بدون نیاز به لیتوگرافی نوری، با روشی مشابه روش گزارش شده [۶] طراحی

شکل ۲- تصویر ترموپیل‌های لایه نازک Bi-Sb چندلایه‌ای با ۱۰۰ اتصال سری (دو نمونه سمت چپ) و ترموپیل خطی تک لایه Bi-Cu (نمونه سمت راست)

ماده دوم، اتصالاتی لازم با ماده اول نیز برقرار شود و نیاز به لایه نشانی جداگانه‌ای برای این منظور نباشد. در نمونه‌های دایره ای شکل و چندلایه (۲) که ساخت آنها هدف اصلی ما بود، طرح اولیه ترموپیل دایره‌ای شکلی به قطر خارجی ۱۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۵ میلی‌متر است (شکل ۲). اتصالات سرد روی محیط دایره بزرگتر و اتصالات گرم روی محیط دایره کوچکتر قرار می‌گیرند. عرض هر بازو در اتصالات گرم $100 \mu\text{m}$ و فاصله بین آنها در هر دو اتصال سرد و گرم $50 \mu\text{m}$ است. برای کاهش مقاومت الکتریکی ترموپیل و استفاده بهینه از سطح دایره، عرض پایه‌ها را از اتصالات گرم به سرد به تدریج افزایش دادیم تا در نهایت عرض هر خط به $200 \mu\text{m}$ رسید. طول هر پایه 5 mm ، فاصله بین اتصالات سرد و گرم $4/4 \text{ mm}$ ، سطح حساس هر ترموکوپل $0/25 \text{ mm}^2$ و تعداد ترموکوپل‌های سری ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شد (شکل ۲ سمت چپ). این طرح با استفاده از نرم افزار اتوکلد ترسیم و فیلم مثبت آن با فتولیتوگرافی تهیه شد. به علت وجود ذرات ریز گرد و غبار در محیط



شکل ۱- ماسک‌های مورد استفاده در لیتوگرافی نوری برای ساخت ترموپیل لایه نازک چندلایه‌ای با صد اتصال سری. ماسک‌های a و c از مواد ترموالکتریک متفاوت و ماسک b لایه عایق (فتورزیست) بین دو ماده a و c با پنجره‌های لازم می‌باشد.



تمیزکردن سطوح لایه‌های نازک آزمایش شده و نتایج مطلوبی به لحاظ چسبندگی لایه نازک بدست آمده است. پس از شستشوی کامل و آماده سازی زیرلایه‌ها، آنهایی را که برای ساخت ترموپیل Bi-Sb در نظر گرفته شده بودند در دستگاه لایه نشانی در خلاء (ساخت شرکت CVC آمریکا) قرار داده در فشار 10^{-6} mbar در 1×10 با آهنگ تقریباً 10 \AA در ثانیه لایه نازکی از آنتیموان را به ضخامت 2500 \AA بر روی زیرلایه نشانیدیم. آهنگ لایه‌نشانی و ضخامت لایه به وسیله ضخامتسنج کوارتز (ساخت HHV هندوستان) به هنگام لایه‌نشانی اندازه‌گیری می‌شد. طرح مورد نظر با استفاده از ماسک اول و لیتوگرافی نوری بر روی لایه آنتیموان ایجاد شد. سپس با قرار دادن نمونه‌ها در حلال مناسب بخشهای زاید آنها را زدودیم. با آماده شدن لایه اول تمام نمونه‌ها، لایه عایق (فتورزیستور) بین دو ماده را با ضخامتی در حدود یک میکرومتر به وسیله لیتوگرافی نوری و ماسک دوم ایجاد کردیم، سپس آنها را به مدت یک ساعت در دمای 70 درجه سانتی‌گراد نگهداشتیم. در آخرین مرحله، کلیه نمونه‌ها را در دستگاه لایه‌نشانی در خلاء قرار داده و با استفاده از بوتله مولیبدن گود با آهنگی حدود 20 تا 25 آنگستروم بر ثانیه بیسموت را لایه‌نشانی کردیم. چون مقاومت الکتریکی ویژه بیسموت بیشتر از آنتیموان است، لایه آن را تقریباً به ضخامت دو برابر لایه آنتیموان، یعنی 5000 \AA نشانیدیم. با استفاده از ماسک سوم و لیتوگرافی نوری طرح مورد نظر بر روی نمونه‌ها پیاده شد. در نهایت با قرار دادن نمونه‌ها در حلال مناسب و زدودن بیسموت، مراحل ساخت ترموپیل‌ها به پایان رسید (شکل ۲). لازم به ذکر است که در هیچ یک از مراجع در دسترس، حلالی مناسب برای حل جداگانه Bi و Sb که بر روی ماده فتورزیست هیچگونه اثری نداشته و برای لیتوگرافی نوری قابل استفاده باشد، گزارش نشده است.

