

دانشگاه بین‌المللی قزوین
دانشکده فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک در
گرایش حالت جامد

مطالعه و بررسی تأثیر پارامترهای لایه‌نشانی بر خواص لایه‌های نازک
شفاف رسانای

دانشجو
معصومه موسی‌رضایی

استاد راهنما
دکتر حسن رئیس‌سیان امیری

استاد مشاور
مهندس داود کلهر

شهریور ماه ۱۳۸۸

چکیده

مطالعه و بررسی تأثیر پارامترهای لایه‌نشانی بر خواص لایه‌های نازک شفاف رسانای

به وسیله

معصومه موسی‌رضایی

لایه‌های نازک شفاف رسانا از جمله موادی هستند که دو ویژگی برجسته را بطور همزمان دارا می‌باشند. یکی از این ویژگی‌ها تراگسیل نوری خوب در ناحیه مرئی و دیگری رسانندگی الکتریکی زیاد می‌باشد. لایه‌های نازک به علت دارا بودن همزمان دو خاصیت رسانندگی الکتریکی بالا و شفافیت نوری در ناحیه مرئی، کاربردهای فراوانی بویژه در ادوات اپتوالکتریکی از قبیل سلول‌های خورشیدی، نمایشگرهای بلور مایع¹، دیودهای نورگسیل و غیره به عنوان الکتروود شفاف پیدا کرده‌اند. به همین خاطر موضوع تحقیقات بسیاری قرار گرفته‌اند. در این پروژه ابتدا لایه‌های نازک شفاف رسانا و کاربردهای آن معرفی می‌شود. سپس روش‌های ساخت لایه‌های نازک و نیز برخی از روش‌های مشخصه‌یابی این لایه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت به مطالعه تأثیر پارامترهایی پرداخته می‌شود که در تعیین خواص لایه‌های نازک شفاف رسانا نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند.

¹ Liquid Crystal Displays (LCDs)

فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول
۲	۱-۱ لایه نازک:
۳	۱-۲ لایه‌های نازک اکسید رسانای شفاف (TCOs):
۵	۱-۲-۱ اکسید ایندیوم آلیایده به قلع ITO:
۶	۱-۲-۱ اکسید روی آلیایده با آلومینیوم AZO:
۸	۱-۲-۱ اکسیدهای قلع SnO, SnO_2 :
۱۰	فصل دوم
۱۱	۱-۲ کاربردهای لایه‌های نازک
۱۲	۱-۱-۲ کاربردهای خواص مکانیکی
۱۳	۲-۱-۲ کاربرد در الکترونیک و میکرو الکترونیک:
۱۴	۳-۱-۲ کاربرد در صنایع اپتیک، اپتو الکترونیک و اپتیک مجتمع
۱۵	۲-۲ کاربرد لایه‌های نازک اکسید رسانای شفاف (TCOs)
۱۶	فصل سوم
۱۷	۱-۳ روشهای ساخت لایه نازک
۱۷	۲-۳ انباشت فیزیکی بخار (PVD) :
۱۸	۱-۲-۳ روش تبخیر حرارتی :
۱۹	۲-۲-۳ انباشت با باریکه الکترونی:
۲۰	۱-۳-۲-۳ کندو پاش دیودی (DC):
۲۱	۲-۳-۲-۳ کندو پاش مغناطیسی:
۲۲	۳-۳-۲-۳ کندو پاش RF:

- ۲۲ ۴-۳-۲-۳ کندوپاش باریکه یونی:
- ۲۳ ۵-۳-۲-۳ کندو پاش سه قطبی.....
- ۲۳ ۶-۳-۲-۳ کندو پاش واکنشی و غیر واکنشی:
- ۲۴ ۴-۲-۳ کند و سوز لیزری
- ۲۵ ۵-۲-۳ قوس الکتریکی:
- ۲۶ ۳-۳ انباشت شیمیایی بخار (CVD):.....
- ۲۶ ۱-۳-۳ انباشت شیمیایی بخار (CVD):.....
- ۲۷ ۲-۳-۳ انباشت شیمیایی بخار با کمک پلاسما (PECVD).....
- ۲۸ ۳-۳-۳ انباشت شیمیایی بخار فلز-آلی (MOCVD)
- ۲۸ ۴-۳-۳ انباشت شیمیایی بخار با لیزر (LACVD)
- ۲۹ ۴-۳ روشهای تهیه لایه نازک اکسید رسانای شفاف
- ۳۰ فصل چهارم
- ۳۱ ۱-۴ مشخصه یابی لایه نازک:
- ۳۱ ۲-۴ ضخامت:
- ۳۲ اندازه گیری ضخامت با استفاده از نوسانات بلور کوآرتز (QCM):
- ۳۴ پس پراکندگی رادرفورد (RBS) :
- ۳۶ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM):.....
- ۳۸ بیضی سنجی (الیپسومتری):.....
- ۳۹ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) :
- ۴۰ روش تماسی (استاتیک یا AFM-DC):.....
- ۴۰ روش غیرتماسی (دینامیک یا AFM-AC):.....
- ۴۰ ۳-۴ خواص اپتیکی:
- ۴۱ محاسبه گاف انرژی:
- ۴۱ ۴-۴ هدایت الکتریکی:.....
- ۴۱ روش پروب چهار نقطه ای:

۴-۵ ریز ساختار:	۴۳
میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM):	۴۳
پراکندگی پرتو ایکس (XRD):	۴۴
۶-۴ ترکیب عنصری شیمیایی	۴۵
طیف نگاری جرمی یون ثانویه (SIMS):	۴۶
طیف نگاری الکترونی اوژه (AES):	۴۸
طیف نگاری الکترونی برای آنالیز شیمیایی (ESCA)(UPS , XPS)	۵۰
طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR):	۵۱
فصل پنجم	۵۲
۱-۵ پارامترهای مؤثر بر خواص لایه‌های نازک	۵۳
۲-۵ دمای بستر	۵۳
۳-۵ فشار اکسیژن	۵۳
۴-۵ ضخامت لایه	۵۴
۵-۵ نرخ لایه‌نشانی	۵۴
۶-۵ دمای بازپخت	۵۵
۷-۵ کار تجربی	۵۵
بحث و بررسی	۵۸
مراجع	۶۲
نتایج حاصل پروژه	۶۶

فهرست جداول

صفحه	عنوان و شماره
۴.....	جدول ۱-۱: خواص پایه‌ای رایج‌ترین اکسیدهای رسانای شفاف.....
۹.....	جدول ۱-۲- مقایسه خواص سه نوع اکسید رسانای شفاف.....
۶۰.....	جدول ۱-۵ تغییرات ویژگی‌های فیزیکی.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: طرح‌واره‌ای از ساختار مکعبی بی‌کس-بایت اکسید ایندیوم.....	۵
شکل ۱-۲: ساختار شش گوشه‌ی ورتزایت اکسید روی.....	۶
شکل ۱-۳: طرح‌واره‌ای از ساختار بلوری اکسید قلع.....	۸
شکل ۱-۳: طرح‌واره‌ای از سیستم تبخیر حرارتی.....	۱۹
شکل ۲-۳: طرح‌واره‌ای از سیستم انباشت با باریکه الکترونی.....	۲۰
شکل ۳-۳: سیستم کندوپاش دیودی.....	۲۱
شکل ۳-۴: طرح‌واره‌ای از سیستم لایه‌نشانی کندو پاش RF.....	۲۲
شکل ۳-۵: تصویری از اجزای مختلف سیستم کند و پاش واکنشی.....	۲۴
شکل ۳-۶: طرح‌واره‌ای از لایه‌نشانی به روش کند و سوز لیزری.....	۲۵
شکل ۳-۷: طرح‌واره‌ای از سیستم لایه‌نشانی شیمیایی بخار.....	۲۷
شکل ۴-۱: نوع برش AT برای بلور کوارتز.....	۳۳
شکل ۴-۲: شماتیک دستگاه RBS.....	۳۵
شکل ۴-۳: شماتیک دستگاه میکروسکوپ الکترونی رویشی.....	۳۷
شکل ۴-۴: شماتیک از آنالیز لایه نازک به روش بیضی سنج.....	۳۸
شکل ۴-۵: شماتیک دستگاه میکروسکپ نیروی اتمی.....	۳۹
شکل ۴-۶: اندازه‌گیری مقاومت به روش پروب چهار نقطه‌ای.....	۴۲
شکل ۴-۷: شماتیک دستگاه پراش پرتو ایکس و طیف پراکندگی.....	۴۵
شکل ۴-۸: شماتیکی از دستگاه طیف نگاری جرمی یون ثانویه.....	۴۷
شکل ۴-۹: توصیف فرایند اوزه براساس طرح ترازهای اتمی.....	۴۹
شکل ۴-۱۰: نمونه‌ای از یک طیف الکترونی اوزه.....	۵۰
شکل ۴-۱۱: شماتیکی از دستگاه xps.....	۵۱
شکل ۵-۱: سیستم تبخیر حرارتی خلاء بالا مدل (JDM 250).....	۵۶
شکل ۵-۲: تصویر لایه‌های نازک ITO/Ag/ITO پیش از بازپخت.....	۵۷

- شکل ۳-۵: لایه های نازک ITO/Ag/ITO پس از یک ساعت بازپخت در دماهای مختلف..... ۵۷
- شکل ۴-۵: طیف مقایسه ای XRD فیلم های چند لایه ای ITO/Ag/ITO حرارت دهی شده ۵۸
- شکل ۵-۵: تأثیر بازپخت در دماهای مختلف روی شفافیت لایه های نازک ITO/Ag/ITO..... ۵۹
- شکل ۶-۵: تصویر SEM از نمونه ITO/Ag/ITO بازپخت شده در دمای ۵۴۰ درجه سانتی گراد..... ۶۱

فصل اول

لایه نازک

۱-۱ لایه نازک^۱:

تعریف عمومی پذیرفته شده ای برای واژه لایه نازک وجود ندارد. عموماً این عبارت برای لایه‌های جایگذاری شده‌ای به کار می‌رود که ضخامتی کمتر از $0.5 \mu\text{m}$ دارند.

