

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه خوارزمی خوارزمی

دانشکده علوم

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک – حالت جامد

عنوان پایان نامه:

بررسی طراحی و ساخت ترموکوپلهای لایه نازک و بکارگیری آنها

در حسگرهای مینیاتوری خلاء و شار

اساتید راهنما:

دکتر فرزاد تاییدی

دکتر سید امیر مسعود میری

اساتید مشاور:

دکتر سید شمس الدین مهاجرزاده

دکتر ابراهیم اصل سلیمانی

نگارش:

بهاره صادقی مکی

سال تحصیلی ۸۲-۱۳۸۱

**نقده دیدیم به:**

**پدر و مادر گرامی ام که در طول مدت**

**تحصیل مرا با تمام وجود یاری نمودند.**

## تقدیر و تشکر :

از استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر تأییدی که هم در طی دوره آموزش در دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی بیشترین تلاش را در رفع نیازهای علمی اینجانب و دانشجویان داشتند و هم در طی انجام این پروژه هدایتگر و راهنمای من بودند کمال تشکر را دارم.

از استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر میری که با راهنمایی های تأثیرگذار خود مرا به مطالعه بیشتر برای درک بهتر مطالب مربوط به پروژه تشویق نمودند و به این ترتیب تأثیر بسزایی در بازشدن مطالب مربوطه داشتند متشکرم.

از زحمات استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر مهاجرزاده که همواره با بردباری هدایتگر من در طی این مسیر پر نشیب بودند صمیمانه سپاسگزارم. همفکری و راهنمایی های همه جانبه ایشان همواره برای من ارزشمند، دلگرم کننده و آرامش بخش بوده و خواهد بود.

زحمات و تلاشهای استاد محترم جناب آقای دکتر سلیمانی در حل مشکلات و فراهم آوردن تسهیلات لازم و تأمین امتیاز آزمایشگاه قابل تقدیر میباشد و از اینکه ایشان اجازه حضور من در آزمایشگاه را صادر فرمودند سپاسگزاری می کنم.

از آقایان خاکی فیروز، درخشنده، اخوان، گودرزی، ملکی، اسفندیار پور، معافی، حکمت شعار، شهرجردی، کرباسیان، بهنام، خورشید احمد، فریبز، غفوری فرد، گنجی پور، یوسف نژاد، کارگر و خانمها : مرادی، گلشائیان، فامینی، آرون، خادم، مظاهری، گیتی بین، صالحی که در این دوره در آزمایشگاه لایه نازک درکنارشان بودم و مرا در انجام رسانیدن این پروژه یاری نمودند کمال قدردانی را دارم.

## چکیده:

در این پروژه طراحی، ساخت و اندازه گیری بر روی برخی از احساسگرهای مینیاتوری که در فن آوری لایه های نازک و میکروالکترونیک قابل ساخت می باشند صورت گرفته است. تمامی مراحل ساخت که شامل طراحی اولیه، ساخت نقاب روی شیشه، لایه نشانی موادی چون  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $\text{SiO}_2$ , Ge, Cu, Al, Ni, Cr) زدایش و الگودهی این لایه ها و ایجاد اتصالات می باشد با موفقیت انجام شده است. از جمله احساسگرهای ترموکوپلی ساخته شده در این پروژه احساسگرهای شارگاز و آشکار سازهای مادون قرمز بوده است. ساخت این حسگرهای ترموکوپلی علاوه بر زیر لایه های شیشه ای بر روی زیر لایه های انعطاف پذیری چون PET گزارش می شود. نمونه های مختلفی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج آن گزارش می شود. در این راستا ساخت غشاء نازک شیشه ای و میکروپیل هایی از جنس نیتريد سیلیکان و ایجاد غشای نازک بر بستر PET انجام گرفته است. ریزماشینکاری بستریایی از جنس پلاستیک PET برای ساخت حفره ها و غشاهای نازک تشریح می شود. DMF به عنوان حلال PET و نقاب چندلایه ای Ge/Cu برای اینکار بکار برده می شوند. نرخ زدایش حدود  $12 \mu\text{m}/\text{h}$  در حضور اشعه ماوراء بنفش با طول موج  $360 \text{nm}$  شدت  $35 \text{mw}/\text{cm}^2$  در دمای  $115^\circ$  بدست آمده است. حساسیت افزاره های ساخته شده از جنس فلز- فلز و فلز- نیمه هادی مقایسه شده است که این مقایسه حساسیت بیشتر افزاره های فلز - نیمه هادی را آشکار می کند. که در این راستا کریستالی نمودن لایه های نیمه هادی که در حسگرهای مینیاتوری نیمه هادی بکار برده شده است، به خصوص بر روی زیرلایه هایی از جنس PET برای اولین بار گزارش می شود و روشهایی از آنالیز سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است.

