

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرایش حالت جامد)

لایه‌نشانی، مشخصه‌یابی و مطالعه خواص ساختاری و الکترواپتیکی  
لایه‌های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  با ناخالصی قلع به روش اسپری پیرولیز

توسط:

مریم حسن‌زاده‌مها

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی باقری محقق

استاد مشاور:

دکتر عباس یوسفی

دی ماه ۱۳۹۰

به نام خدا

لایه نشانی، مشخصه‌یابی و مطالعه خواص ساختاری و الکترواپتیکی لایه‌های نازک  $In_2S_3$  با  
ناخالصی قلع به روش اسپری پاپرولیز

به وسیله‌ی:

مریم حسن‌زاده مها

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی  
از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

فیزیک (گرایش حالت جامد)

از دانشگاه دامغان

ارزیابی و تأیید شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر محمد مهدی باقری محقق، استادیار فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (استاد راهنما)

دکتر عباس یوسفی، استادیار فیزیک مواد، مؤسسه تحقیقاتی برطاووس وابسته به شرکت لعاب مشهد (استاد مشاور)

دکتر رشید ولی، دانشیار فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (استاد داور)

دکتر سید احمد کتابی، دانشیار فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (استاد داور)

دکتر مهدی اردبیلیان، استادیار فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک دانشگاه دامغان (نماینده تحصیلات تکمیلی)

دی ماه ۱۳۹۰

رپاس و ملدا کتیب و بودگی و وجودم برتی بنزید و جسم و جازم را در اقیانوس بی نهایتی ر حرمتش غرق ساخت، هم او که به عطای بی منتا پیشی بی بند و بون کرامت بی مثال خویش گردانید و باغبان خشک اندیشه ام را به جویبار خروشان دانش الهی بلا بپر که بودم اقرار دارم که آنچه داده ای بیش از شایستگی من است و فقط در نور بنز شدگی تو است. و قدر دانی از هر کسافی که کله ای به من آموخته اند،

ارتداد را نبردند جناب آقای دکتر باقری محقق به پاس تمام مایه های ارزو شتو خلت در وزانه شان بی نهایت ر پاسگزارم. از اساتید و بزرگان دانشگاه، جناب آقای دکتر کتبی و جناب آقای دکتر و بی که با پذیرفتن داوری این پایان نامه بر من زت نماده و همراه از نقطه نظرات ارزشمندشان بهره مند نموده اند، نهایت قدر دانی و تشکر را می نمایم.

از همراهانم در آزمایشگاه تحقیقاتی حالت جلد، آقای مهندس غفیری، آقای دیانی و خانم کمالی که با خاطر تمام کوششهایشان صبر و پایداری را نشان دادند، تشکر را می نمایم.

نمیستفاید و پاس و اقلند انبر مر بزرگوارم دارم که حضور بی مدعا و بی در کمال صداقت تکلیف گاه محکم و نگاه مهر بارش گرمی وجودم است و تمام سزیه های این کوه و صومعه و جبهه ایشان و این عزیزم بنده دیت بزرگوار می به جان خرید تا همه پیمان آرامش بنفش وجودم باشد.

به ترمین و در بلبلدین عزیزم این زیباترین هدیه الهی به پاس تمام بزرگی ها و صبر و پایداری های زیبای او و دکانه اش خداوند بی همتا خواهد نام.

و در نهایت به پاس تعبیر عظیم کله ایثار و به پاس قلبه های بزرگشان که امید بنفش و فریادس استپاس حرمت های بی دریشان که فروکش هیچ گاه کند، از پدر فرزانه و مادر عزیزم نهایت تشکر و قدر دانی را می نمایم.

م این عزیزان و کسافی که در طول زندگی م را به نامم بودند، سلامتی، به روزی و رعایت نندی از خداوند یکتا خوارتارم.

# چکیده

لایه‌نشانی، مشخصه‌یابی و مطالعه خواص ساختاری و الکترواپتیکی لایه‌های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  با ناخالصی قلع به روش اسپری پایرولیز

به وسیله‌ی:

