چکیده

جایگذاری سیستم لایه نازک دوتایی نانوساختار SnO_2-Al_2O_3 به روش اسپری پایرولیزیز و مطالعه خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری آن

به وسیله‌ی:

فاطمه محرمی

در این تحقیق، لایه‌های نازک دوتایی SnO_2-Al_2O_3 و سه تایی SnO_2-Al_2O_3 : S به روش اسپری پایرولیزیز تهیه شده‌اند. برای تهیه محلول اولیه از کلرید قلع ۵ آبه، آب و اتانول (۱:۱:۱) استفاده شد و تاثیر تغییرات غلظت آلومینیوم و گوگرد بر روی خواص ساختاری، الکتریکی، اپتیکی و فوتورسانایی این لایه‌ها بررسی شد. سیستم لایه نازک SnO_2-Al_2O_3 از ترکیب کلرید قلع (۰٫۰۰۹ مول) و درصدهای مختلف ناخالصی Al (۱۰۰٪-۰)، و لایه‌های SnO_2-Al_2O_3 : S نیز برای دو نسبت اتمی ۴۰٪ و Al/Sn =۱۰٪ و مقادیر مختلف ناخالصی گوگرد (S/Sn=۰٫۰۵-۰٫۵) تهیه شدند. نتایج بدست آمده برای لایه‌های نازک SnO_2-Al_2O_3 نشان می‌دهد که در تراکم پایین آلومینیوم، در طیف‌های XRD تنها فاز SnO_2 مشاهده می‌شود، ولی در مقادیر بالاتر، فاز Al_2O_3. نیز قابل مشاهده است. شفافیت اپتیکی این لایه‌ها، با افزایش نسبت اتمی Al/Sn ابتدا کاهش و سپس در مقادیر بالاتر از ۴۰٪ افزایش می‌یابد. مقاومت سطحی لایه‌های SnO_2-Al_2O_3 در ابتدا تا [Al/Sn]= ۲۰٪ افزایش، سپس در مقادیر بین ۲۰٪ تا ۴۰٪ کاهش می‌یابد و مجددا مقاومت سطحی روند افزایشی دارد. نتایج آزمایش هال و سیبک نشان می‌دهد که در مقادیر بالای ناخالصی آلومینیوم، رسانش حاملها نوع-p می‌باشد. با افزایش مقادیر ناخالصی آلومینیوم، سیستم لایه نازک دوتایی SnO_2-Al_2O_3 خواص فوتورسانایی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

بررسی‌های انجام شده در لایه‌های SnO_2-Al_2O_3 : S نشان می‌دهد که در تراکم پایین ناخالصی گوگرد، در طیف‌های XRD فازهای پالی کریستالی SnO_2 و Al_2O_3، و با افزایش ناخالصی گوگرد فازهای Al_2S_3 و Sn_2S_3 نیز مشاهده می‌شود. شفافیت این لایه‌ها در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش هال نشان می‌دهد که رسانش حاملها در همه لایه‌های SnO_2-Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد نوع-p می‌باشد. در آزمایش سیبک نیز برای مقادیر بالای ناخالصی گوگرد (۰٫۵ و ۰٫۳ =S/Sn) لایه‌ها رسانش نوع-p دارند. در [Al/Sn]=۱۰٪ و با نسبت اتمی [S/Sn]=۰٫۵ و در [Al/Sn]=۴۰٪ و [S/Sn]=۰٫۰۵ خواص نوررسانایی (کاهش مقاومت الکتریکی) افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: بررسی مواد، خواص و کاربردهای سیستمهای دوتایی- سه‌تایی لایه نازک نیمرسانا	۱
۱-۱: مقدمه: اهمیت و کاربرد سیستمهای چندتایی و چندلایه‌ای لایه نازک	۲
۱-۲: سیستمهای دوتایی- سه‌تایی اکسیدهای نیمرسانای شفاف	۴
۱-۳: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای مغناطیسی	۹
۱-۴: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای اپتیکی	۱۲
۱-۵: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای دی الکتریک- فروالکتریک	۱۷
فصل دوم: مروری بر خواص ساختاری، الکتریکی و اپتیکی لایه‌های نازک دوتایی و سه‌تایی اکسیدهای نیمرسانا بر پایه اکسید قلع	۲۲
۲-۱: معرفی شبکه ساختاری اکسید قلع	۲۳
۲-۲: مطالعه خواص فیزیکی لایه‌های نازک دوتایی اکسیدهای نیمرسانای مغناطیسی بر پایه اکسید قلع (ناخالصیهای آهن، کبالت، منگنز)	۲۴
۲-۲-۱: لایه‌های نازک SnO_2 آلاییده شده با آهن (Fe)	۲۴
۲-۲-۲: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای مغناطیسی شفاف $SnO_2: Co$	۳۱
۲-۲-۳: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای مغناطیسی $SnO_2: Mn$	۳۴
۲-۳: مطالعه خواص فیزیکی لایه‌های نازک دوتایی اکسیدقلع با ناخالصی دهنده فلوئور(F) و آنتیموان (Sb)	۳۵
۲-۳-۱: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: F$	۳۵
۲-۳-۲: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Sb$	۳۸
۲-۴: مطالعه خواص فیزیکی لایه‌های نازک دوتایی اکسیدقلع با ناخالصی پذیرنده ایندیوم(In) ؛ آلومینیم (Al) ؛ لیتیم (Li) ؛ روی(Zn) ؛ مس (Cu) و کادمیوم (Cd)	۴۲
۲-۴-۱: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: In$	۴۲
۲-۴-۲: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Al$	۴۷
۲-۴-۳: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Li$	۵۱
۲-۴-۴: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف SnO_2-ZnO	۵۵
۲-۴-۵: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Cu$	۵۸
۲-۴-۶: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Cd$	۶۲
۲-۵: مطالعه خواص فیزیکی‌لایه‌های نازک دوتایی اکسیدقلع با ناخالصی غیرمعمول طلا (Au)؛ توریوم (Th) ، نیتروژن (N) ، و گوگرد (S)	۶۳
۲-۵-۱: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Au$	۶۳
۲-۵-۲: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: Th$	۶۵

۲-۵-۳: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: N$ ۶۸

۲-۵-۴: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $SnO_2: S$ ۷۲

۲-۶: مطالعه خواص فیزیکی‌لایه‌های نازک سه تایی $ZTO:Al$ و $ZO-TO:F$ ۷۵

۲-۶-۱: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $ZTO:Al$ ۷۵

۲-۶-۲: بررسی خواص فیزیکی لایه‌های نازک نیمرسانای شفاف $ZO-TO:F$ ۷۸

فصل سوم: تهیه محلول ولایه‌نشانی سیستم لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و آلاییده شده با گوگرد (S) به روش اسپری پایرولیزیز ۸۱

