

# بررسی اپتیکی و الکتریکی لایه نازک اکسیدروی آلئیده با نیتروژن-آلومینیوم ساخته شده به روش سل-ژل کنترل شده

نیوشا باقری | محمدحسین مجلس آرا\*

آزمایشگاه نانوفوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

## چکیده

در این پژوهش با بکارگیری آلایش دوگانه نیتروژن و آلومینیوم، موفق به ساخت اکسیدروی نوع p با غلظت حامل‌های بالا از مرتبه  $10^{19}$  شدیم. با کنترل غلظت سورفکتانت بکار رفته دمای مورد نیاز برای عملیات حرارتی تا  $450$  درجه سانتی‌گراد کاهش یافت بدون اینکه از کیفیت خواص الکتریکی کاسته شود. جهت بررسی تاثیر آلایش انجام گرفته، نمونه آلئیده را با نمونه اکسیدروی خالص که با روش مشابه ساخته شده بود مورد بررسی الکتریکی و اپتیکی قرار دادیم، نتایج فوتولومینسانس نشان داد با آلایش، بخش عمده‌ای از عیوب ذاتی شبکه اکسیدروی خالص که در ایجاد حامل‌های اکثریت الکترون نقش اساسی دارند، حذف شدند. طیف مرئی-فرابنفش در هر دو لایه اکسیدروی عبور بیش از  $95\%$  در ناحیه مرئی را نشان داد، با آلایش نیتروژن-آلومینیوم میزان این عبور افزایش یافت. نتایج آنالیزهای الکتریکی تبدیل اکسیدروی از نوع n به نوع p را پس از آلایش دوگانه نشان دادند که با نتایج اپتیکی حاصل از طیف فوتولومینسانس نیز مطابقت دارد.

**واژگان کلیدی:** اکسیدروی نوع p، سل-ژل، فوتولومینسانس، خواص الکتریکی.

## ۱ مقدمه

امروزه استفاده از نیم‌رساناها در مقیاس نانو بسیار رایج شده و تحقیق و بررسی‌های زیادی جهت بهبود و کنترل خواص مختلف آنها، از طریق تنظیم پارامترهای متعدد دخیل در این حوزه انجام می‌شود. اکسیدروی نیز به عنوان نیم‌رسانایی که دارای خواص مطلوب و منحصر بفردی چون گاف انرژی پهن و مستقیم  $3/37$  الکترون-ولت، انرژی اکسایتونی بالا در دمای اتاق ( $60$  میلی الکترون-ولت)، غیرسمی بودن، ارزان قیمت

و در دسترس بودنش ماده‌ای بسیار پرکاربرد است، از این امر مستثنی نیست [۱-۲]. اخیراً مطالعات گسترده‌ای بر کنترل خواص مختلف اکسیدروی جهت استفاده در ابزار الکترواپتیکی در حال انجام و گزارش است. از جمله کاربردهای مهم اکسیدروی در این ابزار می‌توان به استفاده در سلول‌های خورشیدی [۳]، دیودهای نوری [۴]، آشکارسازهای فرابنفش [۵] و ... اشاره نمود. طبیعتاً چنین نیم‌رسانای پرکاربردی، در فناوری نانو نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته و تلاش‌های فراوانی برای کنترل خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی نانو ساختارهای آن صورت می‌پذیرد. اکسیدروی به صورت ذاتی نیم‌رسانای نوع n است و به طور متوسط غلظت حامل‌های الکترون آن از مرتبه  $10^{16}$  است. اما برای استفاده همه‌جانبه از یک نیم‌رسانا دستیابی به هر دو نوع رسانندگی آن یعنی رسانایی نوع n (از طریق حامل‌های اکثریت الکترون) و رسانایی نوع p (از طریق حامل‌های اکثریت حفره) الزامی است. عناصر گروه اول و پنجم جدول تناوبی کاندیدهای بالقوه برای آلایش اکسیدروی و تبدیل نوع n آن به نوع p هستند. اما ساخت نوع p اکسیدروی نیز مانند اکثر نیم‌رساناهای دارای گاف انرژی پهن به سبب وجود مشکلاتی چون انرژی تشکیل پایین دهنده‌های ذاتی، عمقی بودن سطح انرژی پذیرنده‌ها و انحلال پایین ناخالصی‌های پذیرنده در شبکه آن، دشوار است [۶]. بطوریکه همچنان تلاش‌های متعددی برای دستیابی به اکسیدروی نوع p پایدار و دارای رسانندگی و غلظت حفره‌های بالا با یک دستورکار تکرارپذیر انجام می‌شود. یکی از روش‌های افزایش انحلال و سطحی کردن انرژی عناصر پذیرنده در شبکه اکسیدروی، آلایش دوگانه است که در آن آلایش ماده از طریق عنصر پذیرنده (الکترون) با تلفیق آلایش یک عنصر دهنده (الکترون) با نسبت کمتر انجام شده و بدین ترتیب انحلال و پایداری عنصر پذیرنده الکترون (مولد حفره در شبکه)