برای توصیف بیشتر لایه‌های نازک می‌توان گفت که آن‌ها پوشش نازکی هستند که در خواص شیمیایی الکتریکی و اپتیکی یک سطح موثرند. در برخی مواقع لایه نازک بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی یک سطح نظیر مقاومت ساییدگی نیز می‌تواند موثر باشد.

برای ساختن لایه نازک به طریق فیزیکی لازم است که ماده یا مواد مورد نظر را بصورت اتم، ملکول و یا مجموعه کوچکی از این ذرات تبدیل نموده و در جای دیگر، به شکل و ضخامتی مناسب انباشته کرد. تمام مراحل لایه‌نشانی باید تا حد امکان تحت کنترل قرار گیرد. برای کنترل بهتر فرآیند لایه‌نشانی، این فرآیند در خلاء انجام می‌شود. ساخت لایه نازک به سه دلیل زیر در خلاء انجام می‌گیرد:

۱- ماده یا مواد تبخیر شونده در برخورد با ذره‌های موجود در هوا از پیشرفت باز می‌ماند. در نتیجه ماده تبخیر شده بصورت ابری از ذرات ناهمگون درآمده و انباشت یکنواخت اتمها بر سطح زیرلایه دشوار خواهد بود.

۲- عناصر تشکیل دهنده هوا همراه با مواد تبخیر شده وارد لایه شده و سبب پیدایش ناخالصی ناخواسته در لایه نهایی می‌شوند.

۳- وجود برخی از عناصر با میل ترکیبی شدید در هوا سبب تشکیل ترکیبات شیمیایی ناخواسته با مواد تبخیر شده و تشکیل لایه‌ای نامطلوب می‌شوند [۸].

فرآیند لایه‌نشانی شامل سه مرحله است که عبارتند از:

۱- تشکیل فاز بخار:

در این مرحله مواد از فاز اولیه به فاز بخار برده می‌شوند. این کار از طریق یکی از روش‌های مرسوم انجام می‌شود. این روش‌ها عبارتند از تبخیر^۳، کندو پاش^۴، کند و سوز لیزری^۵ و غیره.

۲- انتقال از چشمه به زیرلایه:

¹ - Thin film
² Deposited
³ Evaporation
⁴ Sputtering
⁵ Laser ablation

مواد تبخیر شده باید از چشمه تا زیرلایه هدایت شوند. باید سعی شود که در این انتقال مواد تبخیر شده کمترین پراکندگی را داشته باشند. در طی انتقال، بعضی از نمونه‌های بخار می‌توانند با تشکیل پلاسما یونیزه شوند.

۳- تشکیل لایه بر روی زیرلایه:

این فرایند شامل چگالش گونه‌ها و ذرات تبخیر شده روی زیرلایه است و متعاقباً تشکیل لایه از طریق فرآیند هسته سازی و رشد انجام می‌گیرد. با بمباران یونی و با تغییر در ریز ساختار، ترکیب، نوع و میزان ناخالصی و فشار باقیمانده، فرایند رشد و هسته سازی لایه تشکیل شده به شدت متأثر می‌شود [۲].

درجه کنترل وابستگی این سه مرحله، نوع فرایند لایه‌نشانی را تعیین می‌کند. برای مثال نرخ لایه‌نشانی در فرایند انباشت فیزیکی بخار (PVD) قابل کنترل است در حالیکه در فرایند انباشت شیمیایی بخار (CVD) این پارامتر قابل کنترل نیست.

۲-۱ لایه‌های نازک اکسید رسانای شفاف (TCO):^۶

در سال ۱۹۰۷ پس از اینکه وجود همزمان رسانندگی و شفافیت برای اولین بار در اکسید کادمیوم CdO کشف شد، موضوع هادی‌های شفاف بسیار مورد توجه قرار گرفت. با افزایش تکنیکها و مواد مورد استفاده برای حصول به هادی شفاف دریافته شد که لایه‌های نازک اکسیدهای عناصری همچون قلع، ایندیوم، کادمیم، روی و همچنین ترکیبات آلییده شده این مواد، آلیاژهایی هستند که شفافیت زیادی داشته و هدایت الکتریکی نزدیک به فلزات از خود نشان می‌دهند. اگر چه شفافیت جزئی با کاهش نسبی هدایت الکتریکی برای لایه‌های نازک فلزی قابل حصول است، ولی هدایت الکتریکی و شفافیت بالا در مواد با استوکیومتری ذاتی قابل دسترسی نیست. اما با ایجاد الکترون‌های اضافی در موادی که گاف انرژی پهنی دارند ($E_g > 3\text{eV}$) می‌توان رسانندگی را افزایش داد. این کار از طریق افزودن آلاینده‌های مناسب و قابل کنترل در مواد و بر هم زدن استوکیومتری آنها قابل انجام است [۲۸ و ۹].