## فهرست مطالب

فصل اول	۱۵
مقدمه	۱۶
فصل دوم : احساسگرهای نیمه هادی	۱۹
۱-۲) احساسگرها و طبقه بندی آنها	۲۱
۱-۱-۲) طبقه بندی احساسگرهای نیمه هادی	۲۲
۲-۲) عناصر حساس به درجه حرارت	۲۳
۳-۲) ترموکوپل	۲۴
۴-۲) آثار ترموالکتریک	۲۴
۱-۴-۲) اثر سیبک	۲۴
۲-۴-۲) اثر پلتیر	۲۷
۳-۴-۲) اثر کلوین (تامسون)	۲۸
۵-۲) طراحی ترموکوپل ها	۲۹
۶-۲) احساسگرهای گرمایی و حرارتی	۲۹
۱-۶-۲) احساسگرهای شار	۳۰
۲-۶-۲) احساسگرهای خطی شار	۳۰
۳-۶-۲) احساسگرهای خطی فشار	۳۰
۴-۶-۲) احساسگرهای ترموالکتریکی و تشدیدی خلاء	۳۲
۷-۲) پیوندگاه فلز - نیمه هادی	۳۲
۱-۷-۲) سدهای شاتکی	۳۲
۲-۷-۲) تماسهای اهمی	۳۶
۳-۷-۲) حالات سطحی	۳۸
فصل سوم : تکنولوژی ساخت احساسگرهای نیمه هادی لایه نازک	۴۰
۱-۳) لایه نشانی	۴۱
۱-۱-۳) روش پخش اسپینی	۴۱
۲-۱-۳) تبخیر	۴۲
۳-۱-۳) کندوپاش	۴۳

- ۴۴ ..... ۳-۱-۴) لایه نشانی با روش رشد واکنشی
- ۴۵ ..... ۳-۱-۵) لایه نشانی با بخار شیمیایی (CVD)
- ۴۶ ..... ۳-۱-۶) نشست بخار شیمیایی با کمک پلازما
- ۴۶ ..... ۳-۲) لیتوگرافی
- ۴۶ ..... ۳-۲-۱) طراحی و ساخت نقاب
- ۴۸ ..... ۳-۲-۲) فوتولیتوگرافی
- ۵۱ ..... ۳-۲-۳) تطبیق نقاب های لایه های متفاوت
- ۵۲ ..... ۳-۲-۴) لیتوگرافی توسط بیم الکترونی
- ۵۲ ..... ۳-۳) فرآیند زدایش
- ۵۳ ..... ۳-۳-۱) زدایش به روش Lift off
- ۵۳ ..... ۳-۳-۲) زدایش به روش شیمیایی تر
- ۵۳ ..... ۳-۳-۳) زدایش خشک
- ۵۳ ..... ۳-۴) ایجاد اتصالات

#### فصل چهارم : طراحی و ساخت احساسگرهای شار و خلاء بر بستر شیشه ای..... ۵۴

- ۵۴ ..... ۴-۱) فرایند ساخت احساسگرهای شار فلزی
- ۵۵ ..... ۴-۱-۱) طراحی نقاب
- ۵۷ ..... ۴-۱-۲) تهیه میکروفیلم
- ۵۷ ..... ۴-۱-۳) تبدیل میکروفیلم به شیشه نقابهای کرومی
- ۵۷ ..... ۴-۱-۴) لایه نشانی کروم برای تهیه نقاب
- ۵۹ ..... ۴-۱-۵) طریقه ساخت ترموکوپل از جنس (Cr-Ni)
- ۶۰ ..... ۴-۲) تئوری ساختارهای فیزیکی حالت جامد نیمه هادی
- ۶۱ ..... ۴-۲-۱) لایه نشانی روی بستر بی شکل
- ۶۲ ..... ۴-۲-۲) نشست روی سطح بستر کریستالی
- ۶۳ ..... ۴-۲-۳) تأثیر فشار و دما در رشد لایه
- ۶۴ ..... ۴-۲-۴) تأثیر سرعت رشد لایه در ساختار لایه
- ۶۴ ..... ۴-۲-۵) خصوصیات فضای بین فیلم و زیر لایه
- ۶۶ ..... ۴-۳) فرایند بلوری سازی لایه های نیمه هادی بی شکل