## ۲ بخش تجربی

### ۲-۱ مواد

در سنتز و آزمایشات انجام شده برای این مقاله از استات روی دو آب مرک آلمان با درجه خلوص ۹۹/۵٪ به عنوان پیش ماده تشکیل شبکه اکسیدروی، از آمونیوم استات و آلومینیوم نیترات سیگما آلد ریچ آمریکا با درجه خلوص ۹۹/۹٪ به ترتیب برای منابع آلاییده های نیتروژن و آلومینیوم استفاده شد. دومتوکسی اتانول و مونواتانول آمین (MEA) مرک آلمان با درجه خلوص ۹۹/۵٪ نیز به ترتیب حلال و سورفکتانت هستند که به کار برده شده است.

### ۲-۲ روش آزمایش

برای تهیه سل پایدار اکسیدروی نوع p و خالص، ابتدا به انحلال پیش ماده استات روی در مخلوط حلال دومتوکسی اتانول و پایدارکننده مونواتانول آمین پرداختیم. غلظت روی در هر دو سل ۰/۵ مولار در نظر گرفته شد. برای غلظت پایدارکننده، مقدار کاهیده نسبت مولی مونواتانول آمین به روی ۴:۵ در نظر گرفته شد. به منظور آنکه با وجود کاهش میزان سورفکتانت از مقدار رایج (۱:۱)، میزان و کیفیت انحلال و همچنین پایداری سل کاهش نیابد آزمایشات متعددی انجام گرفت و نتیجه آزمایشات حاکی از آن بود که در صورتیکه ابتدا حلال و سورفکتانت را با هم بطور کامل مخلوط کرده و سپس پیش ماده را به این محیط که اکنون بستری مناسب جهت انحلال پیش ماده است، اضافه نماییم، پایداری و انحلال به میزان چشمگیری و بصورت تقریباً مستقل از غلظت پایدارکننده بهبود پیدا می کند.

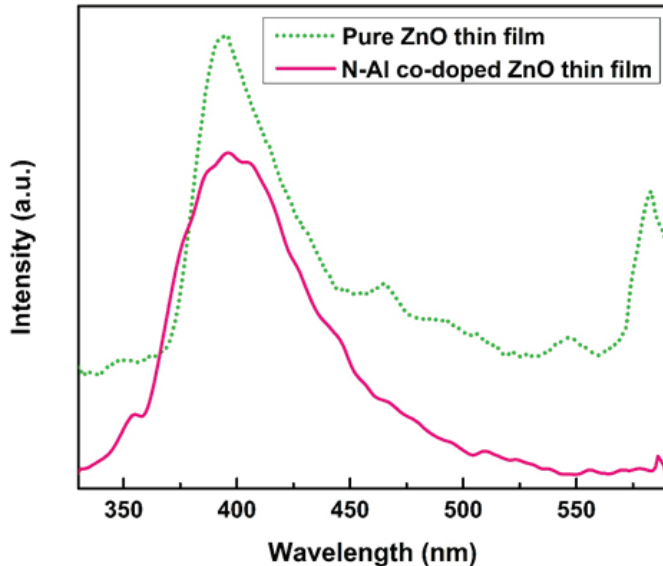
پس از افزودن پیش ماده به مخلوط دومتوکسی اتانول و مونواتانول آمین، هر یک از سل ها به مدت یک ساعت توسط همزن مغناطیسی هم خوردند تا مراحل انحلال پیش ماده و تشکیل شبکه اکسیدروی تکمیل گردد. در این مرحله سل اکسیدروی خالص، آماده و به ظرف نگهداری نمونه منتقل شد، سپس برای آلییدن سل دیگر، آمونیوم استات و آلومینیوم نیترات را اضافه نمودیم به طوریکه میزان آلیش نیتروژن ۴۵٪ و آلومینیوم ۱٪ وزن اتمی باشد. بار دیگر سل را به مدت ۳۰ دقیقه همزده تا همگن و شفاف شود.