⁶ Physical vapor deposition

⁷ Chemical vapor deposition

⁸ -Transparent conductive oxide

اکسیدهای رسانای شفاف دو خاصیت عمده دارند. یکی شفافیت اپتیکی بالا (بیش از ۵۰٪) و دیگری هدایت الکتریکی زیاد می‌باشد که که عمدتاً دو جنبه انحصاری اند به این معنی که افزایش یکی باعث کاهش دیگری می‌شود. ترکیب ویژه خواص فیزیکی در موادی که باند گاف انرژی پهن دارند سبب می‌شود در محدوده نور مرئی غیر جاذب و یا شفاف باشند. پهنای باند بزرگتر از ۳/۱ eV و چگالش حاملهای الکتریکی بقدر کافی بزرگ (تراکم حفره یا الکترون بزرگتر $10^{19}/\text{cm}^3$) و ترابری بزرگ (بزرگ تراز $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) باعث می‌شود که این موارد رسانای خوب الکتریسته باشند.

در بین اکسیدهای رسانای شفاف سه نوع رایج‌تر وجود دارد که عبارتند از:

اکسید ایندیوم In_2O_3 ، اکسید قلع SnO_2 و اکسید روی ZnO که خواص الکتریکی پایه‌ای آنها در جدول ۱-۱ زیر آمده است. هر سه نوع ترکیب پهنای گاف بقدر کافی بالا برای شفافیت لازم در محدوده طیف مرئی را دارند.

جدول ۱-۱: خواص پایه‌ای رایج‌ترین اکسیدهای رسانای شفاف

ماده	پهنای باند (eV)	هدایت الکتریکی (Scm^{-1})	تراکم الکتریکی (Cm^{-3})	ترابری ($\text{Cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)
In_2O_3	۱۰۰۰۰	۳/۷۵	$> 10^{21}$	۳۵
SnO_2	۳/۳۵	۸۰۰۰	$10^{21} >$	۲۰
ZnO	۳/۶	۵۰۰۰	$10^{20} >$	۱۵

مواد بالا هر سه اکسیدهای رسانای شفاف نوع n هستند. بدین معنی که حامل‌های رسانشی در این مواد الکترون است. اکسیدهای رسانای شفاف نوع p پدیده‌ای نسبتاً جدیداند و در مقایسه با اکسیدهای رسانای شفاف نوع n آنها از نظر عملکرد هدایت الکتریکی ضعیف‌تر می‌باشد. هدایت الکتریکی کم اکسیدهای رسانای شفاف نوع p تا حد زیادی به دلیل ترابری خیلی کم این مواد در مقایسه با ترابری اکسید رسانای شفاف نوع n است. ترابری اکسیدهای رسانای شفاف نوع p عمدتاً کمتر از $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ است در حالیکه ترابری اکسیدهای رسانای شفاف نوع n در محدوده $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ $10^4 - 10^5$ می‌باشد [۴].

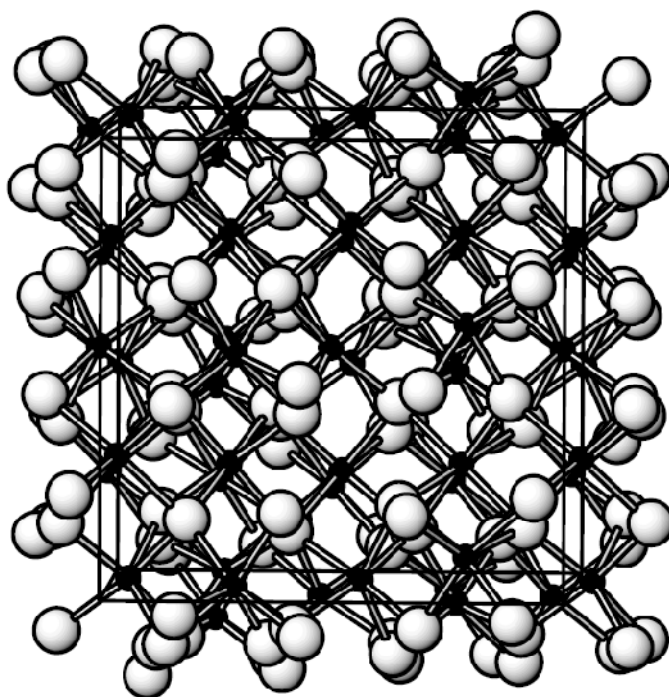
همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد اکسیدهای رسانای شفاف دیگری نیز وجود دارد که از آن

جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۱]:

AZO , ITO ($\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2$) , IZO ($\text{In}_2\text{O}_3 : \text{ZnO}$) , GZO ($\text{ZnO} : \text{Ga}_2\text{O}_3$) , ATO , TO Cd_2SnO_4 , CdO

۱-۲-۱ اکسید ایندیوم آلییده به قلع ITO:

اکسید ایندیوم آلییده با قلع به دلیل چسبندگی خوب روی زیرلایه، شفافیت در ناحیه نور مرئی، هدایت الکتریکی خوب، خواص شیمیایی پایدار و قابلیت طراحی آسان از سایر TCO ها کاربری بیشتری دارد. این ماده با آلییدن In_2O_3 توسط اتم‌های قلع تشکیل می‌شود. ساختار بلوری ITO همان ساختار بلوری In_2O_3 است که در آن اتم‌های قلع با اتم‌های ایندیوم که سه ظرفیتی هستند In^{+3} جایگزین می‌شوند. اکسید ایندیوم ساختار مکعبی بیکس-بایت دارد. در شکل ۱-۱ طرح‌واره‌ای از ساختار بلوری In_2O_3 مشاهده می‌شود. اکسید ایندیوم دارای ۴۰ اتم در سلول واحد و دو جایگاه غیر یکسان حفره می‌باشد.



شکل ۱-۱: طرح‌واره‌ای از ساختار مکعبی بیکس-بایت اکسید ایندیوم. دایره‌های کوچک سیاه اتم‌های ایندیوم و دایره‌های بزرگ سفید اتم‌های اکسیژن می‌باشند.

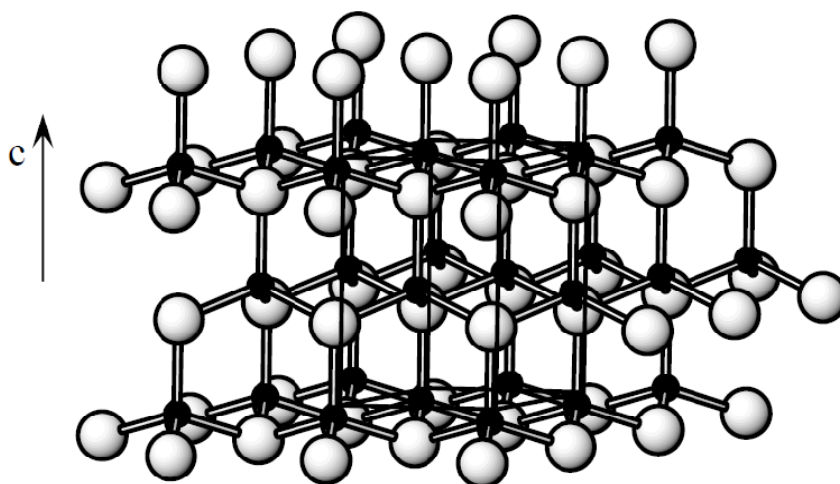
عنصر قلع دارای دو ظرفیت Sn^{2+} و Sn^{4+} می‌باشد. وقتی اتم‌های قلع وارد ساختار اکسید ایندیوم می‌شوند با اکسیژن پیوند بین شبکه‌ای تشکیل می‌دهند. بنابراین SnO یا SnO_2 خواهیم داشت. این

حالت ظرفیت رابطه مستقیمی در هدایت الکتریکی نهایی ITO خواهد داشت. وقتی Sn^{4+} با In^{+3} در شبکه In_2O_3 جایگزین می‌شود یک الکترون آزاد می‌شود و این باعث افزایش چگالی حامل‌ها می‌شود. وقتی Sn^{2+} با In^{+3} در شبکه In_2O_3 جایگزین می‌شود یک حفره ایجاد می‌شود. حالت با ظرفیت پایین-تر (با درصد کمتر SnO_2) به خاطر ایجاد حفره و کاهش تراکم حاملها سبب کاهش هدایت الکتریکی می‌شود. علاوه بر این وجود تهی جای اکسیژن نیز در رسانندگی مؤثر است. تهی جاهای اکسیژن همان جایگاه‌های اکسیژن هستند که اکسیژن خود را ازدست داده‌اند اما یک یا دو الکترون از آن اکسیژن برجای مانده. چون هم افزودن قلع و هم تهی جاهای اکسیژن در هدایت الکتریکی نهایی سهم دارند ترکیب را به صورت $\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_{3-2x}$ نمایش می‌دهند.