۶۷	۴-۴) روشهای بلوری کردن لایه های نیمه هادی
۶۷	۴-۴-۱) گرمادهی سریع
۶۷	۴-۴-۲) بلوری کردن فاز جامد (SPC)
۶۸	۴-۴-۳) بلوری کردن لیزری
۶۸	۴-۴-۴) بلوری کردن به روش القای فلز (MIC)
۶۹	۴-۵) روشهای آنالیز سطح
۶۹	۴-۵-۱) SEM (Scanning Electron Microscopy)
۶۹	۴-۵-۲) EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis)
۷۰	۴-۵-۳) RBS (Rutherford Back Scattering)
۷۰	۴-۵-۴) PIXE (Proton Induced X-Ray Emission)
۷۰	۴-۵-۵) طیف نگاری Raman
۷۱	۴-۵-۶) XRD (X-Ray Diffraction)
۷۱	۴-۵-۷) TEM (Transmission Electron Microscopy)
۷۱	۴-۶) ایجاد ژرمانیم چند بلوری بر روی شیشه
۷۳	۴-۶-۱) کریستالی کردن ژرمانیم به روش (MIC)
۷۳	۴-۷) ساخت ترموکوپل فلز - نیمه هادی (Cr-Ge)
۷۴	۴-۸) بررسی نتایج حاصل از ترموکوپلها
۷۵	۴-۸-۱) ترموکوپلهای فلزی (Cr-Ni)
۷۶	۴-۸-۲) ترموکوپلهای فلز- نیمه هادی (Cr-Ge)
۷۸	۴-۸-۳) مقایسه بین ترموکوپلهای فلزی و فلز - نیمه هادی
۷۸	۴-۸-۴) تغییرات ولتاژ ترموکوپلها در برابر طول
۷۹	۴-۸-۵) چگونگی عملکرد احساسگر شار
۸۲	۴-۸-۶) خلاء سنج
۸۲	۴-۸-۷) عملکرد خلاء سنج
۸۴	<b>فصل پنجم : ساخت احساسگرهای شار گاز بر بستر PET</b>
۸۴	۵-۱) ساخت احساسگرهای شار گاز بر بستر PET
۸۴	۵-۲) پلی اتیلن ترفتالات (PET)



- ۳-۵) بررسی تنش و کرنش در لایه های نازک ..... ۸۶
- ۱-۳-۵) فرمول استونی ..... ۸۸
- ۲-۳-۵) اندازه کشش ..... ۹۰
- ۴-۵) تکنیکهای اندازه گیری تنش در لایه های نازک ..... ۹۱
- ۵-۵) تعیین رفتار تنش ذاتی ..... ۹۲
- ۱-۵-۵) فیلمهای تبخیری ..... ۹۲
- ۲-۵-۵) بستگی به ضخامت ..... ۹۳
- ۳-۵-۵) تأثیر دما ..... ۹۳
- ۶-۵) فیلمهای ایجاد شده به روش کندوپاش ..... ۹۳
- ۷-۵) برخی تئوریهای مربوط به تنش ذاتی ..... ۹۴
- ۸-۵) محاسبات کرنش ..... ۹۴
- ۹-۵) بلوری سازی ژرمانیم بر روی PET ..... ۹۶
- ۱۰-۵) ساخت ترموکوپل با پایه ژرمانیم چند بلوری بر روی PET ..... ۹۹