برای ساخت لایه های نازک اکسیدروی، سل ها از طریق روش لایه نشانی چرخشی (با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۵ ثانیه) بر روی زیرلایه های شیشه ای که از قبل تمیز شده بودند،

به طرز چشمگیری افزایش می یابد [۷]. در راستای دستیابی به این هدف، روش های مختلفی مانند لایه نشانی به روش لیزر پالسی [۸]، روش تبخیر شیمیایی [۹]، کند و پاش [۱۰]، سل-ژل [۱۱] و اسپری پایرولیز [۱۲] مورد استفاده و بررسی قرار گرفته اند و با بررسی دقیق پارامترهای دخیل در طول مدت ساخت، تلاش برای بهینه سازی هر یک ادامه دارد. از این میان روش سل-ژل روشی ارزان قیمت، در دسترس و قابل استفاده در تولید انبوه و در ابعاد بزرگ و صنعتی به شمار می آید. در عین حال پارامترهای متعددی در نتیجه نهایی محصول تهیه شده به این روش نقش دارند از جمله نوع حلال، دمای پخت، نوع سورفکتانت، غلظت پیش ماده و... اما در این میان به تاثیر غلظت سورفکتانت کمتر پرداخته شده است.

بطور کلی برای ساخت هر سل پایداری باید فرایند انحلال پیش ماده در حلال به طور کامل و با ایجاد کمترین نقایص و یا ترکیبات (کمپلکس های) ناخواسته صورت پذیرد. اما از آنجا که انحلال خیلی از پیش ماده ها در حلال معمولاً با مشکل محدودیت مقدار و یا ناپایداری مواجه است، لذا وجود پایدارکننده ها (سورفکتانت ها) در روش سل-ژل به عنوان جزئی ضروری در تثبیت نتیجه نهایی لازم است. در تهیه سل های اکسیدروی نیز استفاده سورفکتانت های مناسب برای هریک از حلال های مختلف بارها و بارها گزارش شده است. در این پژوهش نسبت به ساخت نانوساختارهای اکسیدروی نوع p پایدار و تکرارپذیر با غلظت حامل های حفره بالا از طریق آلیش دوگانه نیتروژن به عنوان پذیرنده و آلومینیوم به عنوان دهنده الکترون، با یک مقدار بهینه شده، پرداخته شده و نمونه حاصل را از لحاظ خواص الکتریکی و اپتیکی مورد تحلیل و بررسی قرار داده شده است. با مقایسه خصوصیات نمونه آلییده با نمونه خالص اکسیدروی، به بررسی اثر اضافه نمودن ناخالصی های نام برده در شبکه اکسیدروی پرداخته شده است. نمونه های تهیه شده در این کار، تحت آنالیزهای فوتولومینسانس (Perkin-Elmer LS-5 Fluorescence Spectrometer)، آنالیز تابشی فرابنفش-مرئی (Perkin-Elmer)، اندازه گیری مقاومت از طریق میله چهارسر (Four point probe)، اثر هال، آنالیز جریان-ولتاژ و تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM-Mira Tescan) قرار گرفتند.