ITO یک نیمرسانای نوع n با چگالی حاملهای بار زیاد از مرتبه 10^{21}cm^{-3} می‌باشد [۳۰]. پارامتر شبکه ITO در محدوده 10.12 تا 10.31 آنگستروم گزارش شده است [۳۱].

۱-۲-۳ اکسید روی آلاینده با آلومینیوم AZO:

اکسید روی آلاینده نشده ZnO همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد یک نیمرسانای نوع n است و گاف انرژی پهنی ($E_g=3.2-3.3\text{eV}$ در دمای اتاق) دارد، و ساختار بلوری آن بصورت شش گوشه ورتزایت می‌باشد. در شکل ۱-۲ طرح‌واره‌ای از ساختار بلوری اکسید روی آمده است.



شکل ۱-۲: ساختار شش گوشه ورتزایت اکسید روی. دایره‌های کوچک و سیاه اتمهای Zn و دایره‌های بزرگ سفید اتمهای اکسیژن را نشان می‌دهند.

رسانندگی در اکسید روی با بر هم زدن استوکیومتری ذاتی ماده حاصل می‌شود. بدین معنی که می‌توان رسانندگی را از طریق اتمهای Zn که در جایگاه‌های بین شبکه‌ای قرار دارند و یا از طریق تهی جاهای اکسیژن (که الکترون به ساختار می‌دهند) کنترل کرد. اکسید روی آلاینده نشده خواص الکتریکی پایداری در طولانی مدت ندارند. این ناپایداری به تغییر رسانایی الکتریکی سطحی لایه‌های ZnO در طی جذب شیمیایی^{۱۱} و واجذب^{۱۲} اکسیژن وابسته است.

هرچند اکسید ایندیوم از بهترین اکسیدهای رسانای شفاف به شمار می‌رود اما به دلیل محدود بودن منابع آن و همچنین هزینه زیاد تولید، پژوهشگران به دنبال جایگزینی برای آن هستند. اکسید روی آلاینده با آلومینیوم گزینه مناسبی برای جایگزین ITO است. لایه‌های نازک AZO همانند ITO هادیهای خوبی هستند و خواص اپتیکی خوبی از خود نشان می‌دهند. بعلاوه "روی" ماده‌ای ارزان، فراوان و غیر سمی است. با وجود این اکسید روی نسبت به اکسید ایندیوم دو نقطه ضعف دارد یکی اینکه از نظر شیمیایی نسبت به ITO ناپایدارتر است و دیگر اینکه رسانندگی آن نسبت به ITO کمتر است.

اما از طرفی اکسید روی ماده‌ای است که به راحتی می‌توان آرایش نوع n به آن افزود و در ضمن ناخالصی‌های زیادی را می‌توان به همین منظور و برای بهبود رسانندگی الکتریکی و پایداری شیمیایی به آن اضافه کرد. لایه‌های نازک اکسید روی با رسانندگی و شفافیت زیاد از طریق آلاینده ZnO با عناصر گروه سه جدول تناوبی بعنوان مثال با Al و B و Ga و In یا عناصر گروه چهار (Si و Ge و Ti و Zr و Hf) حاصل می‌شود. حاملهای بار در اکسید روی آلاینده نشده تنها از طریق تهی جاهای اکسیژن حاصل می‌شود. در حالیکه در اکسید روی آلاینده یونهای وارد شده مثلاً Al^{3+} با یونهای Zn^{2+} جایگزین می‌شوند (همانطور که در مورد ITO یونهای Sn^{4+} جایگزین In^{3+} می‌شود) پایداری خواص الکتریکی را بهبود می‌بخشند. (بیشتر از Al استفاده می‌شود چون اثرات مثبتی روی هدایت الکتریکی و پایداری شیمیایی را سبب می‌شود).

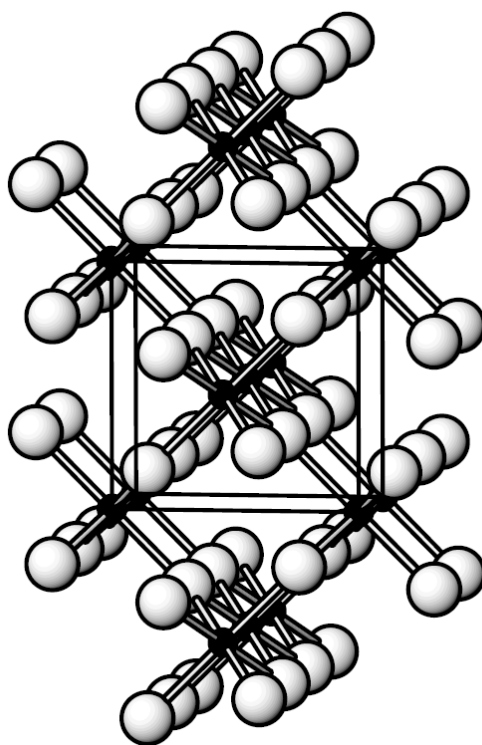
¹¹ - chemisorptions

¹² - desorption

۱-۲-۴ اکسیدهای قلع SnO, SnO_2 :