## فصل ششم : ریز ماشینکاری ..... ۱۰۱

- ۱-۶) ریز ماشینکاری ..... ۱۰۱
- ۱-۱-۶) ریز ماشینکاری کپه ای ..... ۱۰۲
- ۲-۱-۶) ریز ماشینکاری سطحی ..... ۱۰۳
- ۳-۱-۶) تکنیک لیگا (LIGA) ..... ۱۰۵
- ۲-۶) ریز ماشینکاری برای ساخت غشاء نازک شیشه ای ..... ۱۰۷
- ۱-۲-۶) آشکاری سازه های مادون قرمز ..... ۱۱۰
- ۲-۲-۶) ساخت آشکار سازه های مادون قرمز حرارتی ..... ۱۱۲
- ۳-۶) ریز ماشینکاری PET ..... ۱۱۵
- ۴-۶) زدایش ناهمسانگرد PET در حضور اشعه ماوراء بنفش .. ۱۱۶
- ۱-۴-۶) آزمایشهای اولیه ..... ۱۱۶
- ۲-۴-۶) استفاده از نقاب چند لایه برای حذف شکستگیها ..... ۱۱۹
- ۳-۴-۶) پارامترهای مؤثر در نرخ زدایش ..... ۱۲۳
- ۴-۴-۶) ساخت ترموکوپل بر روی غشاء نازک ایجاد شده بر بستر پلاستیک ..... ۱۲۶

۱۲۷.....(۵-۴-۶) ساخت میکروموتورها (چرخ دنده ها)

۱۲۹.....(۶-۶) خلاصه و نتیجه گیری

(۷-۶) منابع و مأخذ

(۸-۶) دستاوردها

## فهرست شکلها

### فصل دوم :

شکل (۱-۲) مقیاسی برای نمایش اندازه گیری احساسگرهای نیمه هادی

شکل (۲-۲) سیستم عمومی اندازه گیری سیگنال

شکل (۳-۲) ولتاژ ایجاد شده در اثر اختلاف درجه حرارت  $\Delta T$

شکل (۴-۲) ضریب سیبک برای سیلیکان نوع P با تغییر غلظت

شکل (۵-۲) اثر پلیر

شکل (۶-۲) نمایی شماتیک از دو نوع احساسگر شار ترموالکتریکی جدید که با فن آوری CMOS ساخته شده اند با عبور جریان، تقارن دمای دو طرف آن به هم خورده و اختلاف دما توسط ترموپیل‌های روی میکروپیل اندازه گیری میشود.

شکل (۷-۲) تابع تغییرات اختلاف ولتاژ در ترموپیل در برابر سرعت جریان هوا

شکل (۸-۲) یک عدد شاتکی از اتصال یک نیمه رسانای نوع n با فلزی که تابع کار بزرگتری دارد تشکیل میشود.

الف - نمودار انرژی برای فلز - نیمه رسانا قبل از اتصال

ب - نمودار نوارهای انرژی در حالت تعادل پیوند

شکل (۹-۲) سد شاتکی بین یک نیمه رسانای نوع p و فلزی که تابع کار کوچکتری دارد

الف - نمودار نوارهای انرژی قبل از اتصال

ب - نمودار نوارانرژی پیوند در حالت تعادل

شکل (۱۰-۲) اثر گرایش های مستقیم، معکوس روی پیوند شکل (۱۰-۲)

الف - گرایش مستقیم      ب - گرایش معکوس      ج - مشخصه نمونه ولتاژ - جریان

شکل (۱۱-۲) اتصالات اهمی فلز - نیم رسانا

الف -  $\phi_m < \phi_s$  برای یک نیمه رسانای نوع n

ب - نمودار انرژی پیوند در حالت تعادل

ج -  $\phi_m > \phi_s$  برای یک نیمه رسانای نوع p

د - پیوند در حالت تعادل

شکل (۱۲-۲) میخکوب شدن تراز فرمی توسط حالت‌های مرزی از نیمرسانای مرکب

الف -  $E_f$  در نزدیکی  $E_c - 0.7 \text{ eV}$  در  $G_0 A_s$  نوع n و صرف نظر از نوع فلز میخکوب شده است.

ب -  $E_f$  در  $I_n A_s$  بالای  $E_c$  میخکوب شده و یک اتصال اهمی پدید می آورد.

## فصل سوم:

شکل (۱-۳) مراحل مختلف لایه نشانی به روش پخش اسپینی

شکل (۲-۳) نمایی شماتیک از دستگاه تبخیر

شکل (۳-۳) - (a) فرایند کندوپاش (b) نمایی شماتیک دستگاه کندوپاش

شکل (۴-۳) دو مرحله از فرایند ساخت نقاب

شکل (۵-۳) مراحل متفاوت فرایند فوتولیتوگرافی

شکل (۶-۳) مقایسه بین رزیست های مثبت و منفی

شکل (۷-۳) شماتیکی از خالی شدن زیر نقاب در اثر پراکنش نور در لبه های نقاب

(a) - رزیست مثبت (b) - رزیست منفی

شکل (۸-۳) چگونگی ایجاد فیلمهای فوتورزیست

شکل (۹-۳) ساختار کلی یک الگودهی دوطرفه

شکل (۱۰-۳) شماتیکی از روش زدایش

Lift Off (a) زدایش به روش شیمیایی تر (b)