مریم حسن‌زاده‌مها

در این تحقیق، لایه‌های نازک دوتایی  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  و  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  به روش اسپری پایرولیز بر روی بسترهای شیشه-ای تهیه شده‌اند و تاثیر تغییر تراکم گوگرد و قلع بر روی خواص ساختاری، الکتریکی، اپتیکی، ترموالکتریکی و فوتورسانایی این لایه‌ها بررسی شد. برای تهیه لایه نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  میزان ناخالصی سولفور با نسبت اتمی  $[\text{S}]/[\text{In}] = 0.2-1.5$  در محلول اولیه تغییر داده شد. نتایج XRD نشان می‌دهد که در تراکم پایین سولفور، فاز  $\text{In}_2\text{O}_3$  غالب و در تراکم بالای سولفور، فاز  $\text{In}_2\text{S}_3$  تشکیل و فاز حاکم می‌شود و همه لایه‌ها دارای ساختار مکعبی می‌باشند. مقاومت سطحی لایه‌ها نیز در نسبت مولی  $\text{S}/\text{In} = 0.6$ ، کمترین مقدار را دارد و در همین نسبت مولی شفافیت اپتیکی بیشترین مقدار را نسبت به سایر لایه‌های آلاینده شده به سولفور نشان می‌دهد و در نسبت مولی  $\text{S}/\text{In} = 0.2$  اثر فوتورسانایی افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. پس از تهیه لایه‌های سولفید ایندیوم، به منظور بررسی اثر ناخالصی دهنده قلع ( $\text{Sn}^{4+}$ ) بر روی اصلاح خواص الکتریکی و سایر خواص، لایه‌های  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  تهیه و مشخصه‌یابی شدند. در این لایه‌ها نسبت اتمی  $\text{S}/\text{In}$  دو مقدار ثابت ۰/۶ و ۱/۵ لحاظ شده‌است و نسبت ناخالصی  $[\text{Sn}]/[\text{In}] = 0-15 \text{ at}\%$  در نظر گرفته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد در نسبت اتمی  $\text{S}/\text{In} = 0.6$ ، با افزودن ناخالصی Sn لایه‌ها دارای ساختار بلوری نسبتاً ضعیفی می‌باشند و فاز غالب در تمام لایه‌ها ساختار اکسید ایندیوم است و مقاومت سطحی لایه‌ها در نمونه بدون ناخالصی کمترین مقدار و شفافیت اپتیکی نمونه  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}8\%$  بیشترین مقدار و نمونه  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}10\%$  بهترین خواص فوتورسانایی را دارد. در نسبت اتمی  $\text{S}/\text{In} = 1.5$ ، تمام لایه‌ها دارای ساختار بس‌بلوری با فاز  $\text{In}_2\text{S}_3$  هستند و مقاومت سطحی لایه‌ها بتدریج با افزودن ناخالصی Sn، کاهش می‌یابد و در لایه‌ای با 8% ناخالصی قلع، کمترین مقدار را نشان می‌دهد. شفافیت اپتیکی نمونه  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}2\%$  بیشترین مقدار و نمونه  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}5\%$  بهترین خواص فوتورسانایی را دارد. نتایج آزمایش اثر سیبک نیز رسانش نوع P در دماهای بالا را نشان می‌دهد.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
<b>فصل اول: مقدمه‌ای بر نیمرساناهای اپتیکی</b> .....	۱
۱-۱: دسته بندی مواد نیمرسانای اپتیکی.....	۲
۱-۱-۱: ترکیبات گروه III-V جدول تناوبی.....	۲
۲-۱-۱: ترکیبات گروه II-VI جدول تناوبی.....	۳
۳-۱-۱: ترکیبات گروه III-VI جدول تناوبی.....	۳
۲-۱: معرفی خواص و ویژگیهای فلز ایندیوم.....	۵
۳-۱: خواص و ویژگیهای اکسیژن و سولفور.....	۷
۱-۳-۱: اکسیژن (O):.....	۷
۲-۳-۱: گوگرد (S):.....	۷
۴-۱: معرفی اکسید و سولفید ایندیوم.....	۹
۵-۱: فیزیک نیمرساناهای اپتیکی.....	۱۰
۱-۵-۱: تولید و باز ترکیب حاملهای بار غیر تعادلی.....	۱۱
۲-۵-۱: انواع باز ترکیب.....	۱۵
۳-۵-۱: فوتورسانش و جذب نور.....	۱۶
۴-۵-۱: فوتورساندگی ذاتی.....	۱۸
۵-۵-۱: فوتورساندگی ناخالصی.....	۱۹
۶-۵-۱: پدیده های پخش در نیمرساناها.....	۲۰
۶-۱: انواع نیمرساناهای اپتیکی.....	۲۳
۱-۶-۱: فوتودیودها.....	۲۳
۲-۶-۱: فوتورزیستورها.....	۲۳
۳-۶-۱: سلول خورشیدی.....	۲۴
۴-۶-۱: دیود نور گسیل.....	۲۵
۵-۶-۱: ترمیستورها.....	۲۶
۶-۶-۱: آشکارسازهای نوری.....	۲۷
<b>فصل دوم: مطالعه و مروری بر خواص فیزیکی نیمرساناهای اپتیکی بر پایه ایندیوم</b> .....	۲۸
۱-۲: مقدمه.....	۲۸
۲-۲: خواص نیمرسانای اکسید ایندیوم $In_2O_3$ .....	۲۸
۱-۲-۲: خواص ساختاری و میکروسکوپی.....	۲۹
۲-۲-۲: خواص اپتیکی و گاف انرژی.....	۳۳

۳۶	..... خواص الکتریکی و ساختار نواری
۳۸	..... ۴-۲-۲ آرایش ناخالصی
۴۰	..... ۵-۲-۲ نانو ساختارهای اکسید ایندیوم
۴۲	..... ۳-۲ خواص نیمرسانای اپتیکی سولفید ایندیوم $In_2S_3$
۴۲	..... ۱-۳-۲ خواص ساختاری و میکروسکوپی
۴۸	..... ۲-۳-۲ خواص اپتیکی و گاف انرژی
۵۲	..... ۳-۳-۲ خواص الکتریکی
۵۴	..... ۴-۳-۲ آرایش ناخالصی
۵۵	..... ۱-۴-۳-۲ اثر ناخالصی روی خواص ساختاری
۵۷	..... ۲-۴-۳-۲ تاثیر ناخالصی بر خواص اپتیکی
۵۸	..... ۳-۴-۳-۲ تاثیر ناخالصی بر روی خواص الکتریکی لایه های $In_2S_3:Sn$
۶۰	..... ۵-۳-۲ نانو ساختارهای سولفید ایندیوم
۶۲	..... ۴-۲ خواص نیمرسانای اپتیکی ایندیوم فسفاید $InP$
۶۲	..... ۱-۴-۲ خواص ساختاری و میکروسکوپی
۶۷	..... ۲-۴-۲ خواص اپتیکی و گاف انرژی
۶۸	..... ۳-۴-۲ خواص الکتریکی
<b>۷۰</b>	<b>..... فصل سوم- کارهای آزمایشگاهی</b>
۱-۳	..... ۱- تهیه محلولهای شیمیایی و ساخت لایه های نازک نیمرسانای $In_2O_3:S$ و $In_2S_3:Sn$ به روش اسپری پایرولیز
۷۰	..... ۱-۱-۳ مقدمه
۷۰	..... ۲-۱-۳ معرفی روش اسپری پایرولیز
۷۲	..... ۳-۱-۳ فرآیند تهیه لایه ها و شرایط لایه نشانی
۷۵	..... ۱-۳-۱-۳ شرایط تهیه لایه های نازک دوتایی $In_2O_3:S$
۷۵	..... ۱-۱-۳-۱-۳ تهیه محلول پایه
۷۵	..... ۲-۱-۳-۱-۳ تهیه محلول نهایی ( $In_2O_3:S$ )
۷۶	..... ۲-۳-۱-۳ شرایط تهیه لایه های نازک دوتایی $In_2S_3:Sn$
۷۷	..... ۱-۲-۳-۱-۳ تهیه محلول ( $In_2S_3:Sn$ )
۷۸	..... ۲-۳ روشهای مشخصه یابی لایه های نازک نیمرسانای $In_2S_3:Sn$ و $In_2O_3:S$
۷۸	..... ۱-۲-۳ مقدمه
۷۹	..... ۲-۲-۳ معرفی روشهای مشخصه یابی
۷۹	..... ۱-۲-۲-۳ مشخصه یابی خواص ساختاری
۸۱	..... ۲-۲-۲-۳ مشخصه یابی خواص سطحی
۸۲	..... ۳-۲-۲-۳ مشخصه یابی خواص الکتریکی
۸۴	..... ۴-۲-۲-۳ مشخصه یابی خواص ترموالکتریکی
۸۵	..... ۵-۲-۲-۳ مشخصه یابی خواص اپتیکی
۸۶	..... ۶-۲-۲-۳ مشخصه یابی خواص فوتورسانایی
<b>۸۹</b>	<b>..... فصل چهارم: مشخصه یابی و مطالعه خواص لایه های نازک نیمرسانای <math>In_2S_3:Sn</math> و <math>In_2O_3:S</math></b>