اکسید قلع یکی دیگر از هادیهای شفاف است که پیش‌تر به آن اشاره شد. اتم Sn دارای دو ظرفیت $+۲$ و $+۴$ می‌باشد به همین خاطر می‌تواند دو ترکیب SnO و SnO_2 را ایجاد کند. مشخصه‌های اکسید قلع SnO به عنوان هادی شفاف چندان جالب نیست. برای مثال باند گاف الکترونیکی در محدوده $2.5-3\text{eV}$ است که باعث می‌شود این ماده شفافیت زیادی در برابر نور مرئی نداشته باشد. علاوه بر این رسانندگی الکتریکی آن نیز کمتر از SnO_2 می‌باشد.

پس وقتی صحبت از اکسید قلع به عنوان هادی شفاف می‌شود منظور همان SnO_2 است. این ماده پهنای گافی در حدود 3.6eV دارد که باعث می‌شود در مقابل نور مرئی شفاف باشد. ساختار بلوری اکسید روی بصورت تتراگونال روتیل می‌باشد که آن را در شکل ۱-۳ مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۳: طرح‌واره‌ای از ساختار بلوری اکسید قلع. دایره‌های کوچک و سیاه اتمهای Sn و دایره‌های بزرگ و سفید اتمهای اکسیژن را نشان می‌دهند.

دی اکسید قلع «کاستریت» نیز نامیده می‌شود. این ماده نسبت به ITO دارای مقاومت الکتریکی کمتری است اما با شفافیت اپتیکی بالا در محدوده طیف مرئی کاربردهای مهمی در تکنولوژی و صنعت پیدا کرده و از جمله پر اهمیت‌ترین اکسیدهای رسانای شفاف می‌باشد. در جدول ۱-۲ خواص فیزیکی سه نوع اکسید رسانای شفاف که در بالا به اختصار معرفی شدند آمده است [12].

جدول ۱-۲ - مقایسه خواص سه نوع اکسید رسانای شفاف

Property	In ₂ O ₃	ZnO	SnO ₂
Mineral name	-	Zincite	Cassiterite
Abundance of the metal in the earth's crust (ppm)	0.1	132	40
Crystal structure	Cubic, bixbyite	Hexagonal, wurtzite	Tetragonal, rutile
Space group	I2 ₁ 3	P6 ₃ mc	P4 ₂ mm
Lattice constants [nm]	<i>a</i> = 1.012	<i>a</i> = 0.325 <i>b</i> = 0.5207	<i>a</i> = 0.474 <i>b</i> = 0.319
Density ρ [g cm ⁻³]	7.12	5.67	6.99
Mohs hardness [50]	~5	4	6.5
Thermal expansion coefficient (300 K) [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	6.7	<i>c</i> : 2.92 ⊥ <i>c</i> : 4.75	<i>c</i> : 3.7 ⊥ <i>c</i> : 4.0
Melting point [°C]	2190	2240	>1900 ^a
Melting point of metal [°C]	157	420	232
Vapor pressure of metal at 500 °C [Torr]	10 ⁻⁶	10	5 × 10 ⁻⁹
Heat of formation [eV]	9.7	3.6	6.0
Band gap [eV]	3.75	3.4	3.6
Static dielectric constant ϵ_r (the complex dielectric functions are calculated in Ref. [51])	~9	<i>c</i> : 8.75 ⊥ <i>c</i> : 7.8	<i>c</i> : 9.6 ⊥ <i>c</i> : 13.5
Effective electron mass of conduction electrons m^*/m_0 (experimental)	0.3 [53]	-	<i>c</i> : 0.23 ⊥ <i>c</i> : 0.3 [54]
Effective electron mass of conduction electrons m^*/m_0 (computational)	0.34 [52]	<i>c</i> : 0.58, 0.59 ⊥ <i>c</i> : 0.6, 0.59 [52,55]	<i>c</i> : 0.20 ⊥ <i>c</i> : 0.26 [52]
Common extrinsic n-type dopants	Sn, Ti, Zr, F, Cl, Sb, Ge, Zn, Pb, Si	B, Al, Ga, In, Si, Ge, Sn, Y, Sc, Ti, Zr, Hf, F, Cl	Sb, F, Cl

فصل دوم

کاربرد لایه‌های نازک

۱-۲ کاربردهای لایه‌های نازک

لایه نشانی بر روی سطوح مختلف به منظور تغییر کنترل شده خواص نوری، الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی سطحها انجام می‌شود. همچنین از لایه‌نشانی برای ساخت قطعات اپتیکی مانند آینه های سرد و گرم^۱، باریکه شکن^۲ و پالایه‌های نوری استفاده می‌کنند. علاوه بر این مصارف اپتو الکترونیکی، الکترونیکی، تزئینی نیز دارد.