## فصل چهارم

شکل (۱-۴) لایه اول نقاب طراحی شده برای گرم کن و یک قسمت از بازوهای ترموکوپل از جنس کروم

شکل (۲-۴) لایه دوم نقاب طراحی شده برای بازوی دوم ترموکوپل از جنس ژرمانیم یا نیکل

شکل (۳-۴) لایه سوم نقاب طراحی شده برای باز کردن پنجره ها بعد از لایه نشانی  $\text{SiO}_2$  روی احساسگر

ساخته شده

شکل (۴-۴) لایه چهارم نقاب طراحی شده برای ایجاد مکانهای اتصال مسی (pad) بر روی پنجره ها

شکل (۵-۴) لایه پنجم نقاب طراحی شده به منظور ایجاد پنجره هایی بر روی کروم نشانیده شده پشت

شیشه برای ایجاد میکروپیل و غشای نازک

شکل (۶-۴) لایه ششم این نقاب که معکوس نقاب شکل (۵-۴) است برای ایجاد لایه جاذب برای بردن

حساسیت در احساسگرهای شار گاز و برای جذب طول موجهای مادون قرمز در آشکار ساز مادون قرمز

بکار برده شده است.

شکل (۷-۴) ترموکوپل ساخته شده بر روی شیشه و اتصالات الکتریکی خارجی

شکل (۸-۴) نمایی از لایه نشانی روی بستر

شکل (۹-۴) شماتیکی از سه حالت مختلف نشست لایه بر بستر بر حسب دمای لایه نشانی

شکل (۱۰-۴) شماتیکی از فضای میانین از نوع Abrupt Interface

شکل (۱۱-۴) شماتیکی از فضای میانین از نوع Compound Interface

شکل (۱۲-۴) شماتیکی از فضای میانین از نوع Diffusion Interface

شکل (۱۳-۴) شماتیکی از فضای میانین از نوع Mechanical Interface

شکل (۱۴-۴) آنالیز XRD ژرمانیم بر روی شیشه

شکل (۱۵-۴) ترتیب مراحل ساخت احساسگر شار (CrGe)

شکل (۱۶-۴) مشخصه (I-V) ترموکوپلهای فلزی (Cr-Ni)

شکل (۱۷-۴) مشخصه (I-V) ترموکوپلهای فلز نیمه هادی (Cr-Ge)

شکل (۱۸-۴) مشخصه (I-V) ترموکوپلهای فلز نیمه هادی بطوریکه Ge با روش MIC کریستال شده است.

شکل (۱۹-۴) مقایسه ولتاژ ترموکوپلها نسبت به جریان گرمکن با افزایش فاصله اتصالات گرم از گرمکن

شکل (۲۰-۴) مقایسه بین مشخصه ولتاژ - جریان ترموکوپلهای فلزی و فلز نیمه هادی

(a) گرم - نیکل (b) گرم ژرمانیم بدون آلیاژ مس (c) گرم - ژرمانیم با آلیاژ مس

شکل (۲۱-۴) منحنی تغییرات ولتاژ ترموکوپلها در برابر طول

شکل (۲۲-۴) نمودار تغییرات ولتاژ افزاره بر حسب میزان جریان هوا - جریان الکتریکی گرمکن  $6\text{mA}$  بوده، تفاضل ولتاژ ترموپلها اندازه گیری شده است.

شکل (۲۳-۴) منحنی تغییرات ولتاژ خروجی حسگرها در برابر سرعت متوسط هوای عبوری

شکل (۲۴-۴) منحنی تغییرات ولتاژ افزاره به تغییرات سرعت جریان هوا

شکل (۲۵-۴) تغییرات ولتاژ یک خلاء سنج بر حسب فشار درون محفظه حساسیت افزاره در فشار بین  $10^{-2}$  تا  $10^2$  بوده است.