۸۹.....	۱-۴: مشخصه یابی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۸۹.....	۱-۱-۴: خواص ساختاری لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۹۴.....	۲-۱-۴: ساختار میکروسکوپی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۹۶.....	۳-۱-۴: خواص الکتریکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۹۹.....	۴-۱-۴: خواص اپتیکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۱۰۳.....	۵-۱-۴: خواص فوتورسانایی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۱۰۶.....	۵-۱-۴: خواص ترموالکتریکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ .....
۱۱۰.....	۲-۴: مشخصه یابی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۱۰.....	۱-۲-۴: مشخصه یابی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=0/6$ .....
۱۱۰.....	۱-۱-۲-۴: خواص ساختاری لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۱۴.....	۲-۱-۲-۴: ساختار میکروسکوپی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۱۵.....	۳-۱-۲-۴: خواص الکتریکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۱۸.....	۴-۱-۲-۴: خواص اپتیکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۲۱.....	۵-۱-۲-۴: خواص فوتورسانایی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۲۴.....	۶-۱-۲-۴: خواص ترموالکتریکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۲۸.....	۲-۲-۴: مشخصه یابی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۲۸.....	۱-۲-۲-۴: خواص ساختاری لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۳۱.....	۲-۲-۲-۴: ساختار میکروسکوپی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۳۲.....	۳-۲-۲-۴: خواص الکتریکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۳۵.....	۴-۲-۲-۴: خواص اپتیکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۳۹.....	۵-۲-۲-۴: خواص فوتورسانایی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۴۱.....	۶-۲-۲-۴: خواص ترموالکتریکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ با نسبت اتمی ثابت $S/\text{In}=1/5$ .....
۱۴۵.....	<b>فصل پنجم: نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات</b> .....
۱۴۵.....	۱-۵: مقدمه.....
۱۴۶.....	۲-۵: جمع بندی از خواص فیزیکی لایه های نازک $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ و $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ .....
۱۴۶.....	۱-۲-۵: جمع بندی از خواص ساختاری.....
۱۴۸.....	۲-۲-۵: جمع بندی از خواص الکتریکی و ترموالکتریکی.....
۱۵۰.....	۳-۲-۵: جمع بندی از خواص اپتیکی.....
۱۵۱.....	۴-۲-۵: جمع بندی از خواص فوتورسانشی.....
۱۵۲.....	۳-۵: پیشنهادات.....
۱۵۳.....	<b>مراجع</b> .....



## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۶	جدول ۱-۱: برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فلز ایندیوم.
۹	جدول ۲-۱: برخی از خواص فیزیکی اکسید و سولفید ایندیوم.
۳۷	جدول ۱-۲: بعضی از پارامترهای رسانش.
۴۴	جدول ۲-۲: تغییرات اندازه ذرات با افزایش دمای بازپخت.
۴۷	جدول ۳-۲: پارامترهای شبکه، اندازه ذرات، ضخامت لایه های $In_2S_3$ .
۵۰	جدول ۴-۲: گاف نواری مستقیم و غیر مستقیم لایه های $In_2S_3$ با غلظت متفاوت و دمای بستر متفاوت.
۵۲	جدول ۵-۲: اندازه ذرات و گاف نواری لایه های $In_2S_3$ تهیه شده به روش تبخیر حرارتی با دمای زیر لایه متفاوت.
۵۲	جدول ۶-۲: مقاومت ویژه الکتریکی لایه های $In_2S_3$ در دماهای بازپخت مختلف.
۵۳	جدول ۷-۲: رسانندگی، اندازه ذرات و گاف نواری لایه های $In_2S_3$ با دمای زیر لایه مختلف.
۵۵	جدول ۸-۲: میزان ناخالصی قلع در نمونه های مختلف.
۵۹	جدول ۹-۲: اندازه ذرات، گاف نواری، رسانندگی و حساسیت به نور لایه های $In_2S_3:Sn$ تهیه شده به روش <i>situ</i> .
۶۰	جدول ۱۰-۲: مقاومت سطحی و حساسیت به نور لایه های $In_2S_3:Sn$ تهیه شده به روش <i>in-situ</i> .
۶۵	جدول ۱۱-۲: تاثیر زمان لایه نشانی بر ضخامت و اندازه دانه لایه های $InP$ .
۶۷	جدول ۱۲-۲: تغییرات اندازه دانه ها و پارامترهای شبکه برای لایه های $InP$ با زمان بازپخت متفاوت.
۶۸	جدول ۱۳-۲: تغییرات اندازه دانه ها و گاف انرژی برای لایه های $InP$ با زمان بازپخت متفاوت.
۷۶	جدول ۱-۳: غلظت مولی و مقدار گرم سولفور مورد استفاده برای تهیه محلولهایی با غلظتهای مختلف.
۷۶	جدول ۲-۳: پارامترهای لایه نشانی برای تهیه نمونه.
۷۷	جدول ۳-۳: مقدار گرم کلرید قلع پنج آبه در محلول، برای لایه های مختلف $In_2S_3:Sn$ .
۹۳	جدول ۱-۴: پارامترهای XRD لایه های نازک $In_2O_3:S$ و برای جهت (۲۲۲).
۹۵	جدول ۲-۴: درصد تراکم عناصر در لایه های نازک $In_2O_3:S$ توسط آنالیز EDAX.
۹۶	جدول ۳-۴: مقاومت سطحی و ضخامت لایه های نازک $In_2O_3:S$ .
۹۷	جدول ۴-۴: نتایج اندازه گیری اثر حال برای لایه های نازک $In_2O_3:S$ .
۱۰۳	جدول ۵-۴: مقادیر گاف نواری لایه های نازک $In_2O_3:S$ .
۱۰۶	جدول ۶-۴: درصد تغییرات مقاومت سطحی با تابش نور در لایه های $In_2O_3:S$ در $t = 1000$ ثانیه).
۱۰۸	جدول ۷-۴: ضریب سیبک لایه های نازک $In_2O_3:S$ در $400\text{K}$ .
۱۱۳	جدول ۸-۴: پارامترهای XRD لایه های نازک $In_2S_3:Sn$ و در جهت ارجح (۲۲۲).
۱۱۴	جدول ۹-۴: درصد تراکم عناصر در لایه های نازک $In_2S_3:Sn$ توسط آنالیز EDAX.
۱۱۵	جدول ۱۰-۴: مقاومت سطحی و ضخامت لایه های نازک $In_2S_3:Sn$ .
۱۱۶	جدول ۱۱-۴: نتایج اندازه گیری اثر حال برای لایه های نازک $In_2S_3:Sn$ .
۱۲۱	جدول ۱۲-۴: مقادیر گاف نواری لایه های نازک $In_2S_3:Sn$ .
۱۲۳	جدول ۱۳-۴: درصد تغییرات مقاومت سطحی با تابش نور در لایه های $In_2S_3:Sn$ در $t = 750$ ثانیه).
۱۲۶	جدول ۱۴-۴: ضریب سیبک لایه های نازک $In_2S_3:Sn$ در $400\text{K}$ .