۳-۱: معرفی روش اسپری پایرولیزیز در تهیه لایه های نازک ۸۲

۳-۲: آماده سازی محلولها و شرایط اولیه ساخت و الکترودگذاری لایه‌ها. ۸۴

۳-۳: تهیه سیستم لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 به روش اسپری پایرولیزیز ۸۵

۳-۴: تهیه سیستم لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد(S) به روش اسپری پایرولیزیز ۸۷

فصل چهارم: مشخصه‌یابی و مطالعه خواص ساختاری، اپتیکی، الکتریکی و ترموالکتریک سیستم لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و لایه نازک S : SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد(S) ۸۹

۴-۱ : مقدمه ۹۰

۴-۲: معرفی روشهای مشخصه‌یابی ۹۰

۴-۲-۱: مشخصه‌یابی‌های ساختاری و اپتیکی ۹۰

۴-۲-۲: مشخصه‌یابی خواص الکتریکی ۹۱

۴-۲-۳: مشخصه‌یابی خواص ترموالکتریکی ۹۴

۴-۲-۴: مشخصه یابی نور- رسانایی ۹۴

۴-۳: خواص ساختاری لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۹۵

۴-۳-۱ : مطالعه خواص ساختاری لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۹۵

۴-۳-۲: مطالعه خواص ساختاری لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد ۹۷

۴-۴: خواص سطحی(مورفولوژی) لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۹۹

۴-۴-۱: مطالعه خواص سطحی (مورفولوژی) لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۹۹

۴-۴-۲: مطالعه خواص سطحی (مورفولوژی) لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد ۱۰۱

۴-۵: خواص اپتیکی لایه‌های نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۰۲

۴-۵-۱: مطالعه خواص اپتیکی لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۰۲

۴-۵-۲: مطالعه خواص اپتیکی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده با گوگرد ۱۰۴

۴-۶: خواص الکتریکی لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۰۸

۴-۶-۱: مطالعه خواص الکتریکی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۰۸

۴-۶-۲: مطالعه خواص الکتریکی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد ۱۱۱

۴-۷: خواص فوتورسانایی لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۱۴

۴-۷-۱: مطالعه خواص فوتورسانایی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۱۴

۴-۷-۲: مطالعه خواص فوتورسانایی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد ۱۱۵
۴-۸: خواص ترموالکتریکی لایه نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۱۶
۴-۸-۱: مطالعه خواص ترموالکتریکی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۱۶
۴-۸-۲: مطالعه خواص ترموالکتریکی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 آلاییده شده با گوگرد ۱۱۸
فصل پنجم: نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات ۱۲۰
۵-۱: جمع‌بندی از خواص ساختاری لایه های نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۲۱
۵-۱-۱: جمع‌بندی از خواص ساختاری لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۲۱
۵-۱-۲: جمع‌بندی از خواص ساختاری لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۲۲
۵-۲: جمع‌بندی از خواص اپتیکی و فوتو-رسانایی لایه های نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۲۳
۵-۲-۱: جمع‌بندی از خواص اپتیکی و فوتو-رسانایی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۲۳
۵-۲-۲: جمع‌بندی از خواص اپتیکی و فوتو- رسانایی لایه های نازک SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۲۴
۵-۳: جمع‌بندی و مقایسه خواص الکتریکی و ترموالکتریکی لایه‌های نازک دوتایی SnO_2 -Al_2O_3 و SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۲۵
۵-۳-۱: جمع‌بندی از خواص الکتریکی و ترموالکتریکی لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 ۱۲۵
۵-۳-۲: جمع‌بندی از خواص الکتریکی و ترموالکتریکی لایه‌های نازک SnO_2 -Al_2O_3 : S ۱۲۶
۵-۴: پیشنهادات ۱۲۶
مراجع ۱۲۷

فصل اول

بررسی مواد، خواص و کاربردهای سیستمهای دوتایی- سه‌تایی لایه نازک نیمرسانا

۱-۱: مقدمه: اهمیت و کاربرد سیستمهای چندتایی و چندلایه‌ای لایه نازک
۱-۲: سیستمهای دوتایی- سه‌تایی اکسیدهای نیمرسانای شفاف
۱-۳: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای مغناطیسی
۱-۴: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای اپتیکی
۱-۵: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای دی الکتریک- فروالکتریک

۱-۱: مقدمه: اهمیت و کاربرد سیستمهای چندتایی لایه نازک

به دلیل نیازهای ضروری جوامع پیشرفته امروزی، مطالعه و تحقیق بر روی مواد جدید می‌تواند راهی به سوی توسعه سیستم‌های جدید و اصلاح شده باز کند که به ساخت قطعات جدید منجر می‌شود. علاوه بر این، برای افزایش کارایی مواد وساخت قطعات پیشرفته، نیاز به درک عمیق‌تری از روابط بین ساختارها و ویژگی‌های الکترواپتیکی آنها داریم. تعداد زیادی از این مواد، ویژگی‌های اصلاح شده‌ای نسبت به مواد اولیه‌شان دارند. استفاده از ترکیبات چند مولفه-ای و چند لایه‌ای لایه نازک در طی چند دهه اخیر به طور گسترده‌ای مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. محققان به این نتیجه دست یافته‌اند که در ترکیبات چند تایی، به‌دلیل وجود دو یا چند ماده مختلف و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت، ترکیب حاصل احتمالا تلفیقی از ویژگی‌های ترکیبات به کار برده شده را دارا می‌باشد. این ترکیبات می‌توانند اکسیدی و یا غیر اکسیدی باشند[۱]. ترکیبات چند مولفه‌ای، به دلیل دارا بودن ویژگی‌های جالب توجه برای کاربرد در میکروالکترونیک، به طورگسترده‌ای بررسی شده‌اند. این مواد می‌توانند درگستره‌ای ازمواد ابررسانا، رسانا، نیمرسانا، عایق و مغناطیسی باشند که در بسیاری از سیستم-ها همچون ابزارهای فروالکتریک، پیزوالکتریک، مغناطیسی، و سیستم‌های مادون قرمز و میکروموج‌ها استفاده شوند[۲]. با استفاده ازترکیبات چندتایی یا چند مولفه‌ای، نه فقط ویژگی-های الکتریکی، اپتیکی و شیمیایی آنها، بلکه ویژگی‌های فیزیکی‌دیگری نیز مانند انرژی گاف نواری و تابع کار را می‌توان با تغییر ترکیبات شیمیایی کنترل کرد[۳]. تحقیقات گسترده‌ای بر روی سیستم‌های ترکیبی دوتایی صورت گرفته است که ناشی از بر هم‌کنش بین دو ترکیب تک مولفه‌ای است[۴]، و منجر به تولید یک سیستم جدید با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌گردد و ممکن است بازده کاتالیستی بالایی را در مقایسه با سیستم تک مولفه‌ای نشان دهد. ویژگی‌های این کاتالیست‌ها به ترکیبات شیمیایی و روش تهیه آنها بستگی دارد[۵]. ترکیبات سه‌تایی نیز، بدلیل وجود سه ترکیب شیمیایی متفاوت و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی قابل توجه، محدوده وسیعی از کاربردها را در تکنولوژی دارند. ترکیبات سه‌تایی، بعنوان