## فصل پنجم :

شکل (۱-۵) تولید تنش در طی لایه نشانی فیلمهای نازک

شکل (۲-۵) (a) تنشهای انقباضی (b) تنشهای انبساطی

شکل (۳-۵) (a) ترکیب فیلم در زیرلایه (b) نیروها و گشتاورها

شکل (۴-۵) نمایشی از روش بکار رفته در اندازه گیری تنش در لایه های نازک

شکل (۵-۵) اندازه گیری تنش به روش خمش بیم

شکل (۶-۵) اندازه گیری در روش اپتیکی در اثر تنش فراترهای تولید شده است.

شکل (۷-۵) طیف XRD ژرمانیم نشانده شده بر روی PET

شکل (۸-۵) تصویر SEM ژرمانیم نشانده شده بر روی PET

شکل (۹-۵) تصویر SEM لایه ژرمانیم که نمایان کننده یک شکستگی بزرگ است.

شکل (۱۰-۵) الف - نمایان کننده ایجاد شکستگیهای حجمی در خطوط موازی به فاصله  $0.5\mu\text{m}$

ب - نمایش دهنده ساختار دانه ای در یکی از مقاطع حجمی

شکل (۱۱-۵) تصویر SEM از مورفولوژی سطح نمونه ای که پس از الگودهی تحت عملیات مکانیکی کرنش و کشش قرار گرفته است.

شکل (۱۲-۵) نمایشی از افزاره ساخته شده بر روی پلاستیک PET

## فصل ششم

شکل (۱-۶) نمایش افزاره های ساخته شده توسط ریزماشینکاری

شکل (۲-۶) شماتیک از فرایند لیگا

شکل (۳-۶) غشاء نازک ایجاد شده بر روی شیشه در محدوده گرمکن افزاره ساخته شده

شکل (۴-۶) بالارفتن حساسیت افزاره با افزایش عمق غشاء نازک

شکل (۵-۶) یکنواختی کف غشاء نازک ایجاد شده روی شیشه

شکل (۶-۶) شماتیک از زدایش همسانگرد شیشه

شکل (۷-۶) تنش ایجاد شده در غشاء نازک از جنس سیلیکان نایتراید

شکل (۸-۶) آشکار ساز ترموکوپلی مادون قرمز

شکل (۹-۶) حلالهای NaOH و محلولهای آمینی برای زدایش PET

شکل (۱۰-۶) شماتیک سیستم اولیه زدایش PET

شکل (۱۱-۶) عمق حفره ایجاد شده توسط حلال DCM به مدت ۱ ساعت

شکل (۱۲-۶) عمق حفره ایجاد شده توسط حلال DCM به مدت ۳ ساعت

شکل (۱۳-۶) سیستم جدید بکار رفته در زدایش ناهمسانگرد PET

شکل (۱۴-۶) عمق حفره ایجاد شده توسط مخلوط DCM و DMF بعد از ۱ ساعت

شکل (۱۵-۶) عمق حفره ایجاد شده توسط حلال DMF بعد از ۲ ساعت

شکل (۱۶-۶) نمودار فاز بخار (a) پس از ۳ ساعت زدایش (b) پس از ۶ ساعت زدایش

شکل (۱۷-۶) (a) پس از ۵ ساعت زدایش (b) پس از ۸ ساعت زدایش

شکل (۶-۱۸)

شکل (۶-۱۹) مقایسه بین استفاده از حلال مخلوط DCM و DMF به مدت ۷ ساعت

شکل (۶-۲۰) SEM برای این نمونه ۷ ساعت تحت زدایش با DMF قرار گرفت.

شکل (۶-۲۱) استفاده از حلالهای جدید ( $25\mu\text{m}$ ) و حلالهای قدیمی ( $20\mu\text{m}$ ) در طی فرایند.