آزمایشگاه، ساخت خط 50 میکرونی با خطر قطع‌شدگی مواجه بود لذا برای جلوگیری از این خطر یک ماسک با 3 برابر ابعاد اولیه، همزمان نیز تهیه شد.

اولین مرحله ساخت، آماده‌سازی زیرلایه‌ها است. برای آماده‌سازی زیرلایه ترموپیل‌های Bi-Sb ابتدا با توجه به طرح ترموپیل، قسمتهایی از لایه مسی روی فیبر PCB را برای لحیم‌کاری اتصالات الکتریکی و قسمتهایی را به عنوان گرماگیر^(۴) اتصالات سرد، در پشت و یا روی فیبر در نظر گرفتیم. سپس لایه مس را در جاهایی که مورد نیاز نبود، با استفاده از محلول FeCl_3 با غلظت 300 گرم در لیتر زدودیم. برای آماده‌سازی زیرلایه ترموپیل‌های Bi-Cu، نظر به استفاده از لایه مس موجود بر روی فیبر PCB به عنوان یک ماده ترموپیل و عدم نیاز به لایه نشانی مس، ابتدا با گذاشتن ماسک اول و لیتوگرافی نوری، طرح مورد نظر را بر روی لایه مسی زیرلایه پیاده کرده سپس قسمتهای زیادی آن را زدودیم. نکته مهم مورد توجه این است که ضخامت لایه مسی موجود بر روی فیبرهای مسی موجود، حدود $35 \mu\text{m}$ است. این ضخامت برای کار مورد نظر ما خیلی زیاد بوده و مشکلاتی ایجاد می‌کند، از جمله: افزایش هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی اتصالات، امکان بروز ناپیوستگی در اتصال دو پایه (در اتصالات سرد)، افزایش زدایش زیرلایه مس و ناصافی لبه‌های آن، عدم پوشش کامل لبه‌ها و کناره‌های لایه مسی توسط ماده عایق بین دو لایه (فتورزیست).
 امکان بروز اتصال کوتاه بین ۱۱ به‌ها. برای رفع این ابه‌نچاریها، ضخامت لایه مس را با زدایش شیمیایی و پردازش به حدود چند میکرون رساندیم. سپس زیرلایه‌ها را با پارچه نرم یا پنبه آغشته به مایع ظرفشویی و آب گرم به خوبی تمیز و در آب مقطر غوطه ور کردیم. در آخرین مرحله، آب مقطر را با فشار بر روی آن پاشیدیم. این روش بارها برای



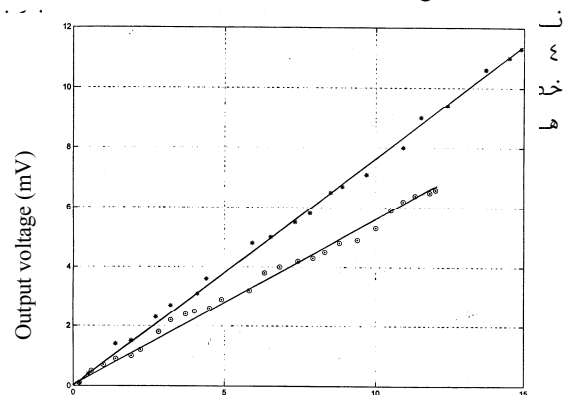
ولی ما موفق به تهیه دو محلول شديم که از ترکیب محلولهای $ZnCl_2$ ، $AlCl_3$ ، $FeCl_3$ ، اسید فسفریک و اسید نیتریک به نسبت‌های ترکیبی مختلف بدست آمد. این دو محلول، هر يك جداگانه دو عنصر Bi و Sb را حل کرده و برای لیتوگرافی نوري بسیار مناسباند.