دیودهـای گسـیلنده نـوری [۱]، سیسـتم‌هـای اپتیکـی غیرخطـی[۲] و سـلول‌هـای خورشـیدی فوتوولتاییک[۳] استفاده مـی‌شـوند. امـروزه تـلاش بـرای تهیـه و بررسـی ترکیبـات چهارتـایی و بالاترنیزصورت گرفته است، اما مزیت استفاده ازترکیبات دوتایی این اسـت کـه کنتـرل تناسـب ترکیب شیمیایی آنها در لایه‌های نشانده شده، نسبت به ترکیبات سه‌تـایی و چنـدتایی آسـانتر است[۶].

افزون بر این، در بعضی از کاربردهای الکترونیکی، امـروزه محققـان برآننـد تـا لایـه‌هـای بـا بهترین کیفیت، بالاترین رسانایی، بیشترین شـفافیت اپتیکـی و پایـدارترین حالـت شـیمیایی و مکانیکی را تهیه کنند[۷]. به ایـن منظـور روش‌هـای مختلفـی بـرای بهبـود خـواص اپتیکـی، ساختاری و الکتریکی سیستم‌های لایه نازک دوتایی و چند تـایی نیمرسـانا پیشـنهاد و بررسـی شده است. از آن جمله می‌توان به تهیه لایه‌های نـازک از اکسـیدهای فلـزی مختلـف، افـزودن ناخالصی با درصدهای گوناگون به اکسیدهای رسانای شفاف یا TCOها، سیستم‌هـای ترکیبـی اکسیدهای فلزی[۴]، پوشش‌های چندلایه‌ای با لایه نشانی جداگانه شامل سیسـتم‌هـای دو و سـه چند لایه‌ای که لایه ثانویه معمولا از جنس فلز، نیمرسانا و نارسانا است، اشاره کـرد[۹-۸]. بـه عنوان مثال تا به حال ابزارهای اپتوالکترونیکی شامل الکترودهای فلزی شفاف طلا، نقره و مـس در سیستم‌های سه‌لایه‌ای دی‌الکتریک/ فلز/ دی‌الکتریک[۵] (D/M/D) و با ضخامت خیلی کم (در حدود ۱۵nm) مورد استفاده قرار رفته‌اند[۷]. در یک دیدگاه کلی سیستم‌های چند لایـه-ای را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد[۹-۷]:

۱- سیستم‌های دو لایه‌ای[۶] که می‌توانند شامل لایه‌هایی به صورت فلز / فلز، دی‌الکتریک / فلز و دی‌الکتریک / دی‌الکتریک باشند.

۲- سیستم‌های سه‌لایه‌ای[۷] که می‌توان آنها را به صورت سیستم‌هـای دی‌الکتریـک / فلـز / دی‌الکتریک، فلز / فلز / فلز، فلز / دی‌الکتریک / فلز و دی‌الکتریک / دی‌الکتریک / دی-

1- Light emitting diodes
2-Non-linear optical devices
3-Photovoltaic solar cells
4-Mixed oxides
5-Dielectric/Metal/Dielectric
6-Binary systems
7-Ternary systems

الکتریک طبقه‌بندی کرد. در این سیستم‌ها، معمولا لایه میانی به صورت یک لایه ساندویچی بین دو لایه قرار می‌گیرد.

۳- سیستم‌های دولایه‌ای و سه‌لایه‌ای با تکرار لایه نشانی.

این سیستم‌ها از تکرار لایه‌نشانی سیستم اولیه ساخته می‌شود، مانند سیستم پنج مرحله‌ای Al/Ti و سیستم Al/Ni که در سیستم دولایه‌ای Al/Ti پنج مرحله متوالی و سیستم دو-لایه‌ای Al/Ni با ضخامت هر لایه ۱۰nm؛ بطورپشت سر هم تا ضخامت کلی ۲۱۰nm لایه-نشانی شده است[۱۰].

دستیابی به خواص جدید و انتخابی در سیستم‌های چندلایه‌ای از طریق بهینه‌سازی مناسب عوامل موثر در فرایند ساخت لایه‌ها امکان‌پذیر است. از جمله آنها می‌توان به تاثیر عواملی مانند اثر ضخامت لایه‌های میزبان و میهمان، دمای زیرلایه، دمای بازپخت، جنس زیر لایه، روش لایه‌نشانی، نوع اکسید فلزی و یا فلز بر روی بهبود خواص ساختاری، الکتریکی و اپتیکی اشاره کرد. از مزایای دیگر سیستم‌های چند لایه‌ای می‌توان به فراوانی مواد اولیه و ارزان بودن آنها اشاره کرد. به همین سبب برخی از محققان معتقدند که در سال‌های آتی سیستم‌های چند-لایه‌ای جایگزین سیستم‌های تک‌لایه‌ای شوند[۸،۹،۱۱]. با این وجود، درحال حاضر گزارش‌های کمی از سیستم‌های چند لایه‌ای در سطح جهانی در دسترس است، از این لحاظ سیستم‌های چندتایی و چندلایه‌ای جزء پژوهش‌های بسیار جدید در علم فیزیک لایه‌های نازک می‌باشد[۷].

۱-۲: سیستمهای دوتایی- سه‌تایی اکسیدهای رسانای شفاف

از آنجا که اکسیدهای رسانای شفاف مانند نیمرساناها دارای گاف انرژی نسبتاً پهن (بیش از ۳/۲eV) هستند، لذا می‌توان آنها را نوع جدیدی از نیمرساناها با خواص منحصر بفرد دانست[۵۷]. اکسیدهای رسانای شفاف که به اختصار به TCO[1]ها مشهور هستند، بیش از چند دهه است که شناخته شده‌اند. نسل اول اکسیدهای رسانای شفاف در گروه نیمرساناهای نوع n قرار دارند و تحقیقات جدی بر روی آنها از یک سابقه ۴۰ ساله برخوردار است. کارهای