شکل (۶-۲۲) ساخت ترموکوپل با غشاء نازک بر بستر پلاستیک

شکل (۶-۲۳) نمایش نزدیک ترموکوپل ساخته شده بر روی غشاء نازک پلاستیکی

شکل (۶-۲۴) چرخ دنده

شکل (۶-۲۵) جابجا شدن جای چرخ دنده

# فصل اول



## مقدمه:

تکنولوژی لایه نازک که جایگاه ویژه ای در صنعت میکروالکترونیک پیدا کرده است با نشانیدن لایه های مواد مختلف روی یکدیگر و الگودهی مناسب آنها به وسیله نقابهایی از قبل تعریف شده قابلیت ساخت افزاره های با ترکیبات متنوع را فراهم می آورد. این تکنولوژی به علت توانایی در ساخت افزاره هایی چون حسگرها در انواع مختلف (مکانیکی، الکتریکی، شیمیایی، مغناطیسی و گرمایی و ...) نمایشگرها، ترانزیستورهای لایه نازک، سلولهای خورشیدی و ... در کاربردهای ویژه ای نسبت به تکنولوژیهای دیگر چون SOI و VLSI ارجحیت پیدا کرده است. یکی از مزایای عمده این تکنولوژی سادگی پروسه ساخت می باشد. از دیگر مزایای این است که موادی غیر از ویفرسیلیکان هم می توانند به عنوان بستر لایه نشانی انتخاب شوند. در کاربردهای خاصی چون نمایشگرها، ترانزیستورهای لایه نازک و سلولهای خورشیدی که از کاربردهای مساحت بزرگ می باشند استفاده از بسترهایی چون شیشه می تواند یکی از مزایای عمده به حساب آید. به علاوه در چنین کاربردهای مساحت بزرگی استفاده از بستر شیشه ای می تواند منجر به ساخت افزاره های ارزان قیمت شود. یکی از مزایای دیگر این تکنولوژی استفاده از بستر لایه نشانی انعطاف پذیر مثل پلاستیک در کاربردهای مساحت بزرگ است. از بین افزاره های اشاره شده در بالا ساخت احساسگرهای حرارتی بر روی بسترهایی از جنس شیشه و پلاستیک PET مورد توجه قرار گرفت. احساسگرهای نیمرسانا و رسانا در اصل یک مبدل هستند، این مبدلها می توانند به تغییر پارامترهای محیط اطرافشان پاسخ داده و این تغییرات را به علائم الکتریکی تبدیل کنند. این پارامترها می توانند منشاء فیزیکی یا شیمیایی داشته باشند.

با پردازش اطلاعات موجود در این علائم الکتریکی می توان پارامتر مورد نظر را اندازه گیری نمود. با پیشرفتهای وسیع صنعت میکروالکترونیک در دهه های اخیر، پردازش اطلاعات با استفاده از فن آوری VLSI بسیار ساده سریع و ارزان قیمت شده و این کار به راحتی انجام می پذیرد. بنابراین ساخت احساسگرها جذابیت خاصی پیدا کرده و گروه زیادی از محققین را به خود مشغول کرده است. بطور کلی می توان گفت تحقیقات مربوط به این زمینه در بخش های زیر انجام می پذیرد: یافتن اصول کار و اثرات فیزیکی یا شیمیایی جدیدی که منجر به ساخت احساسگرها و محرکهای جدیدی شوند، یافتن مواد جدید و تغییر فرآیندهای ساخت، برای بهبود عملکرد احساسگرهای موجود و کاهش اثرات ناخواسته در اندازه گیری پارامتر مورد نظر، مجتمع سازی این احساسگرها با مدارات مجتمع پردازنده سیگنال و یافتن روشهای ساده سازی فرآیند ساخت. استفاده از نقش نگاری نوری این امکان را می دهد که احساسگرهای مینیاتوری با شکلهای گوناگون ساخته شوند، کاهش ابعاد حس کننده و الگودهی افزاره ها با این روش قابلیت تولید انبوه آنها را فراهم می کند و به این ترتیب هزینه ساخت آنها را بسیار کاهش می دهد، از طرف دیگر یک گام به سمت یکپارچه کردن احساسگرها با مدارهای پردازنده سیگنال نزدیکتر خواهیم شد.

احساسگرهای حرارتی نیز از جمله احساسگرهایی هستند که به راحتی می توان از آنها در مجتمع سازی استفاده نمود. این احساسگرها عموماً به دو گروه تقسیم می شوند آنهایی که مستقیماً پارامتر مورد نظر را اندازه گیری می کنند مثل آشکارسازی های مادون قرمز، توان سنج های لیزری و تصویر گره های مادون قرمز. در گروه دوم پارامتر مورد نظر مستقیماً اندازه گیری نمی شود بلکه با اعمال یک سیگنال الکتریکی می توان گرمایی را تولید کرده و عنصر حساس به دما در احساسگرها نسبت به تغییرات این گرما واکنش نشان می دهد. از این دسته می توان به شارسنج و خلاء سنج اشاره کرد. عناصر حساس به دما در این احساسگرها می تواند مقاومت، دیود، ترانزیستور و ترموکوپلها باشند.