- جدول ۴-۱۵: پارامترهای XRD لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  و در جهت ارجح (۲۲۲)..... ۱۳۰
- جدول ۴-۱۶: درصد تراکم عناصر در لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  توسط آنالیز EDAX..... ۱۳۲
- جدول ۴-۱۷: مقاومت سطحی و ضخامت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۳۳
- جدول ۴-۱۸: نتایج اندازه گیری اثر هال برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۳۴
- جدول ۴-۱۹: مقادیر گف نواری لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۳۸
- جدول ۴-۲۰: درصد تغییرات مقاومت سطحی با تابش نور در لایه های  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  در ( $t = 600$  ثانیه)..... ۱۴۰
- جدول ۴-۲۱: ضریب سیبک لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  در  $400\text{K}$ ..... ۱۴۳
- جدول ۵-۱: شعاع یونی عناصر  $\text{Sn}, \text{O}, \text{S}, \text{In}$ ..... ۱۴۷

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱: جایگاه نیم‌رساناهای متداول در جدول تناوبی.
۴	شکل ۲-۱: آرایش الکترونی نیم‌رساناهای متداول در جدول تناوبی.
۴	شکل ۳-۱: تغییرات گاف انرژی و فاصله شبکه ای نیم‌رساناهای متداول.
۱۱	شکل ۴-۱: تولید حامل‌های آزاد.
۱۲	شکل ۵-۱: باز ترکیب حامل‌های آزاد.
۱۴	شکل ۶-۱: منحنی تغییرات $\Delta n$ بر حسب $t$ .
۱۶	شکل ۷-۱: فرایندهای فوتوالقایی.
۱۷	شکل ۸-۱: تغییرات فوتورسانندگی نسبت به زمان.
۱۹	شکل ۹-۱: منحنی توزیع طیفی یک نیم‌رسانای ناخالص.
۲۱	شکل ۱۰-۱: پدیده پخش در نیم‌رسانا.
۲۲	شکل ۱۱-۱: تراکم حفره‌های اضافی.
۲۳	شکل ۱۲-۱: نمودار یک قطعه فوتودیود.
۲۴	شکل ۱۳-۱: تغییرات مقاومت فوتورزیستورها.
۲۴	شکل ۱۴-۱: پیوند p-n در یک سلول خورشیدی.
۲۵	شکل ۱۵-۱: نمودار I-V سلول خورشیدی.
۲۵	شکل ۱۶-۱: فرایند الکترو لومینسانس و مدار آن.
۲۶	شکل ۱۷-۱: مشخصه منحنی یک ترمیستور.
۳۰	شکل ۱-۲: نمایش طرح وار آرایش اتمی در هشت وجهی In-O به ازای اتمهای ایندیومی که در جایگاههای شبکه ای $In_1$ و $In_2$ قرار دارند.
۳۱	شکل ۲-۲: نمایش طرح وار ساختار مکعبی $In_2O_3$ : دایره های کوچک سیاه رنگ اتمهای ایندیوم و دایره های بزرگ سیاه رنگ اتمهای اکسیژن هستند.
۳۲	شکل ۴-۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از اکسید ایندیوم تهیه شده به روش اسپری پایرولیزیز.
۳۲	شکل ۵-۲: تصویر میکروسکپ نیروی اتمی (AFM) اکسید ایندیوم تهیه شده به روش اسپری پایرولیزیز.
۳۳	شکل ۶-۲: نمودار عبور و بازتاب لایه های اکسید ایندیوم که به روش اسپاترینگ تهیه شده است.
۳۴	شکل ۷-۲: نمودار $(\alpha h\nu)^2$ در برابر انرژی فوتون $(h\nu)$ برای لایه های رشد یافته به روش (a) باریکه الکترون (b) CVD.
۳۵	شکل ۸-۲: نمودار شفافیت لایه های اکسید ایندیوم با ضخامتهای متفاوت تهیه شده به روش تبخیر حرارتی قبل و بعد از بازپخت.
۳۵	شکل ۹-۲: نمودار بازتاب لایه های اکسید ایندیوم با ضخامتهای متفاوت تهیه شده به روش تبخیر حرارتی قبل و بعد از بازپخت.
۳۶	شکل ۱۰-۲: ساختار نواری فرضی برای اکسید ایندیوم، ناحیه خاکستری رنگ حالت‌های اشغال شده را نشان دهد.