۳- روش و نتایج اندازه‌گیری‌ها

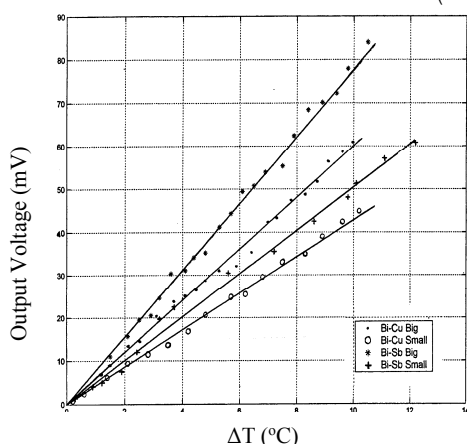
ابتدا مقاومت الکتریکی صفحه ای^(۵) لایه‌های نازک Bi و Sb را اندازه‌گیری کردیم. مقاومت صفحه ای لایه نازک آنتیموان تقریباً $3 \Omega/\square$ و لایه نازک بیسموت در حدود $8 \Omega/\square$ بدست آمد. مقاومت بازوی Sb هر ترموپیل در حدود 100Ω و مقاومت بازوی Bi ترموپیل در حدود 230 اهم اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری ولتاژ دو سر ترموپیل از یک ولت‌متر دیجیتال، به دقت 0.1 mV ، استفاده شد. برای تابش طیف گرمایی بر روی اتصالات گرم ترموپیل و ممانعت از تابش بر روی اتصالات سرد، از یک آینه مسطح که قسمتی از جیوة پشت آن پاک شده بود استفاده شد. این آینه بر روی ترموپیل که به سوی یک لامپ 100 وات روشن نگهداشته می‌شد قرار می‌گرفت تا اختلاف دما بر اثر جذب گرمای ایجاد شده توسط نور لامپ بوجود آید.

اندازه‌گیری اختلاف دما به وسیله دماسنج دو کاناله دیجیتال مجهز به دو حسگر کوچک مشابه که در پشت زیرلایه در محل اتصالات سرد و گرم نصب می‌شوند به عمل آمد. دمای هر دو حسگر و ولتاژ ترموپیل در بازه‌های زمانی کوتاه اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری به طور نسبی صورت گرفته است و در نتیجه خطای اندازه‌گیری حاصل از زمان پاسخ‌دهی حسگر دما، انتقال گرما در بازوها و زیرلایه، اثر قابل توجهی بر نتایج اندازه‌گیری ندارند. این



شکل ۳- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به اختلاف دما برای ترموپیل‌های خطی و تک لایه‌ای Bi-Cu با 8 (علامت \square) و 11 اتصال سری (علامت $*$)



شکل ۴- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به اختلاف دما برای ۴ نمونه مختلف ترموپیل‌های دایره‌ای شکل و چندلایه‌ای Bi-Cu و Bi-Sb با 100 اتصال سری

به اختلاف دما را به خوبی نشان می‌دهند.

نکته دیگری که باید بدان توجه شود ضریب سبک است. ضریب سبک برای نمونه‌های دایره‌ای شکل چندلایه‌ای متشکل از مس و بیسموت، در حدود $67 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ و برای نمونه‌های متشکل از بیسموت و آنتیموان، در حدود $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ است. از شیب نمودارها، ضریب سبک برای نمونه بزرگ ترموپیل Bi-Cu در حدود $61 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ و برای نمونه کوچک آن در حدود $45 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ بدست آمده است. در ترموپیل بزرگ Bi-Sb، ضریب سبک حدود $80 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ و برای نمونه کوچک آن حدود $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ بدست آمده است.