1-Transparent conducting oxide

گسترده‌ای در زمینه روشهای ساخت و مطالعه خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری و ترکیب شیمیایی این مواد انجام شده است که مهمترین آنها، لایه‌های نازک اکسید رسانای شفاف - SnO_2 است که تهیه آن در سال ۱۹۳۱ و لایه‌های بر پایه SnO_2 در سال ۱۹۴۱ گزارش شده است[۱۲]. این لایه‌ها در هواپیماهای جنگ جهانی دوم به کار گرفته شده‌اند. در دهه‌های بعدی اکسیدهای رسانای شفاف بر پایه In_2O_3 شامل اکسید ایندیوم قلعITO , نیمرساناهای شفاف بر پایه ZnO با ناخالصی Al و واریستورهای بر پایه ZnO گزارش شده است. در دهه-های اخیر TCOهای پیچیده شامل اکسیدهای دو تایی و سه‌تایی و محلولهای جامد سه‌تایی به اکسیدهای رسانای شفاف اضافه شده‌اند[۵۷]. در سال ۱۹۹۰، موادTCO جدید شامل اکسیدهای فلزی چند تایی مانند ترکیبات Zn_2SnO_{12}، $MgIn_2O_4$ ، $Cd_2Sb_2O_6:Y$، $GaInO_3$،$ZnSnO_3$ ، $Zn_2In_2O_5$، In_4SnO_{12} و $AgInO_2:Sn$ توسعه یافته‌اند. همچنین، سیستم‌های دوتایی- دوتایی و سه‌تایی- سه‌تایی نیز بعنوان مواد جدید توسعه یافته-اند. مینامی و همکارانش ماده جدید TCO (درسال۱۹۹۴) سیستم اکسیدی چند مولفه‌ای $ZnO-SnO_2$ را ارائه کردند. .سیستم دوتایی-دوتایی دیگر $ZnO-In_2O_3$ است که به روش اسپاترینگ تهیه شده است. در توسعه و اصلاح لایه‌های TCO ، مینامی و همکارانش (در سال ۱۹۹۵) سیستم ترکیبی سه‌تایی- سه‌تایی $Zn_2In_2O_5-MgIn_2O_4$ را بعنوان یک ماده جدید TCO تهیه نمودند. علاوه بر این، لایه‌های TCO جدید سه‌تایی- سه‌تایی از مواد رسانای شفافی همچون $GaInO_3-Zn_2In_2O_5$, $Zn_2In_2O_5-In_4Sn_3O_{12}$, $ZnSnO_3-Zn_2In_2O_5$, $ZnSnO_3-In_4Sn_3O_{12}$, و $GaInO_3-In_4Sn_3O_{12}$ تهیه شده‌اند[۱۳]. آنها به دلیل خواص و ویژگیهای استثنایی، توأم با شفافیت اپتیکی بالا در ناحیه مرئی و رسانایی الکتریکی خوب (نزدیک به رساناها)، به عنوان الکترودهای شفاف[۱] در قطعات اپتوالکترونیک[۲] و قطعات حالت جامد[۳] از قبیل قطعات نمایشی بلور مایع (LCD)، سلولهای الکترولومینسانس (ELC)، دیودهای گسیل نوری (LED)، صفحات نمایشی پلاسما (PDP)، سلولهای خورشیدی، قطعات نمایشی الکتروکرومیک (ECD)، قطعات نمایشی تروکرومیک (TCD) و قطعات

1-Transparent electrode
2-Optoelectronic device
3-Solid state device

پیزوالکتریک و همچنین، به سبب بازتاب بالا در ناحیه حرارتی طیف الکترومغناطیسی، به عنوان آینه‌های حرارتی و به دلیل تغییر رسانش الکتریکی در اثر جذب سطحی گازهای شیمیایی (از جمله گازهای سمی و الکل‌ها) به عنوان حسگر گازهای شیمیایی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۱۲،۱۴،۱۵]. نسل دوم رساناهای شفاف، نوع-p (p-TCO) می‌باشند، و تا سالهای اخیر کارهای زیادی در زمینه تهیه آنها انجام نگرفته بود. برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط ساتو[1] در انجمن تکنولوژی کانازاوای ژاپن نیمرسانای شفاف نوع p از اکسید نیکل با شفافیت ۴۰٪ در گستره مرئی گزارش شد. در سالهای بعد، با توسعه تحقیقات و کارهای آزمایشگاهی گسترده در این زمینه مطالعه بر روی مواد دیگر نیز آغاز شد [۱۲]. در واقع با کشف p-TCO حوزه جدیدی در تکنولوژی قطعات اپتوالکترونیک به نام «الکترونیک شفاف یا نامرئی» که حاصل اتصال p-n می‌باشد، ایجاد گردید. به طور کلی نیمرساناهای شفاف نوع p به چهار گروه عمده تقسیم شده‌اند [۵۷].

الف) نیمرساناهای شفاف نوع p با ساختار دلافوسیت[2]

ب) نیمرساناهای شفاف نوع p با ساختار غیر دلافوسیت[3]

ج) نیمرساناهای شفاف غیر اکسیدی نوع p

د) نیمرساناهای شفاف اکسیدی نوع p تبدیل یافته[4]

به طور کلی خصوصیات اساسی لایه‌های رسانای شفاف که در کاربردهای مختلف حایز اهمیت‌اند شامل ساختار، نحوه شکل‌گیری هدایت الکتریکی و شفافیت اپتیکی آنهاست، و می-توان این خصوصیات را با انتخاب یک ناخالصی مناسب و نیز با استفاده از روشهای رشد متفاوت بهینه کرد. در این قسمت به اختصار به توصیف برخی از خواص لایه‌های نازک رسانای شفاف می‌پردازیم.

1-Sato
2-Delafossite
3-Non-delafossite
4-Converted p-type TCO's

خواص اپتیکی

اکسیدهای نیمرسانای شفاف از نظر اپتیکی در ناحیه نور مرئی شفافیت بالایی دارند و نور مرئی را از خود عبور می‌دهند. این شفافیت اپتیکی بستگی زیادی به ساختار این لایه‌ها (که از بی شکل[1] تا بس بلوری[2] متفاوت است) دارد. به طوری که لایه‌های بی شکل به خاطر پراکندگی بیشتر شفافیت اپتیکی پایین‌تری دارند. در رابطه با مباحث نظری و تجربی اکسیدهای رسانای شفاف، در هر دو مورد نظریه‌های کوانتومی و کلاسیک قابل طرح هستند.