- شکل (۲-۱۱) : نمودار تغییرات مقاومت  $\rho$  ، چگالی حاملها  $n$  و تحرک حاملها  $\mu$  برحسب دمای زیر لایه اکسید ایندیوم. ۳۷
- شکل ۲-۱۲: نمودار تغییرات مقاومت، چگالی حاملها و تحرک حاملهای اکسید ایندیوم بر حسب میزان غلظت ناخالصی قلع. ۳۹
- شکل ۲-۱۳: نمودار XRD نانو ذرات  $\text{In}_2\text{O}_3$  تهیه شده به روش حلال گرمایی و حرارت دهی شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۵ ساعت. ۴۱
- شکل ۲-۱۴: تصاویر TEM نانو ذرات  $\text{In}_2\text{O}_3$  تهیه شده به روش حلال شیمیایی در دمای  $250^\circ\text{C}$  : (d) 15 h, (f) 5h, (a) 1 h. ۴۱
- شکل ۲-۱۵ : طرحهای پراش XRD لایه نازک تهیه شده به اسپری در دماهای (a) بدون بازپخت (b). ۴۳
- شکل ۲-۱۶: تصاویر SEM لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  در دمای  $300^\circ\text{C}$  (a) قبل از بازپخت (b) بعد از بازپخت در دمای  $300^\circ\text{C}$ . ۴۴
- شکل ۲-۱۷ : طرحهای XRD لایه نازک تهیه شده به اسپری در دماهای زیر لایه متفاوت. ۴۵
- شکل ۲-۱۸ : طرحهای XRD لایه نازک تهیه شده به اسپری در دمای  $420^\circ\text{C}$  با غلظتهای متفاوت (a)  $\text{In/S}=1/3$  (b)  $\text{In/S}=1/6$ . ۴۶
- شکل ۲-۱۹ : تصاویر SEM لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  تهیه شده با غلظت مولی  $\text{In/S}=1/3$  و دمای بستر. ۴۷
- شکل ۲-۲۰ : نمودار عبور اپتیکی برحسب طول موج برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  در دماهای قبل و بعد از بازپخت. ۴۸
- شکل ۲-۲۱ : نمودار  $(\alpha hv)^2$  در برابر انرژی فوتون  $(hv)$  برای لایه های تهیه شده به روش اسپری قبل و پس از بازپخت. ۴۹
- شکل ۲-۲۲ : نمودار عبور اپتیکی برحسب طول موج برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  در دماهای متفاوت زیر لایه. ۴۹
- شکل ۲-۲۳:  $(\alpha hv)^2$  در برابر انرژی فوتون  $(hv)$  برای لایه های تهیه شده به روش اسپری برای محاسبه گاف نواری مستقیم و غیر مستقیم لایه های  $\text{In}_2\text{S}_3$  با غلظت مولی  $\text{In/S}=1/6$  در دمای بستر  $230^\circ\text{C}$ . ۵۰
- شکل ۲-۲۴ : نمودار عبور و بازتاب اپتیکی برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3$  در دماهای متفاوت زیر لایه به روش تبخیر در خلاء. ۵۱
- شکل ۲-۲۵:  $(\alpha hv)^2$  در برابر انرژی فوتون  $(hv)$  برای لایه های  $\text{In}_2\text{S}_3$  به روش تبخیر با دمای متفاوت زیر لایه. ۵۱
- شکل ۲-۲۶: نمودار  $\ln \sigma$  بر حسب  $1000/T(K)$ . ۵۴
- شکل ۲-۲۷: طرح پراش اشعه X نمونه های ex-situ. ۵۶
- شکل ۲-۲۸: طرح پراش اشعه X نمونه in-situ. ۵۶
- شکل ۲-۲۹:  $(\alpha hv)^2$  در برابر انرژی فوتون  $hv$  برای لایه های  $\text{In}_2\text{S}_3$  تهیه شده به روش Ex-situ. ۵۷
- شکل ۲-۳۰:  $(\alpha hv)^2$  در برابر انرژی فوتون  $hv$  برای لایه های رشد یافته  $\text{In}_2\text{S}_3$  به روش in-situ. ۵۸
- شکل ۲-۳۱: تغییرات گاف نواری و حساسیت به نور لایه های  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  تهیه شده به روش in-situ. ۶۰
- شکل ۲-۳۲: طرح پراش XRD نانو ساختار های  $\text{In}_2\text{S}_3$  سنتز شده به روش هیروترمال (a) در  $90^\circ\text{C}$  به مدت ۶ ساعت (b) در  $80^\circ\text{C}$  به مدت ۶ ساعت (c) ۱۲ ساعت (d) ۲۴ ساعت (e) بازپخت شده در دمای  $600^\circ\text{C}$  به مدت ۵ ساعت. ۶۱
- شکل ۲-۳۳ - تصاویر SEM نانو ساختار های  $\text{In}_2\text{S}_3$  سنتز شده به روش هیروترمال (a,d) در  $80^\circ\text{C}$  به مدت ۶ ساعت (b,e) در  $80^\circ\text{C}$  به مدت ۱۲ ساعت (c,f) در  $80^\circ\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت. ۶۱