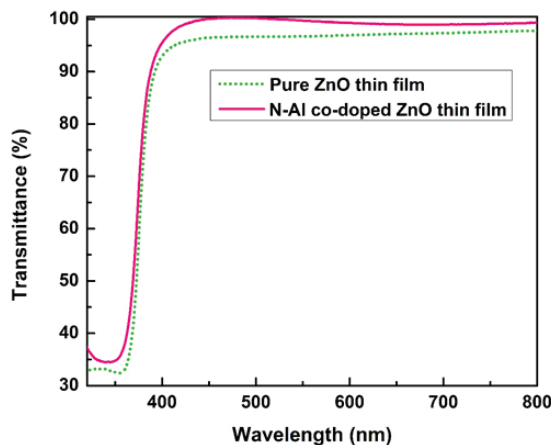
و آلائیده، به نظر می‌رسد که با آلائیدن، اکثر معایب شبکه حذف شده‌اند. بطوریکه انحلال نیتروژن سه بار یونیده و جای‌گیری آن در شبکه اکسیدروی منجر به پر شدن تهی‌جای اکسیژن به صورت منفرد و موجود در ترکیبات شبکه شده است.



شکل ۱ | طیف فوتولومینسانس لایه نازک اکسیدروی خالص و آلائیده شده با طول موج تحریک ۳۲۵ نانومتر.

### ۳-۲ طیف عبوری فرابنفش-مرئی

طیف عبوری گرفته شده از لایه‌های اکسیدروی تهیه شده، بین طول موج ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر در شکل ۲ نشان داده شده است. اگرچه لایه اکسیدروی خالص در ناحیه مرئی عبوردهی بسیار بالا (بیش از ۹۵٪) را نشان می‌دهد، اما طبق نتایج این آنالیز مشاهده می‌شود که، با افزودن ناخالصی نیتروژن و آلومینیوم این عبوردهی در ناحیه مرئی باز هم بهبود یافته تا جایی که در ناحیه بین ۴۳۰ تا ۵۵۰ نانومتر به نزدیکی مرز ۱۰۰٪ نیز می‌رسد.



شکل ۲ | طیف عبوری مرئی-فرابنفش لایه‌های نازک خالص و آلائیده با نیتروژن و آلومینیوم.

لایه‌نشانی شدند. پس از هربار لایه‌نشانی لایه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه خشک شدند. عملیات فوق برای رسیدن به ضخامت حدود ۴۰۰ نانومتر چندین بار تکرار شد و سپس لایه‌ها در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت دو ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند تا اثر ترکیبات آلی آن‌ها از بین رود.

برای آماده‌سازی قطعه پیوندی همگن p-n اکسیدروی بررسی شده در ادامه نیز ابتدا به لایه‌نشانی اکسیدروی خالص بر روی زیرلایه شیشه با روش ذکر شده در بالا پرداختیم و پس از عملیات حرارتی، دوباره بر روی همان لایه، سل اکسیدروی آلائیده، لایه‌نشانی شد و مجدداً تحت عملیات حرارتی مشابه قرار گرفت.

## ۳ نتایج و بحث

### ۳-۱ طیف فوتولومینسانس

طیف فوتولومینسانس بدست آمده از لایه‌های نازک اکسیدروی خالص و آلائیده با ناخالصی‌های نیتروژن و آلومینیوم، که از تحریک نمونه‌ها تحت طول موج ۳۲۵ نانومتر حاصل شد، در شکل ۱ ارائه شده است. هر دو نمونه در ناحیه فرابنفش در طول موج ۳۹۵ نانومتر تابشی قوی نشان داده‌اند. این تابش به گذار الکترون‌های تابشی از باند رسانش به باند ظرفیت نسبت داده می‌شود [۱۳] و در واقع گاف انرژی ماده را نیز می‌توان از طریق این طول موج و با کمک رابطه  $E_g = \frac{1240}{\lambda}$  بدست آورد. که در این کار گاف هر دو نمونه عدد تقریبی ۳/۱۳ الکترون-ولت محاسبه شد. همچنین با استفاده از رابطه زیر، با در دست داشتن گاف انرژی، می‌توان به ضریب شکست ماده نیز دست یافت:

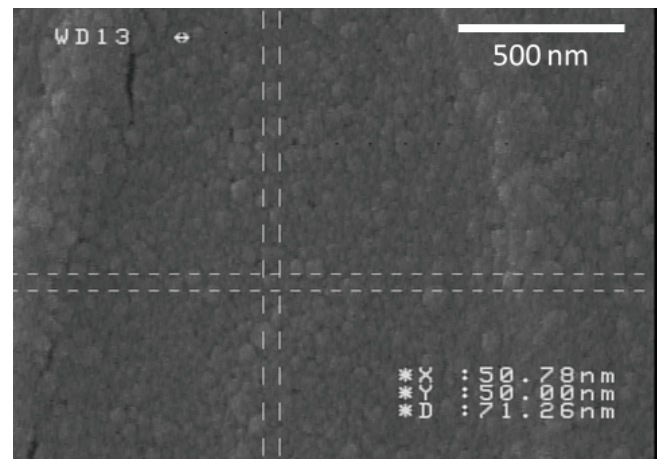
$$n = \alpha + \beta E_g$$

در این رابطه  $\alpha = ۴/۰۴۸$  و  $\beta = -۰/۰۶۲ \text{ eV}^{-1}$  هستند [۱۴]. با جایگذاری آنها در رابطه، ضریب شکست لایه‌های نازک معادل ۲/۱۰۷۴ محاسبه شد.

در طیف فوتولومینسانس لایه نازک اکسیدروی خالص پیک‌هایی در ۴۶۵، ۵۴۵ و ۵۸۰ نانومتر مشاهده می‌شود که با آلائش دوگانه نیتروژن و آلومینیوم حذف شده است. این پیک‌ها به ترتیب به تهی‌جایهای اکسیژن (۲/۶۶ الکترون-ولت)، اکسیژن‌های بین شبکه ای (۲/۲۷ الکترون-ولت) و ترکیبات جای خالی اکسیژن با روی بین شبکه ای (۲/۱۳ الکترون-ولت) نسبت داده می‌شود [۱۵-۱۶]. با مقایسه طیف دو نمونه خالص

### ۳-۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

مطابق تصویر گرفته شده از لایه‌های نازک نانوساختارهای بدست آمده وجود ذرات کروی شکل با اندازه حدوداً ۵۰ نانومتر تأیید شد. همچنین مطابق با شکل ۳ لایه‌های نازک بسیار همگن، یکنواخت و با کیفیت ارزیابی شدند. دلیل این امر علاوه بر کاهش غلظت مونواتانول آمین در حین سنتز، به روش لایه‌نشانی چندمرحله‌ای مناسب و خشک نمودن لایه‌ها پس از هر بار لایه‌زنی نیز برمی‌گردد.



شکل ۳ | تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM گرفته شده از لایه اکسیدروی آلئیده با نیتروژن و آلومینیوم.