اولین بار لایه کاهنده بازتاب روی شیشه توسط فرانهورفر^۳ در سال ۱۸۱۷ در آلمان با جلا دادن شیشه بوسیله اسید سولفوریک و یا اسید نیتریک غلیظ ساخته شد. در سال ۱۹۳۵ استرانگ^۴ در آمریکا و اسماکیولا^۵ در آلمان، لایه های کاهنده بازتاب را به روش تبخیر و چگالش فلئورید کلسیم در خلاء توسعه دادند. هرچند این لایه‌ها خواص نوری خوب و مناسبی داشتند اما پایداری محیطی و مکانیکی این لایه‌ها کم بود.

در سال ۱۹۴۲ در آمریکا، اولین لایه نشانی تک لایه‌ای کاهنده بازتاب که پایدار بود، با نشاندن فلئورید منیزیم بر روی شیشه‌ای که از قبل گرم شده بود، توسط لیون^۶ ساخته شد. این روش پس از جنگ جهانی دوم به عنوان روشی استاندارد برای تهیه لایه‌های ضد بازتاب^۷ شناخته شد. اولین سیستم دو لایه‌ای در سال ۱۹۴۹ توسط آواتر^۸ طراحی و ساخته شد. به خاطر کیفیت بالای کاهنده بازتاب سیستم دولایه‌ای، آن را بیشین تراگسیل^۹ نامیدند. سیستم های کاهنده بازتاب سه لایه‌ای در سال ۱۹۶۵ با بکارگیری رایانه های الکترونیکی به آسانی طراحی شد.

لایه های نازک به دلیل ساختار فوق العاده و ضخامت کمشان در تکنولوژی سیستم‌های پیچیده الکترونی، اپتیکی، مغناطیسی و غیره موارد استفاده بسیاری دارند. بطور کلی دلایل به کارگیری لایه های نازک در این گونه سیستم ها (به ویژه سیستم های عملی در تکنولوژی میکروالکترونیک) علاوه بر مزیت هندسه دو بعدی و تمایل به افزایش نسبت سطح به حجم آنها، بطور خلاصه شامل موارد ذیل می باشد:

¹ Cold mirrors and Hot mirrors

² Beam splitters

³ Franhofer

⁴ Strong

⁵ Smaqula

⁶ Lion

⁷ Anti-reflectance

⁸ Avator

⁹ - Trans Max

الف: کوچکی اندازه:

کوچک بودن اندازه ها و داشتن حداقل وزن و حجم، بعنوان مثال سطح مقطع مقاومت ها و لایه های نازک دی الکتریک در خازنها.

ب: ارزش اقتصادی:

ارزان بودن قیمت تمام شده قطعات ساخته شده که این مهم ارتباط تنگاتنگی با کوچک کردن اندازه ها دارد.

ج: ضریب اطمینان:

بالا بودن ضریب اطمینان و کارایی قطعات الکترونیکی و اپتیکی ساخته شده از این لایه ها.

د: توانایی بالا:

قطعات تهیه شده باید از توانایی و قابلیت بالایی برخوردار باشند. برای مثال یک قطعه که در فرکانس بالا کاربرد دارد لازم است حداقل زمان انتشار و پارازیت الکتریکی را دارا باشد.

ه: تکرار پذیری:

مراحل تهیه، ساخت و تست قطعات مختلف باید قابل کنترل باشند. بعلاوه تکرارپذیری کلیه فرآیندها باید امکان پذیر باشد.

لایه های نازک را بیشتر بر اساس خواصی که دارند دسته بندی می کنند. به عنوان مثال این لایه ها

می توانند خواص مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی و نوری قابل ملاحظه ای را از خود نشان دهند. در

نتیجه به علت خواص مختلفی که لایه های نازک دارند، کاربردهای متفاوتی را در فناوری و صنعت

پیدا کرده اند. سه دسته کاربرد عمده لایه های نازک عبارتند از:

کاربردهای خواص مکانیکی

کاربرد در الکترونیک و میکرو الکترونیک و نیمه هادیها

کاربرد در صنایع اپتیک، اپتو الکترونیک و اپتیک مجتمع

۲-۱-۱ کاربردهای خواص مکانیکی

لایه های نازک می توانند به صورت لایه هایی برای کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت، پوششهای

ضد خوردگی، پوششی که بطور قابل ملاحظه ای بار قسمتهای مختلف مکانیکی را کاهش می دهند و

غیره استفاده شوند. پوششهای متالوژیکی به عنوان پوششهای مکانیکی (برای روانکاری، پوششهای