یکی از مشخصه‌های اپتیکی TCOها، محدوده عبور اپتیکی آنها بین طول موجهای $0/4\ \mu m$ و $1/5\ \mu m$ است. در طول موجهای کوتاهتر از $0/4\ \mu m$ (فرابنفش و به سمت طول موجهای کوتاهتر) جذب به علت یک گاف اپتیکی اتفاق می‌افتد. در واقع در این ناحیه پدیده تولید حامل اپتیکی بر اثر جذب نور رخ می‌دهد که با انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش همراه است. بنابراین نور نمی‌تواند عبور کند. در ناحیه حرارتی طیف الکترومغناطیسی (فروسرخ و به سمت طول موجهای بلندتر) بازتاب رخ می‌دهد، زیرا در این ناحیه، گاز الکترون آزاد در لایه نیمرسانا با برانگیختگی اپتیکی در بسامد پلاسما به طور جمعی نوسان می‌کند و نور اجازه عبور ندارد، این نتیجه‌ای از پدیده کلاسیکی است. طول موجهایی که عبور اپتیکی درآنها اتفاق می‌افتد به وسیله تعدادی از مشخصه‌های اصلی، بویژه با چگالی الکترونها بیان می-شوند[۱۵]. در فرکانسهای بالا TCO ها مانند یک دی الکتریک واقعی عمل می‌کنند، و لذا به عنوان لایه‌های محافظ امواج رادار در سطوح بدنه هواپیماهای نظامی مورد استفاده قرار می-گیرند[۱۶].

خواص الکتریکی

یکی از خواص بسیار مهمTCOها، رسانایی الکتریکی بالای آنها (نزدیک به رساناها) است که منشأ کاربردهای بسیار زیادی شده است. رسانش الکتریکی نیمرساناهای شفاف بستگی زیادی به نوع ناخالصی و ساختار لایه دارد، به طوری که لایه‌های با نظم بلوری بیشتر و ساختار بس

1-Amorphous
2-Poly-crystalline

بلوری، از رسانش الکتریکی و تحرک‌پذیری بالایی برخوردارند. همچنین هدایت الکتریکی به روش تهیه لایه‌ها نیز بستگی دارد. مقاومت ویژه رساناهای خوب تا $\rho = ۱۰^{-۴}\,\Omega.cm$ گزارش شده است. علاوه بر این می‌توان با انجام فرآیند ناخالص سازی با استفاده از ناخالصی‌های پذیرنده نیمرساناهای الکتریکی نوع p را نیز تهیه کرد. بدین ترتیب تهیه دیودها و ترانزیستورهای کاملاً شفاف امکان‌پذیر شده است[۱۶].

خواص ساختاری

ساختار بلوری این لایه‌ها بستگی زیادی به نوع روش لایه نشانی، عملیات حرارتی و فرایندهای ساخت دارد. معمولاً در روشهای لایه نشانی شیمیایی مانند بخار شیمیایی (CVD)، لایه نشانی چرخشی (اسپینی) و اسپری پایرولیزیز لایه‌ها ساختار بلوری بهتری دارند. در صورتی که روشهای فیزیکی مانند تبخیر حرارتی در خلاء و کندوپاش (اسپاترینگ) معمولاً لایه‌های تهیه شده بی شکل (آمورف) هستند و معمولاً برای بهتر شدن ساختمان بلوری در روشهای فیزیکی، عملیات لایه نشانی در دماهای بالا انجام می‌شود[۱۴]. افزون بر این فقط گروه خاصی از اکسیدهای رسانای شفاف دارای خواص الکتریکی، اپتیکی و ساختاری مطلوب هستند که آنها را بر اساس ساختارشان به چهار گروه مهم، خانواده کاتیونهای تتراهدرال، خانواده کاتیونهای اکتاهدرال، ساختار قفسی شکل، و خانواده کاتیونهای خطی دسته‌بندی می‌کنند[۱۴]. در جدول (۱-۱) TCOها بر حسب ساختارشان دسته‌بندی شده‌اند.

جدول۱-۱ : خانواده های اکسیدهای رسانای شفاف[۱۴]

Structural feature	Carrier type	Examples
Tetrahedrally-coordinated cations	*n*-type	ZnO
Octahedrally-coordinated cations	*n*-type	CdO, In_2O_3, SnO_2, $CdIn_2O_4$, Cd_2SnO_4, etc.
Linearly-coordinated cations	*p*-type	$CuAlO_2$, $SrCu_2O_2$, etc.
Cage framework	*n*-type	$12CaO{\cdot}7Al_2O_3$

در جدولهای (۱-۲) تا (۱-۴) به ترتیب بهترین لایه‌های رسانای شفاف بر حسب خاصیت مورد نظر معرفی شده‌اند[۵۷].

جدول (۱-۲) مقایسه برخی از انواع و مرتبه برتری تعدادی از رساناهای شفاف بر پایه اکسید روی[۵۷]

ماده نیمرسانا	مقاومت سطحی $RS\,(\Omega/)$	ضریب جذب در ناحیه مریی (α)	مرتبه شایستگی Ω^{-1} ، (σ/α)
ZnO:F	۵	۰٫۰۳	۷
ZnO:Al	۳٫۸	۰٫۰۵	۵
ZnO:Ga	۳	۰٫۱۲	۳
ZnO:B	۸	۰٫۰۶	۲
ZnO:In	۲۰	۰٫۰۲	۰٫۲

جدول (۱-۳): مقایسه تابع کار وچگالی الکترونی ویژه تعدادی از رساناهای شفاف[۵۷]

ماده نیمرسانا	تابع کار $(\Phi), eV$	تراکم الکترونی (cm^{-3})
ZnO:F	۴٫۲	۲×۱۰^{۲۰}
ZnO	۴٫۵	۷×۱۰^{۱۹}
In_2O_3***:Sn***	۴٫۸	$۱۰^{۲۱}$
SnO_2 ***:F***	۴٫۹	۴×۱۰^{۲۰}
$ZnSnO_3$	۵٫۳	۶×۱۰^{۲۰}

جدول (۱-۴) مقایسه کمترین مقاومت ویژه و طول موج پلاسما رساناهای شفاف[۵۷]

ماده رسانا	مقاومت ویژه $(\Omega\mu cm)$	طول موج پلاسما $(\lambda_p), \mu m$
Ag	۱٫۶	۰٫۴
TiN	۲۰	۰٫۷
In_2O_3***:Sn***	۱۰۰	۱٫۰<
Cd_2SnO_4	۱۳۰	۱٫۳<
ZnO:Al	۱۵۰	۱٫۳<
SnO_2 ***:F***	۲۰۰	۱٫۶<
ZnO:F	۴۰۰	۲٫۰<

۱-۳: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای مغناطیسی

نیمرساناهای مغناطیسی موادی هستند که ویژگی‌های نیمرسانایی و فرومغناطیسی را با هم دارا می‌باشند. این مواد با تزریق یونها یا اتمهای مغناطیسی در محلول جامد در ماده نیمرسانای میزبان تهیه می‌شوند و محصول نهایی بسته به چگالی یونهای مغناطیسی، فرایند سنتز و شرایط آزمایشگاهی، رفتار مغناطیسی متفاوتی را نشان می دهند[۱۷].اولین گروه از این نوع نیمرساناها بر پایه مواد نیمرسانای مشهور گالیم آرسناید (GaAs) و گالیم نیترایـد (GaN) هستند. در نیمرساناهای مغناطیسی، با افزودن مقدار جزیی از اتمهای مغناطیسی به شبکه

میزبان یک نیمرسانا، گشتاورهای مغناطیسی موضعی ایجاد می شود که از طریق برهم‌کنش تبادلی، بایکدیگر برهم‌کنش می‌کنند. به این ترتیب یک نظم مغناطیسی در نیمرسانای میزبان شکل می‌گیرد، و تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی این نظم توسعه یافته و بنابراین خاصیت فرومغناطیس در نیمرسانا ایجاد می شود.[۵۷].