### ۳-۴ مشخصه‌یابی الکتریکی به روش اثر هال، میله

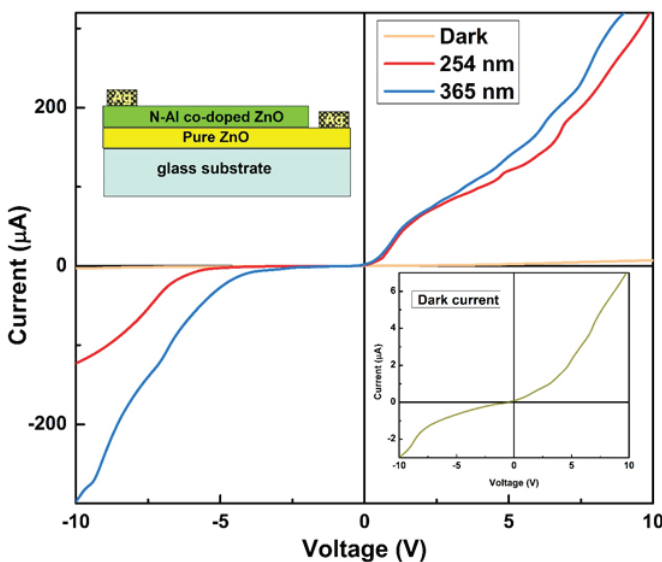
#### چهارسر و اثر سیبک

از لایه نازک اکسیدروی آلئیده شده با نیتروژن و آلومینیوم آنالیز اثر هال گرفته شد. نتایج حاکی از غلظت حفره‌ها از مرتبه بسیار بالا و مناسب  $10^{19}$  عدد در سانتی متر مکعب و تحرک پذیری  $0/1$  متر مربع بر ولت. ثانیه بود. همچنین مقاومت لایه اکسیدروی نوع p نیز از طریق اندازه‌گیری به روش میله چهارسر،  $1/8$  اهم- سانتی متر بدست آمد. نوع p رسانندگی الکتریکی اکسیدروی آلئیده از طریق آنالیز ترموالکتریک (اثر سیبک) نیز مورد تأیید قرار گرفت.

### ۳-۵ مشخصه‌یابی الکتریکی از طریق نمودار ولتاژ-جریان

چیدمان مورد استفاده در این مشخصه‌یابی شامل دو قسمت مدار الکتریکی و منبع تولید کننده طول موج تحریک نمونه است. در این پژوهش به منظور تحریک نوری پیوند p-n همگن ساخته شده با اکسیدروی خالص و آلئیده با نیتروژن و آلومینیوم، از منبعی با طول موج‌های ۳۶۵ nm و ۲۵۴ nm با توان‌های

اپتیکی ۱۲۰۰ و ۷۵۰ میکرو-وات استفاده شد. همچنین به منظور بررسی مقدار جریان-ولتاژ اعمالی به دیود، یک منبع تغذیه و یک ولت متر جهت اعمال و اندازه‌گیری ولتاژ دلخواه (بین ۱۰- تا ۱۰ ولت) و اندازه‌گیری جریان دو سر دیود نوری به کارگرفته شده است. این اندازه‌گیری جریان-ولتاژ هم تحت بایاس مستقیم و هم تحت بایاس معکوس و در دو شرایط محیط تاریک و تحت تابش فرابنفش انجام گرفت. شکل ۴ نمودار ولتاژ-جریان گرفته شده از این پیوندگاه همگن اکسیدروی p-n را نشان می‌دهد. نمودار لگاریتمی بدست آمده تأییدی بر وجود پیوند p-n حاصل شده از طریق لایه نشانی اکسیدروی نوع p آلئیده با نیتروژن و آلومینیوم بر روی اکسیدروی خالص نوع n است. همچنین جریان تاریک عبوری از نمونه ساخته شده در مقایسه با جریانی که به هنگام تحریک تابشی بدست آمده بسیار اندک بوده و حساسیت و پاسخ‌دهی اکسیدروی به تحریک تابشی را تأیید می‌کند. با توجه به نقطه شکست در بایاس معکوس که برای طول موج‌های ۲۵۴ و ۳۶۵ نانومتر، به ترتیب در ۵- و ۲/۵- ولت اتفاق افتاده نتیجه‌گیری می‌شود که در طول موج ۲۵۴ نانومتر کارکرد بهتری را از نمونه شاهد خواهیم بود.