مشاهدات میکروسکوپی نشان داد که سوراخهایی به قطر تقریباً μm ۱۰ در پاره‌ای از نقاط بازوها وجود دارد. به علت تنظیم دستی ماسکها و کوچکی ابعاد، روی هم قرار گرفتن کامل تمام اتصالات بسیار دشوار است، اما در نمونه‌های ساخته شده به طور کلی ۸۰٪ سطح اتصالات در عمل روی هم قرار گرفته‌اند.

تفاوت ضریب سبک بدست آمده با مقدار گزارش شده سبب شد که برای مشخص شدن علت آن، مواد Sb و Bi استفاده شده مورد آزمایش طیف سنجی قرار گیرند. در ابتدا مواد Sb و Bi را به روش PIXE مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم. نتیجه این تجزیه و تحلیل (شکل ۵) نشان می‌دهد که در پودر Bi استفاده شده اندکی ناخالصی Cu و Sn وجود دارد، اما Sb از خلوص بالایی برخوردار است.

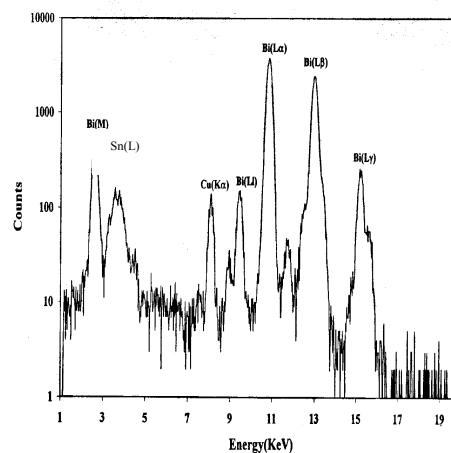
شکل ۵ (ب) - طیف سنجی تحلیلی ماده Sb به روش PIXE

با استفاده از روش RBS نموداری که در محور Xها تغییرات انرژی پروتونهای بازتابیده و در محور Yها تعداد پروتونهای بازتابیده را نشان می‌دهد بدست آوردیم. با روش RBS نمونه‌های چندلایه‌ای دایره‌ای (شکل ۲) مورد آزمایش قرار گرفت. نمودار بدست آمده در شکل ۶ نشان می‌دهد که قله اول از سمت راست Bi و قله دوم Sb و قله سوم و چهارم مربوط به زیرلایه است. انتظار می‌رفت قله Bi بلندتر و تیزتر باشد، اما نه تنها اینچنین نیست بلکه سمت چپ قله‌های کوچکی دیده می‌شود.

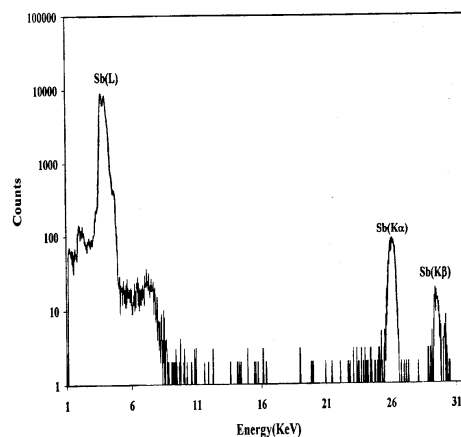
۴- نتیجه گیری و بحث

مقاومت الکتریکی ویژه Bi معمولاً در حدود چهار برابر مقاومت الکتریکی ویژه Sb است، اما چون ضخامت لایه نازک Bi دو تا سه برابر ضخامت لایه Sb است، در مجموع مقاومت لایه نازک Bi بیشتر از حد انتظار است. در ضمن ضریب سبک ترموپیلها نیز کمتر از مقدار واقعی است که به چند دلیل احتمالی بروز کرده است از جمله: اکسید شدن درصدی از Bi ، کافی نبودن ضخامت لایه عایق فتورزیست که در برخی از بازوها ممکن است سبب ایجاد اتصال کوتاه شده باشد، وجود ذرات ریز گرد و غبار معلق در هوا که در هنگام لایه‌نشانی و لیتوگرافی ممکن است سوراخهای ریزی در سطح بازوها به وجود آورند و باعث افزایش مقاومت شوند؛ همچنین نفوذ فتورزیست در لایه Bi و بر عکس، به دلیل نرم بودن هر دو ماده که به صورت پله‌های کوچکی در قله نمودار Bi در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