شاید جالبترین و مهمترین دستاورد درعلم مغناطیس در قرن ۲۱ این است که نیمرساناهای غیرمغناطیسی و عایقهایی مثل اکسید روی (ZnO) یا اکسید تیتانیوم (TiO_2) در دمای اتاق و بالاتر از آن فقط با چند درصد از کاتیون‌های فلزاتی همچون آهن (Fe)، کبالت(Co)، منگنز(Mn) ، کروم (Cr)، وانادیوم (V) یا نیکل (Ni) فرومغناطیسی شوند.

گزارشهای فرومغناطیسی در لایه‌های نازک TiO_2 با عناصر ناخالصی Co , Fe ,Cr , V یا Ni [۱۸-۲۱] , SnO_2 با ناخالصی Cr, Mn و Fe یا Co[۲۲-۲۴] و ZnO با ناخالصی های V, Cr, Mn, Fe , Co, Ni و Cu[۲۵-۲۸] ارائه شده است. در نانوذرات برخی از این سیستم‌ها نیزخاصیت فرومغناطیسی مشاهده شده، اما این مواد دارای نظم بلوری بالا و خاصیت فرومغناطیسی خوبی نیستند. این مسئله نیز جالب توجه است که ادعا می شود لایه-های غیرآلاییده‌ی برخی از این اکسیدها، فرومغناطیسی‌اند یا اینکه می توانند با کاتیونهای غیرمغناطیسی، آلاییده شده و مغناطیسی شوند مثل TiO_2, HfO_2 و ZnO آلاییده شده با Sc [۲۹].

گونه ای از مواد نیمرسانای آلاییده شده، نیمرساناهای مغناطیسی رقیق[1] (DMS) نام دارد که در اواخر سال ۱۹۶۰ مورد بررسی قرار گرفت[۳۰] و حوزه جدید جالبی در فیزیک ماده چگال ایجاد کرده است که دارای دو ویژگی ماهیت نیمرسانا و رفتار فرومغناطیسی می‌باشد [۳۱] . علت توجه به اکسیدهای مغناطیسی رقیق این است که یک نیمرسانای فرومغناطیسی مناسب را می توان در دمای اتاق تهیه کرد. اکسیدهای مغناطیسی رقیق در حال حاضر در دماهای بالا نیز، فرومغناطیس می شوند ، اما این موضوع واضح نیست که آنها بعنوان نیمرساناهای فرومغناطیسی اند[۲۹].

1-Dilute magnetic semiconductor

نیمرساناهای مغناطیسی رقیق که در آن یونهای فلزی انتقالی، جانشینی برای کاتیونهای ماده نیمرسانای میزبان فرض شده است، سیستم ایده‌الی برای اسپین‌ترونیک[1] می‌باشند [۳۲]. از آنجا که نیمرساناهای فرومغناطیسی با دمای کوری بالا (T_C) به شدت برای سیستمهای اسپین‌ترونیک مورد تقاضا هستند، نیمرساناهای مغناطیسی رقیق (DMS) و نیمرساناهای باگاف نواری پهن، کاندیداهای امیدوارکننده‌ای هستند[۳۳]. اکسیدهای نیمرسانا که موادی با گاف نواری پهن‌اند و در ناحیه مرئی شفاف‌اند ، اگر به میزان معینی با حامل‌های نوع -n آلاییده شوند، برای بهبود و اصلاح دستگاههای اپتو اسپین ترونیک مثل حافظه های اتفاقی مغناطیسی، عایقهای اپتیکی، کامپیوترهای کوانتومی و ... مناسب می باشند[۱۷]. اسپین ترونیک تکنولوژی‌ای است که اطلاعات خواندن و نوشتن را به‌وسیله هردو حالت اسپین و بارالکترون تغییر می‌دهد[۳۴]. در حقیقت مزیت DMS برای دستگاههای اسپین ترونیکی، افزایش توانایی کامپیوتر، ظرفیت انتگرالی بالا، سرعت پردازش بالاتر داده‌ها، نیاز کمتر به انرژی الکتریکی و نیز قابلیت ساخت آنها با روشهای مرسوم درصنعت است. اثر مغناطواپتیکی[2] در DMS ها به طور مستقیم با برهم‌کنش بین الکترونهای d و یونهای فلزی انتقالی و الکترونهای اربیتالهای s و p نیمرساناهای میزبان ارتباط دارد.

برای یک DMS دمای کوری (T_C) بالاتر از دمای اتاق مطلوب است، چرا که دماهای کوری پایین، موجب کاهش کاربرد این مواد می شود[۳۵]. در DMS ها، فلزات انتقالی آلاییده نیمرساناهای II-VI و III-V به طور گسترده ای بررسی شده‌اند. یکی از موادی که بیشترین توجه را به خود جلب کرده، فاز "ورتسایت" با گاف نواری پهن اکسید روی(ZnO) است که یک نیمرسانا در گروه II-IV است و بعنوان ماده‌ای الکترواپتیکی و پیزوالکتریک[3] با گاف نواری مستقیم (۳٫۳ ev) و انرژی بستگی بزرگ مربوط به برخی از یونهای روی است که می تواند با یونهای منگنز جایگزیده شود. در شبکه نیمرسانای ZnO در میان ناخالصی‌های فلزات انتقالی (TM)، ناخالصی منگنز (Mn) به دلیل اینکه بالاترین ممان مغاطیسی ممکن را دارد و نیز ماده‌ای که دارای نوار d نیمه پر است و در نتیجه حالت پر شده پلاریزه‌ی پایداری را ایجاد می-

1-Spintronics
2-Magnto-optic
3-Piezoelectric

کند، بیشترمورد توجه است[۳۶]. عناصر III-VI نیز می‌توانند محلول جامد با فلزات انتقـالی را تشکیل دهند. ترکیبات دیگری نیز چـون GaMnAs ، InMnAs [۳۷] ، $CdCr_2Se_4$ [۳۹-۳۸] ، $Ti_{1-x}Co_xO_2$ [۴۰] و $Ge_{1-x}Mn_xTe$ [۴۱] و همچنـــین Al(Cr) ، Ga(Cr)N و آلیاژهای آنها گزینه های مناسـبی بـرای DMS هـا مـی‌باشـند. در جـدول (۱-۵) تعـدادی از نیمرساناهای شفاف مغناطیسی آورده شده است.