شکل ۴ | نمودار جریان-ولتاژ تحت تابش فرابنفش و در تاریکی گرفته شده از پیوندگاه همگن اکسیدروی p-n.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش لایه‌های نازک آلاییده با نیتروژن و آلومینیوم با یک نسبت بهینه و تهیه شده با غلظت کاهشده سورفکتانت مونواتانول‌آمین ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت و از نظر اپتیکی و الکتریکی با اکسیدروی خالص مقایسه شد تا تاثیر آرایش دوگانه نیتروژن-آلومینیوم بر ساختار شبکه‌اش آشکار شود. طیف فوتولومینسانس گرفته شده از لایه‌ها تحت طول موج تحریک ۳۲۵ نانومتر نشان داد که با جایگزینی نیتروژن و آلومینیوم، معایب شبکه تا حد چشمگیری حذف شده‌اند. با حذف معایب ذاتی شبکه چون تهی‌جاها، اکسیژن و روی‌های بین‌شبکه‌ای که مولد حامل‌های اکثریت ذاتی الکترون در شبکه اکسیدروی هستند، رسانندگی از نوع n به نوع p تبدیل شد. آنالیز اثر هال غلظت حامل‌های حفره بسیار بالا از مرتبه  $10^{19}$  عدد در هر سانتی متر مکعب را آشکار نمود. اگرچه پیش از این نیز گزارشاتی مبنی بر ساخت اکسیدروی نوع p از طریق درصد آرایش ارائه شده در این مقاله گزارش شده است، اما از خصوصیتی که کار این پژوهش را منحصر بفرد می‌کند می‌توان به بالا بودن غلظت حفره‌ها علیرغم دمای بسیار پایین‌تر بازپخت نمونه‌ها نسبت به موارد ساخته شده در کارهای قبلی اشاره نمود. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که می‌توان با کاهش غلظت پایدارکننده استفاده شده نسبت به درصد رایجی که در اکثر کارهای مشابه استفاده شده است، بدون ایجاد تغییری چشمگیر در ساختار شبکه محصول نهایی و حتی با بهبود خواص الکتریکی از دمای بازپخت کاست که این موضوع برای ساخت ابزار الکترواپتیکی بسیار حائز اهمیت است چرا که با کاهش دمای پخت تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد (که در این کار ارائه شده است) استفاده از زیرلایه‌های شیشه‌ای معمولی که به راحتی و با قیمتی ارزان در دسترس هستند ممکن شده و بدین ترتیب با استفاده از آنها می‌توان ابزار الکترواپتیکی بسیار پرجاربردی را در مقیاس صنعتی و با هزینه بسیار ناچیز نسبت به استفاده از زیرلایه‌هایی چون کوارتز و سیلیسیوم که مقاوم به دمای بالا هستند، بهینه‌سازی و روانه بازار نمود.