- شکل ۲-۳۴: طرح XRD لایه های InP به روش پالس لیزری در دمای زیر لایه (a) ۴۷۳K (b) ۶۷۳K (C) K ..... ۸۷۳  
۶۳
- شکل ۲-۳۵: طرح پراش پرتو X لایه های InP تهیه شده به روش پالس لیزری در دمای زیر لایه ۴۷۳K و فشار Pa ..... ۱/۳  
۶۴
- شکل ۲-۳۶: طرح پراش پرتو X لایه های InP تهیه شده به روش اسپری در دمای ۵۰۰C با ضخامت های متفاوت ۱۵۰ nm (b) ۳۷۵ nm (c) ۶۱۶ nm (d) ۵۲۲ nm ..... ۶۴  
۶۴
- شکل ۲-۳۷: تصاویر SEM لایه های InP تهیه شده به روش اسپری در دمای ۵۰۰C با ضخامت های متفاوت (a) ۱۵۰ nm (b) ۳۷۵ nm (c) ۶۱۶ nm (d) ۵۲۲ nm ..... ۶۵  
۶۵
- شکل ۲-۳۸: طرح پراش پرتو X لایه های InP تهیه شده به روش اسپری در دمای ۵۰۰C با زمان بازپخت (c) ۴۵۰ (متفاوت (a) ۲۰ min (b) ۴۰ min (c) ۸۰ min (d) ۱۲۰ min (e) ۱۸۰ min (f) ۲۰۰ min ..... ۶۶  
۶۶
- شکل ۲-۳۹: نمودار شفافیت اپتیکی لایه های InP تهیه شده با روش اسپری و بازپخت شده در دمای ۴۵۰C و در زمان های (a) ۰ min (b) ۲۰ min (c) ۴۰ min (d) ۸۰ min (e) ۱۶۰ min ..... ۶۷  
۶۷
- شکل ۲-۴۰: نمودار تغییر مقاومت لایه ها بر حسب تغییر زمان بازپخت ..... ۶۹  
۶۹
- شکل ۲-۴۱: نمودار تغییرات چگالی و تحرک حاملها بر حسب تغییر زمان بازپخت ..... ۶۹  
۶۹
- شکل ۳-۱: طرح ساده‌ای از دستگاه اسپری پایرولیز و قسمت‌های مختلف آن ..... ۷۴  
۷۴
- شکل ۳-۲: دستگاه اسپری مورد استفاده در این پروژه برای تهیه لایه ها ..... ۷۴  
۷۴
- شکل ۳-۳: تصویر دستگاه تبخیر حرارتی در خلاء برای الکتروگذاری لایه ها ..... ۷۴  
۷۴
- شکل ۳-۴: بازتاب پرتو X از صفحات اتمی ..... ۷۹  
۷۹
- شکل ۳-۵: دستگاه پراش پرتو-ایکس (XRD) مدل BRUKER - ADVANCE D8 دانشگاه دامغان ..... ۸۰  
۸۰
- شکل ۴-۵: دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ..... ۸۱  
۸۱
- شکل ۳-۷: اندازه‌گیری مقاومت سطحی لایه ها به روش پروب دو-نقطه‌ای ..... ۸۲  
۸۲
- شکل ۳-۸: سامانه اندازه‌گیری ولتاژ هال و تعیین نوع حاملها ..... ۸۳  
۸۳
- شکل ۳-۹: طرح مدار اندازه‌گیری آزمایش اثر هال. علامت بارها در دو طرف لبه بالا و پایین لایه با فرض مثبت بودن علامت حاملهای بار اکثریت در نظر گرفته شده است ..... ۸۴  
۸۴
- شکل ۳-۱۰: سامانه اندازه‌گیری ولتاژ ترموالکتریک با تغییرات دما (اثر سیبک) ..... ۸۴  
۸۴
- شکل ۳-۱۱: دستگاه طیف سنجی UV-Vis مدل UNICO 4802 ..... ۸۵  
۸۵
- شکل ۳-۱۲: فروپاشی حاملهای گسیل شده نوری. الف) نمونه نوع n تحت تابش روشنایی ثابت. ب) فروپاشی حاملهای اقلیت (حفرهها) با زمان. ج) آرایش نموداری برای اندازه‌گیری طول عمر حامل اقلیت ..... ۸۷  
۸۷
- شکل ۳-۱۳: سامانه اندازه‌گیری تغییرات مقاومت سطحی بر حسب مدت زمان نوردهی ..... ۸۸  
۸۸
- شکل ۴-۱: طیفهای XRD لایه های نازک In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S با تراکم مختلف ناخالصی S ..... ۹۰  
۹۰
- شکل ۴-۲: مقایسه طیفهای XRD لایه های نازک In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S ..... ۹۲  
۹۲
- شکل ۴-۳: نمودار تغییرات اندازه متوسط بلورکها با تغییرات تراکم مختلف S ..... ۹۳  
۹۳
- شکل ۴-۴: تصاویر SEM از ریز ساختار لایه های نازک In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S ..... ۹۵  
۹۵
- شکل ۴-۵: تغییرات مقاومت سطحی لایه های نازک In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S ..... ۹۶  
۹۶
- شکل ۴-۶: تغییرات چگالی حاملهای لایه های نازک In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S ..... ۹۸  
۹۸
- شکل ۴-۷: مقایسه تغییرات چگالی حاملها و مقاومت ویژه لایه های نازک In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S ..... ۹۸  
۹۸

- شکل ۴-۸: شفافیت اپتیکی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۹: نمودار مقایسه‌ای شفافیت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۰: تعیین گاف نواری لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۱: نمودار مقایسه‌ای گاف انرژی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۲: تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  بر حسب مدت نوردهی ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳: نمودار مقایسه‌ای تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  بر حسب مدت زمان نوردهی ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۴: تغییرات ولتاژ ترموالکتریک بر حسب اختلاف دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۵: نمودار مقایسه‌ای تغییرات ولتاژ ترموالکتریک بر حسب اختلاف دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۶: تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۷: نمودار مقایسه‌ای تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۱۸: طیفهای XRD لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  با تراکم مختلف ناخالصی  $\text{Sn}$  ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۹: مقایسه طیفهای XRD لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۰: تغییرات اندازه دانه های لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۱: تصاویر SEM لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۲: تغییرات مقاومت سطحی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۳: تغییرات چگالی حاملهای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۴: مقایسه تغییرات چگالی حاملها و مقاومت ویژه لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۵: نمودار شفافیت اپتیکی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۸
- شکل ۴-۲۶: نمودار مقایسه‌ای شفافیت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۱۹
- شکل ۴-۲۷: تعیین گاف نواری لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۰
- شکل ۴-۲۸: نمودار مقایسه‌ای گاف انرژی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۰
- شکل ۴-۲۹: تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  بر حسب مدت نوردهی ..... ۱۲۲
- شکل ۴-۳۰: نمودار مقایسه‌ای تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  بر حسب مدت زمان نوردهی ..... ۱۲۳
- شکل ۴-۳۱: تغییرات ولتاژ ترموالکتریک بر حسب اختلاف دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۵
- شکل ۴-۳۲: نمودار مقایسه‌ای تغییرات ولتاژ ترموالکتریک بر حسب اختلاف دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۵
- شکل ۴-۳۳: تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۷
- شکل ۴-۳۴: نمودار مقایسه‌ای تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۷
- شکل ۴-۳۵: طیفهای XRD لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  با تراکم مختلف ناخالصی  $\text{Sn}$  ..... ۱۲۸
- شکل ۴-۳۶: مقایسه طیفهای XRD لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۲۹
- شکل ۴-۳۷: تغییرات اندازه دانه‌های لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۰
- شکل ۴-۳۸: تصاویر SEM لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۱
- شکل ۴-۳۹: تغییرات مقاومت سطحی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۳
- شکل ۴-۴۰: تغییرات چگالی حاملهای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۴
- شکل ۴-۴۱: مقایسه تغییرات چگالی حاملها و مقاومت ویژه لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۵
- شکل ۴-۴۲: نمودار شفافیت اپتیکی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۶
- شکل ۴-۴۳: نمودار مقایسه‌ای شفافیت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۶
- شکل ۴-۴۴: تعیین گاف نواری لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  ..... ۱۳۷

- شکل ۴-۴۵: نمودار مقایسه‌ای گاف انرژی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۳۸
- شکل ۴-۴۶: تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  بر حسب زمان تابش نور ..... ۱۳۹
- شکل ۴-۴۷: نمودار مقایسه‌ای تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  بر حسب مدت زمان نوردهی..... ۱۴۰
- شکل ۴-۴۸: تغییرات ولتاژ ترموالکتریک بر حسب اختلاف دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۴۲
- شکل ۴-۴۹: نمودار مقایسه‌ای تغییرات ولتاژ ترموالکتریک بر حسب اختلاف دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$ ..... ۱۴۲
- شکل ۴-۵۰: تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۴۴
- شکل ۴-۵۱: نمودار مقایسه‌ای تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۴۴
- شکل ۵-۱: تغییرات مقاومت سطحی لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  و  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۴۸
- شکل ۵-۲: تغییرات ضریب سیبک با دما برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  و  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۴۹
- شکل ۵-۳: تغییرات گاف نواری برای لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  و  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$ ..... ۱۵۱
- شکل ۵-۴: تغییرات مقاومت لایه های نازک  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{S}$  و  $\text{In}_2\text{S}_3:\text{Sn}$  پس از ۶۰۰ ثانیه ..... ۱۵۱