جدول (۱-۵): تعدادی از نیمرساناهای شفاف مغناطیسی[۲۹]

Material	E_g (eV)	Doping	Moment (μ_B)	T_c (K)
TiO_2	3.2	V – 5%	4.2	>400
		Co – 1–2%	0.3	>300
		Co – 7%	1.4	>650
		Fe – 2%	2.4	300
SnO_2	3.5	Fe – 5%	1.8	610
		Co – 5%	7.5	650
ZnO	3.3	V – 15%	0.5	>350
		Mn – 2.2%	0.16	>300
		Fe – 5%, Cu – 1%	0.75	550
		Co – 10%	2.0	280–300
		Ni – 0.9%	0.06	>300
Cu_2O	2.0	Co – 5%, Al – 0.5%	0.2	>300
		Mn – 0.3%	0.6	>300
In_2O_3	3.7	Fe – 5%	1.4	>600
		Cr – 2%	1.5	900
$(In_{1-x}Sn_x)_2O_3$	3.5	Mn – 5%	0.8	>400
CeO_2	3.4	Co – 3%	6.0	~800
$(LaSr)TiO_3$		Co – 2%	3.0	>400

۱-۴: سیستمهای ترکیبی لایه نازک نیمرسانای اپتیکی

اطلاع دقیق از ثابتهای اپتیکی، جذب، عبور و بازتاب نور در گستره وسیعی از طول موج‌ها، برای موادی که در سیستم‌های اپتیکی چون فیلترهای تـداخلی[۱]، فیبرهـای اپتیکـی[۲] و روکـش‌هـای بازتابی[۳] کاربرد دارند، مورد نیاز است. ویژگیهای اپتیکی همه مواد با ساختار اتمی، ساختار نـوار الکترونیکی و ویژگیهای الکتریکی آنها ارتباط دارد[۴۲].

1-Interference filters
2-Optical fibres
3-Reflective coating

به دلیل ویژگیهای اپتیکی و الکتریکی ویژه، شیشه‌ها یا نیمرساناهای کلکوجناید[1] جایگاه مهمی را برای کاربرد در مواد غیر بلوری دارند. این نوع نیمرساناها به دلیل شفافیت در ناحیه مرئی، ویژگیهای شیمیایی، مکانیکی و گرمایی نسبتاً خوب، مواد اپتیکی امید بخشی هستند[۴۳]، و بر پایه عناصر کلکوجناید S (گوگرد)، Se (سلنیوم) و Te (تلوریم) می‌باشند. از این گذشته، شیشه‌های کلکوجناید با افزودن عناصر دیگری چون Ge (ژرمانیوم)، As (آرسنیک)، Sb (آنتیموان)، Ga (گالیم) و... ساخته می‌شوند. این شیشه‌ها موادی با انرژی فونونی پایین می‌باشند و معمولاً از ناحیه مرئی تا مادون قرمز شفاف هستند. و در فیبرهای اپتیکی، خشک نگاری[2]، سیستم‌های فوتوولتائیک[3] و دستگاههای جدید حافظه کاربرد دارند. شیشه‌های کلکوجناید را می‌توان با عناصر خاکی کمیاب، مثل Er، Nd، Pr آلاییده نمود،که این موجب افزایش کاربرد آنها در دستگاههای اپتیکی می‌گردد. این شیشه‌های آلاییده، از لحاظ اپتیکی غیرخطی هستند و بنابراین برای سوئیچ زنی تمام اپتیکی (AOS)[4] به کار برده می‌شوند[۴۴].

ترکیبات نیمرسانای کلکوجناید

ترکیبات نیمرسانای گروه II-VI به طور پیوسته‌ای در طی ۶۰ سال گذشته پیشرفت کرده است. بررسی‌های اساسی بلورهای حجمی II-VI تا دهه‌های ۵۰ و ۶۰ ادامه یافت[۴۵]. بررسی نیمرساناهای کلکوجناید گروه II-VI از قبیل CuInSe, CdSe , CdTe در سال ۱۹۸۰ آغاز شد[۴۶]. در اوایل دهه ۱۹۹۰ ، تمرکز تکنولوژی II-VI بر روی ترکیب نقره کادمیم تلوراید (MCT) برای آشکارسازی مادون قرمز (IR)، با رشد بلورکادمیم تلوراید (CdTe) و CdZnTe همراه بوده است. از دهه ۹۰ تاکنون بیشترین کاربردهای این بلورهای اپتیکی برای قطعات اپتوالکترونیک، اپتیک غیرخطی، آشکارسازهای اشعه X و گاما، حسگرها و منابع تراهرتز[5] است[۴۵].

1-Chalcogenide
2-Xerography
3-Photovoltaeic
4-All-optical switching
5-Terahertz source

اگردراین مواد نیمرسانا، تغییر ویژگیهای ساختاری، اپتیکی و الکترونیکی ، بطور پیوسته و قابل کنترل باشد، می‌توانند درساخت قطعات با ویژگی‌های از پیش تعیین شده، به کار گرفته شود.به طور کلی موادنیمرسانای اپتیکی درگروه II-VI سه مشخصه اصلی دارند:

۱) گاف نواری مستقیم، مقدار مناسب برای آشکارسازی یا منابع نوری.

۲) گافهای نواری از نیمه فلزی تا گاف نواری پهن ۴ الکترون ولت.

۳) ارتباط بین پارامترهای شبکه و گاف نواری توسط ترکیبات نیمرسانای سه‌تایی و چهارتایی.

یکی از ترکیبات نیمرسانای II-VI ، تلوراید روی (ZnTe) است که گاف نواری مستقیم آن در تطابق با طول موج نور سبز در دمای اتاق است. بنابراین ZnTe یکی از مواد امید بخش برای دستگاههای گسیل کننده نور سبز خالص می‌باشد. مسأله اصلی برای این دستگاههای نیمرسانا با گاف پهن، ترازهای ناخالصی و تهیه اتصالات اهمی مناسب است.

اغلب نیمرساناهای گروه II-VI با گاف نواری پهن مثل ZnTe به راحتی با ناخالصی نوع *n*- آلاییده می‌شوند، اما به طور موثری نمی‌توانند با ناخالصی نوع p- آلاییده شوند. ZnTe تنها نیمرسانای II-VI است که رسانش نوع p- را نشان می‌دهد[۴۷]. ساختارهای نامتجانس بر پایه ترکیباتII-VI مواد مناسبی برای کاربرد در سیستمهای لایه نازک فوتوولتائیک خورشیدی (PV) هستند. زیرا ضریب جذب بالایی دارند. ترکیبات بر پایه گروه ۶ می‌توانند آلیاژهای سه تایی و چهارتایی با گاف نواری مستقیم و ضرایب جذب اپتیکی بالا تشکیل دهندکه می‌توانند برای ساخت دستگاههای PV با پیوند همگن به کار بروند[۴۸]. کادمیم - سلنیوم (CdSe) نیز نیمرسانای گروه II-VI است که گاف نواری مناسب (۱٫۷ eV)، ضریب جذب و خاصیت فوتورسانایی بالایی دارد. CdSe ماده نوع-n است که می‌تواند در برخی از دستگاههای اپتوالکترونیک مثل سلولهای PEC[1]، سلولهای خورشیدی هیبریدی و دیودهای گسیل نوری[2] و ... به کار برده شوند[۴۹].