## مراجع

- [1] A. Kaschner, U. Haboeck, M. Strassburg, M. Strassburg, G. Kaczmarczyk, a. Hoffmann, C. Thomsen, a. Zeuner, H. R. Alves, D. M. Hofmann, and B. K. Meyer, "Nitrogen-related local vibrational modes in ZnO:N," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 11, pp. 1909–1911, 2002.
- [2] N. L. Tarwal, K. V. Gurav, S. H. Mujawar, S. B. Sadale, K. W. Nam, W. R. Bae, a. V. Moholkar, J. H. Kim, P. S. Patil, and J. H. Jang, "Photoluminescence and photoelectrochemical properties of the spray deposited copper doped zinc oxide thin films," *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 6, pp. 7669–7677, 2014.
- [3] M. L. Zhang, F. Jin, M. L. Zheng, J. Liu, Z. S. Zhao, and X. M. Duan, "High efficiency solar cell based on ZnO nanowire array prepared by different growth methods," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 21, p. 10462, 2014.
- [4] B. T. Lai, C. T. Lee, J. D. Hong, S. L. Yao, and D. S. Liu, "Zinc oxide-based schottky diode prepared using radio-frequency magnetron cosputtering system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 8 PART 1, 2010.
- [5] S. Sawyer, L. Qin, and C. Shing, "Zinc Oxide Nanoparticles for Ultraviolet Photodetection," *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, vol. 20, no. 01, pp. 183–194, 2011.
- [6] C. H. Park, S. B. Zhang, and S. H. Wei, "Origin of p-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective," *Phys. Rev. B*, vol. 66, no. 7, pp. 1–3, 2002.
- [7] Y. Xu, T. Yang, B. Yao, Y. F. Li, Z. H. Ding, J. C. Li, H. Z. Wang, Z. Z. Zhang, L. G. Zhang, H. F. Zhao, and D. Z. Shen, "Influence of Ag-S codoping on silver chemical states and stable p-type conduction behavior of the ZnO films," *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 1 PART B, pp. 2161–2167, 2014.
- [8] P. K. Shin, Y. Aya, T. Ikegami, and K. Ebihara, "Application of pulsed laser deposited zinc oxide films to thin film transistor device," *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 12, pp. 3767–3771, 2008.
- [9] M. D. Barankin, E. Gonzalez, a. M. Ladwig, and R. F. Hicks, "Plasma-enhanced chemical vapor deposition of zinc oxide at atmospheric pressure and low temperature," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, no. 10, pp. 924–930, 2007.
- [10] W. L. Dang, Y. Q. Fu, J. K. Luo, a. J. Flewitt, and W. I. Milne, "Deposition and characterization of sputtered ZnO films," *Superlattices Microstruct.*, vol. 42, no. 1–6, pp. 89–93, 2007.
- [11] H. Nian, S. H. Hahn, K. K. Koo, E. W. Shin, and E. J. Kim, "Sol-gel derived N-doped ZnO thin films," *Mater. Lett.*, vol. 63, no. 26, pp. 2246–2248, 2009.
- [12] S. Golshahi and S. M. Rozati, "P-Type Zinc Oxide Nano-Structure Uniform Thin Film Deposited by Spray Pyrolysis Technique : Nitrogen Portion Variation at Precursor Solution," vol. 6, no. 1, pp. 413–418, 2011.
- [13] Z. Xiaming, W. Huizhen, W. Shuangjiang, Z. Yingying, C. Chunfeng, S. Jianxiao, Y. Zijian, D. Xiaoyang, and D. Shurong, "Optical and electrical properties of N-doped ZnO and fabrication of thin-film transistors," *J. Semicond.*, vol. 30, no. 3, p. 033001, 2009.
- [14] M. Kashif, U. Hashim, M. E. Ali, K. L. Foo, and S. M. U. Ali, "Morphological , Structural , and Electrical Characterization of Sol-Gel-Synthesized ZnO Nanorods," *J. of Nanomaterials* vol. 2013, 2013.
- [15] D. Shikha, V. Mehta, S. C. Sood, and J. Sharma, "Structural and optical properties of ZnO thin films deposited by sol-gel method: effect of stabilizer concentration," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2015.
- [16] M. Willander, O. Nur, J. R. Sadaf, M. I. Qadir, S. Zaman, A. Zainelabdin, N. Bano, and I. Hussain, "Luminescence from zinc oxide nanostructures and polymers and their hybrid devices," *Materials (Basel)*, vol. 3, no. 4, pp. 2643–2667, 2010.

# Optical & Electrical Investigation of N-Al Co-doped Zinc Oxide Fabricated by Controlled Sol-Gel Method

N. Bagheri | M.H. Majles Ara\*

Nanophotonics Laboratory, Physics Department, Kharazmi University

## Abstract

In this study, we achieved to high carrier concentration (in order  $10^{19}$ ) p-type ZnO by using N-Al co-doping. By controlling the surfactant concentration, the temperature of annealing reduced to 450°C without deterioration of electrical properties. To investigate the effect of doping, the optical and electrical properties of co-doped ZnO characteristics were compared with undoped ZnO thin film fabricated by the same method. The PL-spectra results indicate most intrinsic defects that mainly generate electron carriers, were removed by co-doping. The UV-visible spectra show both films have high transmittance in visible region (over 95%), visible transmission increased by N-Al co-doping. The electrical analysis results, confirm the conversion from n-type to p-type ZnO, Which is in agreement with the optical results of photoluminescence spectra.

## Keywords

P-type zinc oxide; Sol-gel; Photoluminescence; Electrical properties.