## فصل اول

### مقدمه‌ای بر نیمرساناهای اپتیکی فیزیک، ویژگیها و کاربردها

مقدمه:

خواص الکترونیکی نیمرساناها<sup>۱</sup>، تحت تاثیر توسعه الکترونیک بر پایه ساخت دیود و ترانزیستور در اوایل سال ۱۹۵۰، به عنوان مباحث مهم در علم فیزیک حالت جامد، تحقیقات و مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. حاصل این تحقیقات منجر به انقلابی در علوم الکترونیک و ساخت قطعات جدید حالت جامد شده است. اما از طرف دیگر، در مقایسه با الکترونیک، خواص نوری نیمرساناها در حجم بسیار کمی مطالعه شده است. با پیشرفت و توسعه تحقیقات، ارتباط بسیار نزدیکی بین خواص الکترونی و اپتیکی مواد بوجود آمده است، که محصول آنها ساخت قطعات پیشرفته اپتوالکترونیک<sup>۲</sup> است. ویژگی مهم مواد نیمرسانای اپتیکی در رنگ ظاهری آنهاست، بطور مثال زرد پررنگ برای کادمیوم سولفاید (CdS)، پرتقالی برای زینک سلناید (ZnSe)، قهوه‌ای تیره برای سولفید مس (CuS) و مشکی فلزی برای گالیم آرسناید (GaAs) است. در واقع این خصوصیات رنگی، به مشخصه های جذب و تابش نور که بطور عمده به ساختار نواری ماده و به ویژه گاف انرژی وابسته است، بستگی دارد. جذب نوری در یک ماده نیمرسانا معادل با تولید زوج الکترون و حفره است و بر هم کنش‌های بین این حاملهای تولید شده و اثر باز ترکیب زوج

---

<sup>1</sup> Semiconductor

<sup>2</sup> Optoelectronic



حاملهای بار، منجر به خواص نوری ویژه‌ای می‌شود که بیشتر به صورت غیر خطی نمایان می‌شود [۱-۵].

بخش بزرگی از ترکیبات نیمرسانای اپتیکی از ترکیب عناصر گروه‌های دو، سه و چهارم جدول تناوبی با عناصر گروه‌های پنج و شش و بطور عمده عناصری از قبیل سولفور (S)، سلنیوم (Se)، تلریم (Te)، فسفر (P) و آرسنیک (As) بدست می‌آیند. این ترکیبات بدلیل جذب نوری بالا و یا گسیل نوری بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند و در بسیاری از قطعات نیمرسانا از قبیل دیودهای نوری<sup>۱</sup> و لیزرهای حالت جامد<sup>۲</sup>، حسگرها<sup>۳</sup> و آشکارسازهای نوری<sup>۴</sup> و سلولهای خورشیدی<sup>۵</sup> کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [۱-۵].

در ادامه این فصل به معرفی رایج‌ترین گروه‌ها و ترکیبات مختلف مواد اپتیکی و خواص فیزیکی آنها می‌پردازیم و مروری خواهیم داشت بر ترکیبات مهم نیمرسانای ایندیوم که دو حالت اکسید ایندیوم و سولفید ایندیوم آن بسیار مشهور است.

#### ۱-۱: دسته بندی مواد نیمرسانای اپتیکی:

بطور کلی ترکیب‌های مختلف نیمرسانای اپتیکی شامل ترکیب عناصر فلزی در گروه ۲ و ۳ جدول تناوبی و عناصر غیر فلزی گروه‌های ۵ و ۶ جدول تناوبی است [۱-۵]. در ادامه بحث، بطور خلاصه به بررسی و معرفی خصوصیات این نیمرساناها می‌پردازیم.

##### ۱-۱-۱: ترکیبات گروه III-V جدول تناوبی

شکل ۱-۱ مواد مختلف نیمرساناهای اپتیکی را نشان می‌دهد. در گروه III این جدول عناصر فلزی سه ظرفیتی آلومینیم (Al)، گالیم (Ga)، ایندیوم (In) و تالیوم (Tl) قرار دارند. پیوند این فلزات با گروه V شامل عناصر نیتروژن (N)، فسفر (P)، آرسنیک (As)، آنتیموان (Sb)، منجر به

<sup>1</sup> Light emitting diodes

<sup>2</sup> Solid State laser

<sup>3</sup> Sensor

<sup>4</sup> Optical detectors

<sup>5</sup> Solar cells

ساخت نیمرساناهای ترکیبی دوتایی و سه تایی مهمی می‌شود. مهمترین ترکیبات این گروه شامل گالیم آرسناید (GaAs)، آلومینیم گالیم آرسناید (AlGaAs)، نیتريد ایندیوم (InN)، نیتريد آلومینیم (AlN)، ایندیوم فسفر (InP) و ایندیوم آنتیموان (InSb) می‌باشند. گاف اپتیکی این نیمرساناها گستره وسیعی از حدود  $1.52 \text{ eV}$  برای گالیم آرسناید تا حدود  $5.5 \text{ eV}$  برای نیتريد گالیم متغیر است. بعضی از این نیمرساناها دارای خواص جذب و گسیل بالایی می‌باشند و در قطعات اپتوالکترونیک و فوتونیک بدلیل سرعت بالاتر کلید زنی نسبت به سیلیکون کاربرد دارند [۶ و ۷].

#### ۱-۱-۲: ترکیبات گروه II-VI جدول تناوبی

با توجه به شکل ۱-۱ و ۲-۱ در گروه II جدول تناوبی فلزات دو ظرفیتی روی (Zn) و کادمیوم (Cd) حضور دارند که با پیوند این فلزات با عناصر گروه VI شامل عناصر اکسیژن (O)، سولفور (S)، سلنیوم (Se)، تلریم (Te)، که بعنوان گروه کلکوژنی<sup>۱</sup> منجر به ترکیبات نیمرساناهای اپتیکی دوتایی و سه تایی مهمی می‌شود. از این گروه می‌توان به نیمرسانای سولفید کادمیوم (CdS)، سولفید روی (ZnS)، کادمیوم تلوراید (CdTe) و روی سلناید (ZnSe) بعنوان ماده جاذب نور خورشید به ویژه در سلولهای خورشیدی لایه نازک کاربرد گسترده‌ای دارند [۱۰-۸].