1-Photoelectrochemical
2-Light emitting diode

ترکیبات نیمرسانای گروه II-VI مانند GeSe ، GeTe ، کلکوجنایدهای قلع مانند SnS, SnSe[۵۰]، ترکیبات سولفور مانند PbS، CdS، (Cd-Pb) آلاییده شده با La/Na/Sm/Pr[۵۱]، ترکیبات شامل بیسموت مانند Bi_2Se_3، Bi_2S_3، ترکیبات سلنیوم مانند $MoSe_2$[۵۲]، $Ge_{28-x}Se_{22}Sb_x$ (با درصد x=۰/۸-۱۶-۲۴) [۵۳] ، Zn_xSe_{1-x} ، ZnS_xTe_1 [۴۷]، $ZnSe_xTe_{1-x}$، $Se_8.Te_{20-x}Cu_x$ (x=۲-۶ -۸ -۱۰)[۴۳] ، و ترکیب نیمرسانای $A^IB^{III}X^{VI}$ (X=S,Te,Se, B=Al , Ga ، A=Cu , Ag) [۴۲] از مهمترین نیمرساناهای اپتیکی هستند. ترکیبات کلکوجناید به تابش الکترومغناطیسی حساس هستند و اثرهای فوتورسانایی و فوتوالقایی متفاوتی را نشان می‌دهند، مدلهای نظری مختلفی برای توضیح این پدیده ها وجود دارد، که می‌توان از این ترکیبات برای دستگاههای پراش نور، موجبرها و فیبرهای نوری استفاده نمود[۴۴].

پدیده فوتوالقایی[۱]

حداقل هفت نوع پدیده فوتوالقایی در کلکوجنایدهای آمورف مشاهده شده است. این پدیده‌ها شامل نور- تبلور[۲] ، نور- پلیمریزاسیون [۳]، نور- تجزیه‌ای [۴]، نور- انقباضی[۵] یا نور- انبساطی[۶]، نور- تبخیری[۷] و نور-حلالیت[۸] و لایه نشانی نوری است که موجب تغییرالقای نوری، در ساختار اتمی اتمی مواد نمی‌شود. این تغییرات همراه با تغییرات ثابتهای اپتیکی مثل تغییر در گاف نواری الکترونی، ضریب شکست و ضریب جذب اپتیکی است. تغییرات نوری القا شده در ترکیبات نیمرساناهای کلکوجناید به دلیل ساختار انعطاف‌پذیری که دارند و نیز به دلیل دارا بودن یک زوج حالت p در نوار رسانش، مطلوبند. همچنین بازپخت نیمرساناهای کلکوجناید می‌تواند بر روی تغییرات فوتوالقایی تأثیر بگذارد. چرا که در لایه‌های نشانده شده اثرها به صورت برگشت-ناپذیر و در لایه‌های باز پخت شده، اثرهای برگشت‌پذیر رخ می‌دهد. این تغییرات در ساختار

1-Photo induced phenomona
2-Photocrystallization
3-Photopolymerization
4-Photodecomposition
5-Photocontraction
6-Photo expansion
7-Photo vaporization
8-Photo dissolution

اتمی موضعی، نیز مشاهده شده است[۴۴]. در جدول (۱-۶) مشخصات برخی از ترکیبات کلکوجنایدی که می‌توانند برای ساخت سیستمهای اپتیکی مانند فیبرهای نوری، موجبرها و... به کار برده شوند، آورده شده است. جدول (۱-۷) نیز ویژگیهای اپتیکی لایه‌های کلکوجناید کادمیم و روی را نشان می‌دهد[۵۴] .

جدول(۱-۶) : مشخصات برخی از ترکیبات کلکوجناید[۵۴]

Starting material	Deposition method[a] (evaporation temperature)	Film composition	Film structure, packing density (p), and substrate temperature (T_s)	Transmittance range (μm) $\alpha<10^3$ cm^{-1}	Refractive index (n), wavelength (μm), and substrate temperature (T_s)	Chemical and mechanical film properties
ZnS	B (1100°C)	ZnS	Crystalline P≥0.94 (T_s = 35°C)	0.4 – 14	2.3 - 2.4 (0.55μm) (T_s = 35°C)	Soft, medium compressive stress
CdS	B (800°C)	CdS	Crystalline	0.55 – 7	2.5 (0.6μm)	Soft
ZnSe	B (950°C)	ZnSe	Crystalline	0.55 – 15	2.57(0.6μm) (T_s = 30°C)	Soft
ZnTe	B (1000°C)	ZnTe	Crystalline	-	2.8(0,55μm)	Soft
Sb_2S_3	B (370°C)	Sb_2S_3	-	0.5 – 10	3.0(0.55μm)	Soft
$Ge_{30}As_{17}$ - $Te_{30}Se_{23}$	E	$Ge_{30}As_{17}$ - $Te_{30}Se_{23}$	Amorphous	-	3.1(10.6μm)	Toxic
InSb	B[b]	InSb	-	7 – 16	4.3	Toxic
InAs	B[b]	InAs	-	3.8 – 7	4.5	Toxic
PbTe	B (850°C)	PbTe	-	3.5 – 20	5.6(5.0μm)	Soft, toxic
Si	B or E (1500°C)	Si	Amorphous up to T_s = 300°C	1 – 9	3.4(3.0μm)	Hard
Ge	B or E (1600°C)	Ge	Amorphous up to T_s = 300°C	2 – 23	4.4(2.0μm) (T_s = 30°C)	Fairly hard

جدول (۱-۷) :ویژگیهای اپتیکی لایه‌های کلکوجناید کادمیم و روی[۵۴]

Starting material	Sputtering method	Film composition	Film structure	Useful transmittance range (nm)	Refractive index (visible range)	Ref
ZnS	reactive HF sputtering Ar/H_2S	ZnS	polycrystalline (cubic and hexagonal)	400-14000	2.3	[205]
CdS	-''-	CdS	polycrystalline	600-11000	2.5	[204]
CdTe	reactive HF sputtering	CdTe	-''-	900-11000	2.70	[204]
ZnSe	-''-	ZnSe	-''-	500-20000	2.6	[204]