از میان تمام عناصر حساس به دما ترموکوپلها می توانند دما را بدون انقطاع اندازه گیری کنند. بنابراین ساخت احساسگرهای ترموکوپلی تحت بررسی قرار گرفت. حسگرهای ترموکوپلی شارگاز، خلاء و مادون قرمز در این پروژه طراحی و ساخته شده است.

در تمامی احساسگرهای اشاره شده ایجاد اختلاف دمای زیاد در یک سطح کوچک عامل مهمی در پاسخ افزاره به شمار می رود. بنابراین ساخت این دسته از احساسگرها بر روی زیر لایه هایی با اینرسی گرمایی و رسانایی گرمایی کم امری لازم و ضروری به شمار می رود.

در فصل دوم اساس کار احساسگرهای مینیاتوری لایه نازک نیمه هادی بررسی شده است.

در فصل سوم تکنولوژی ساخت این حسگرها که شامل مراحل لایه گذاری، لیتوگرافی، زدایش و ایجاد اتصالات است مورد مطالعه قرار گرفته است. روشهای مختلف لایه گذاری و روشهای متفاوت لیتوگرافی

اعم از طراحی و ساخت نقاب تکنیکهای نقش و نگار نوری و تکنیکهای مختلف زدایش لایه ها مورد بحث قرار گرفته است.

در فصل چهارم ساخت حسگرهای ترموکوپلی شارگاز بر بستر شیشه ای گزارش شده است. در مورد چگونگی لایه نشانی بر بسترهای بی شکل و کریستالی و پارامترهای موثر در چسبندگی لایه ها توضیحاتی داده شده است. روش بکار رفته در بلوری سازی مواد نیمه هادی بکار رفته در ساخت ترموکوپل و نتایج بدست آمده از اندازه گیری ها ارائه شده است.

در فصل پنجم به بررسی بسترهای انعطاف پذیری چون پلاستیک PET پرداخته ایم و نحوه بلوری سازی مواد نیمه هادی بر روی این بسترها گزارش شده است. روشهایی برای اندازه گیری تنشهای ایجاد شده در لایه ها تحت مطالعه قرار گرفته است و ساخت حسگرهای ترموکوپلی شارگاز بر این بسترها ارائه شده است.

در فصل ششم روشهایی از ریزماشینکاری بدنه به منظور افزایش حساسیت افزاره ارائه شده است. روش نوینی برای زدایش ناهمسانگرد PET ارائه شده است همچنین ساخت حسگرهای شارگاز و مادون قرمز بر غشاهای نازکی از جنس نیتريد سیلیکان و پلاستیک PET با موفقیت انجام شده است. ساخت چرخ دنده های میکرونی از جنس پلاستیک و ایجاد چنین میکروموتورهایی از جنس فلز تحت بررسی قرار گرفته است.

## فصل دوم

# احساسگرهای نیمه هادی

### احساسگرهای نیمه هادی:

کلمه احساسگر<sup>۱</sup> از کلمه لاتین "Sentire" به معنای "درک کردن یا دریافتن" گرفته شده است. به این ترتیب توسط احساسگرها می توانیم بعضی از سیگنالهای شیمیایی و فیزیکی را که نمی توانیم توسط حواس خودمان اندازه گیری کنیم، مورد بررسی و اندازه گیری قرار دهیم. احساسگرها وسایلی هستند که به محرکهای فیزیکی و یا شیمیایی محیط چون گرما، نور، صدا، فشار و ... پاسخ می دهند و با تبدیل آنها به حرکت یا جنبشی قابل کنترل، قابلیت آنالیز آنها را فراهم میکنند. بنابراین یک حسگر می تواند یک سیگنال (انرژی) ورودی را آشکار کرده و آنرا به یک سیگنال (انرژی خروجی) تبدیل میکند. در احساسگرهای نیمه هادی، مواد نیمه هادی منجر به عملکرد قطعه می شوند. احساسگرهای نیمه هادی از نظر کوچکی و تکنیکهایی که در ساخت آنها بکار برده می شود، متفاوت با دیگر احساسگرهای حالت جامد میباشند. اغلب احساسگرهای نیمه هادی توسط فرآیندهایی چون VLSI و SOI که برای ایجاد مدارهای مجتمع<sup>۲</sup> و یکپارچه سازی استاندارد<sup>۳</sup> گسترش یافته اند، ساخته می

---

1- Sensor

2- Integrated Circuits

3- Standard Batch Processing