#### ۱-۱-۳: ترکیبات گروه III-VI جدول تناوبی

دسته دیگری از ترکیبات نیمرسانای نوری که قبلا کمتر به آنها توجه شده بود و اخیرا با افزودن ناخالصی به آنها تهیه شده‌اند، بدلیل رسانایی الکتریکی بالاتر و چگالی الکترونی بیشتر، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مهمترین ترکیبات این گروه شامل اکسید و سولفید ایندیوم، گالیم - آلومینیم سلناید، گالیم سلناید و ایندیوم سلناید است. این ترکیبات اغلب دارای گاف نواری نسبتا بزرگ در گستره  $2.5 \text{ eV} - 3.6 \text{ eV}$  می‌باشند. جذب اپتیکی آنها بالا بوده و در قطعات

<sup>۱</sup> Chalcogenide

اپتوالکترونیک کاربرد دارند [۱۲ و ۱۱]. در شکل ۱-۳ نمودار خصوصیات برخی از ترکیبات نیمرسانا بر حسب فاصله شبکه‌ای ارائه شده است.

1	1a	2a											3a	4a	5a	6a	7a	8a	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	3b	4b	5b	6b	7b	8	9b	10b	11b	12b	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	106		108	109										

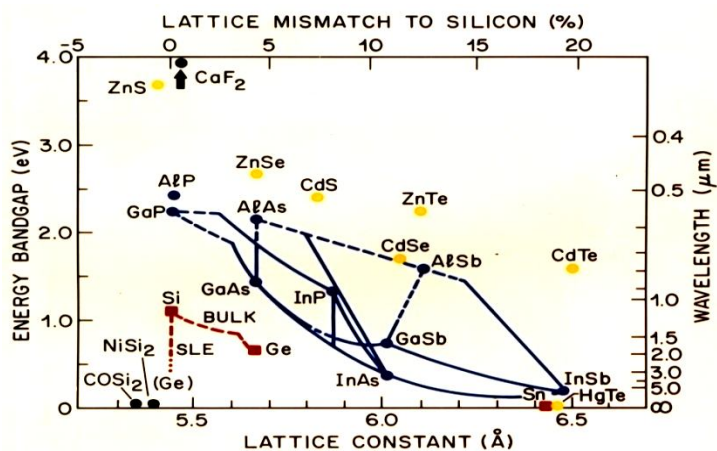
48	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu	ACTINIDES
90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr	ACTINIDES

**Elements in semiconducting materials**

شکل ۱-۱: جایگاه نیمرساناهای متداول در جدول تناوبی [۱۳].

Group IIB	Group IIIA	Group IVA	Group VA	Group VIA
	B $2s^2 2p^1$	C $2s^2 2p^2$	N $2s^2 2p^3$	O $2s^2 2p^4$
	Al $3s^2 3p^1$	Si $3s^2 3p^2$	P $3s^2 3p^3$	S $3s^2 3p^4$
Zn $3d^{10} 4s^2$	Ga $4s^2 4p^1$	Ge $4s^2 4p^2$	As $4s^2 4p^3$	Se $4s^2 4p^4$
Cd $4d^{10} 5s^2$	In $5s^2 5p^1$	Sn $5s^2 5p^2$	Sb $5s^2 5p^3$	Te $5s^2 5p^4$
Hg $5d^{10} 6s^2$	Tl $6s^2 6p^1$	Pb $6s^2 6p^2$	Bi $6s^2 6p^3$	Po $6s^2 6p^4$

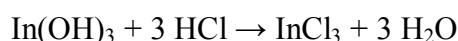
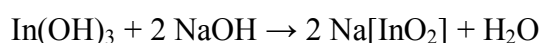
شکل ۱-۲: آرایش الکترونی نیمرساناهای متداول در جدول تناوبی [۱۴].



شکل ۱-۳: تغییرات گاف انرژی و فاصله شبکه ای نیمرساناهای متداول [۱۵].

## ۲-۱: معرفی خواص و ویژگیهای فلز ایندیوم

ایندیوم یک عنصر فلزی با ظرفیت  $3^+$  و عدد اتمی ۴۹ است که بسیار نرم، سبک و به رنگ خاکستری است. برخی از خصوصیات فیزیکی آن در جدول ۱-۲ آورده شده است. هر اتم ایندیوم دارای ۴۹ الکترون با آرایش اتمی  $[\text{Kr}]4d^{10}5s^25p^1$  است. ایندیوم نخستین بار توسط شیمیدان آلمانی بنام فردیناند ریچ<sup>۱</sup> تهیه شد. ایندیوم با آب واکنش نمی‌کند، اما با عاملهای اکسید قوی مانند هالوژن‌ها و اسید اگزالیک با ظرفیت پنج ( $5^+$ ) واکنش می‌کند. بطور مشابه واکنش بین ایندیوم و هیدروژن نیز مشاهده نشده است. اکسید ایندیوم در دمای بالا در واکنش ایندیوم با اکسیژن اتفاق می‌افتد و با شعله آبی رنگ می‌سوزد. هیدروکسید ایندیوم یعنی  $\text{In}(\text{OH})_3$  با قلیایی-ها و اسیدها واکنش می‌دهد. بعنوان مثال در واکنشهای زیر:



ایندیوم در طبیعت با عدد جرمی ۱۱۳ و ۱۱۵ موجود است که با عدد جرمی  $A=115$ ، یک عنصر رادیو اکتیو است که به قلع ۱۱۵ ( $\text{Tin-115}$ ) واپاشی می‌کند و نیمه عمر آن  $4,41 \times 10^{14}$  سال است. ایندیوم ۳۹ ایزوتوپ شناخته شده دارد که جرم اتمی آنها بین ۹۷ تا ۱۳۵ است [۱۶].  
اکسید ایندیوم ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) و اکسید ایندیوم - قلع (ITO) از ترکیبات شناخته شده است که بعنوان پوششهای رساناهای شفاف در سلولهای خورشیدی و دیوهای گسیلنده نوری کاربرد وسیعی دارد. سولفید ایندیوم نیز اخیراً بعنوان یک نیمرسانای اپتیکی نوع n و ماده جاذب نور در سلولهای خورشیدی لایه نازک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷].

جدول ۱-۱: برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فلز ایندیوم [۱۸].

<sup>1</sup> Ferdinand Reich