چونکه ولتاژ با ولت‌متر دیجیتال اندازه‌گیری شده است ناکافی بودن



شکل ۵ (الف) - طیف سنجی تحلیلی ماده Bi به روش PIXE. که در آن اندکی ناخالصی‌های Cu و Sn دیده می‌شود.





o - Sheet resistance

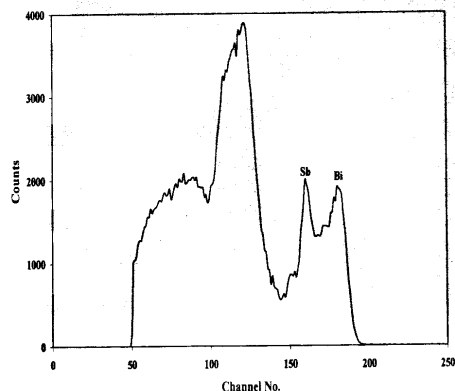
References:

1. I. B. Cadoff and E. Miller, "Thermoelectric materials and devices," Reinhold Publishing Cor.(1960).
2. A. Irace and P. M. Sarro, "Measurement of thermal conductivity and diffusivity of single and multilayer membranes," Sensors and Actuators, **A, 76**, 323-328 (1999).
3. Wagne G. Baer, Khalil Najafi, Kensall D. wise, Robert S. Toth, "A 32- elements micromachined thermal imager with on-chip multiplexing," Sensors and Actuators, **A, 48**, 47-54 (1995).
4. F. Volklein, A. Wiegand and V. Baier, "High - sensitivity radiation thermopiles made of Bi - Sb - Te films," Sensors and Actuators **A, 29**, 87-91 (1991).
5. Marc C. Foote, Eric W. Jones and Thierry Caillat, "Uncooled thermopile infrared detector linear arrays with detectivity greater than $10^9 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{w}$," IEEE Transactions electron devices, **45**, 1896- 1902 (1998).

۶. ش. کاظمی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۷۵).

امپدانس ورودی آن نیز ممکن است عاملی در افت ولتاژ اندازه‌گیری شده باشد، به ویژه که مقاومت الکتریکی ترموپیل‌ها در ردیف چند صد کیلو اهم است. با توجه به تغییر سریع ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات دما، و حساسیت بالای ترموپیل‌ها، به وسایل اندازه‌گیری کاملتری برای اندازه‌گیری پارامترهای مهم دیگر، از جمله پاسخ‌دهی، حساسیت و ثابت زمانی نیاز می‌باشد. اما با وجود مشکلات متعدد در مراحل ساخت نمونه‌ها و کمبود امکانات، نتایج بدست آمده در مقایسه نسبتاً خوب و قابل قبول است.

خطی بودن نمودارها نشان دهنده قابلیت این ترموپیل‌ها برای ساخت حسگرهای مختلف، به ویژه آشکارساز فرسوخ، بدون نیاز به مدارهای خطی کننده است.



شکل ۶- طیف RBS نمونه ترموپیل ساخته

۵- سحر و قدردانی

۱۴

نویسندگان مقاله به سبب اندازه گیری طیف‌های RBS و PIXE در آزمایشگاه واندوگراف سازمان انرژی اتمی ایران مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقای مهندس حمید پیروان و سرکار خانم سعیده وطن‌خواه، اعلام می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱ - Seebeck effect
- ۲ - Figure of merit
- ۳ - Multilayer
- ۴ - Heat sink