

## Effect of annealing temperature on structural, morphological and optical properties of Cu/NiO thin films

Elnaz Feyzi, Fatemeh Hajakbari\*, Alireza Hojabri

Department of Physics, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Received: 13.06.2021 Revised: 24.09.2021 Accepted: 23.11.2021

Doi: [10.22055/jrmb.2022.17344](https://doi.org/10.22055/jrmb.2022.17344)

### Abstract

In this study, Cu/NiO thin films were first deposited on glass and silicon substrates by the RF reactive magnetron sputtering, and then the samples were thermally annealed at 473, 673 and 873 K. For investigation of structural, morphological, and optical properties of the films different analyses were employed. X-ray diffraction results indicated that all samples are amorphous. FTIR analysis shows a peak in the wavelength range  $596.52\text{ cm}^{-1}$ , which is related to Ni-O bonding. EDS map analysis also confirms the presence of nickel, oxygen, and copper in the prepared layers. The results of AFM and FESEM analysis show that the morphology of the films is strongly influenced by the annealing temperature. The average roughness of films varied between 0.19-0.50 nm and root mean square roughness was changed between 0.25-0.63 nm. Also, by variation of annealing temperature, the optical bandgap of the samples was effectively influenced and the optical bandgap of the samples changed between 3.14-3.50 eV.

**Keyword:** Nickel oxide, Cu/NiO, RF reactive magnetron sputtering, Thermal annealing, optical properties.

---

\* Corresponding Author: fatemeh.hajakbari@kiaiu.ac.ir



## بررسی تأثیر دمای بازپخت بر ویژگی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی و

### نوری لایه‌های نازک Cu/NiO

الناز فیضی، فاطمه حاج اکبری\*، علیرضا هزبری

گروه فیزیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲ ویرایش نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲

Doi: [10.22055/jrmb.2022.17344](https://doi.org/10.22055/jrmb.2022.17344)

#### چکیده

در این تحقیق، ابتدا لایه‌های نازک Cu/NiO بر روی زیرلایه‌های شیشه و سیلیسیم با روش کندوپاش واکنشی مگنترونی RF انباشت شده و سپس نمونه‌ها در دماهای ۴۷۳، ۶۷۳ و ۸۷۳ K بازپخت حرارتی شده‌اند. برای بررسی ویژگی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی و نوری نمونه‌ها از آنالیزهای مختلفی استفاده شده است. نتایج پراش پرتو ایکس نمونه‌ها بیانگر آن است که ساختار تمامی لایه‌های تهیه شده بی‌شکل می‌باشند. آنالیز FTIR قله‌ای را در عدد موج،  $596/52 \text{ cm}^{-1}$  نشان می‌دهد که مربوط به پیوند Ni-O می‌باشد. آنالیز EDS map نیز وجود عناصر نیکل، اکسیژن و مس را در لایه‌های تهیه شده تأیید می‌کند. نتایج آنالیز AFM و FESEM نشان می‌دهند که ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها به شدت تحت تأثیر دمای بازپخت قرار گرفته و زبری میانگین لایه‌ها بین ۰٫۱۹ تا ۰٫۵۰ نانومتر و جذر میانگین مربعی زبری بین ۰٫۲۵ تا ۰٫۶۳ نانومتر تغییر کرده است. همچنین، تغییر دمای بازپخت گاف نواری نوری نمونه‌ها را تحت تأثیر خود قرار داده و گاف نواری نوری نمونه‌ها در محدوده ۳٫۱۴ تا ۳٫۵۰ الکترون ولت تغییر نموده است.

**کلیدواژگان:** اکسید نیکل، Cu/NiO، کندوپاش RF، بازپخت حرارتی، خواص نوری

#### مقدمه

نازک در اصلاح خواص سطح جامدات است. اکسید نیکل (NiO) یک ماده نیم‌رسانای نوع P، با گاف انرژی مستقیم و بزرگ در محدوده ۳٫۲ تا ۴ الکترون ولت است [۵-۱]. شکل ظاهری این ماده به صورت پودری سبز رنگ بوده و ماده‌ای غیر سمی می‌باشد. اکسید نیکل، به دلیل ثبات شیمیایی فوق‌العاده و ویژگی‌های منحصر به فرد نوری، مغناطیسی و الکتریکی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اکسید نیکل یکی از مشتقات پرکاربرد عنصر فلزی نیکل می‌باشد و به‌خاطر مواد کم هزینه و نیز کاربرد آن در چندین حوزه مورد

لایه به ماده یا موادی گفته می‌شود که به صورت پوششی بر یک سطح یا ماده دیگر سبب ایجاد خواص الکترونیکی، فیزیکی و مکانیکی جدید می‌شود. لایه‌های نازک، لایه‌هایی هستند که ضخامت آنها بین ۵۰ تا ۵۰۰۰ انگستروم می‌باشد. به بیان دیگر لایه‌های نازک، لایه‌های با دقت اتمی طراحی شده‌ای از انواع مواد اعم از فلزات، عایق‌ها، نیم‌رساناها هستند. لایه‌های نازک را می‌توان در دسته پوشش‌های نانو ساختار دسته‌بندی کرد. همچنین کاربرد عمده این لایه‌های

\*نویسنده مسئول: [fatemeh.hajakbari@kiaui.ac.ir](mailto:fatemeh.hajakbari@kiaui.ac.ir)

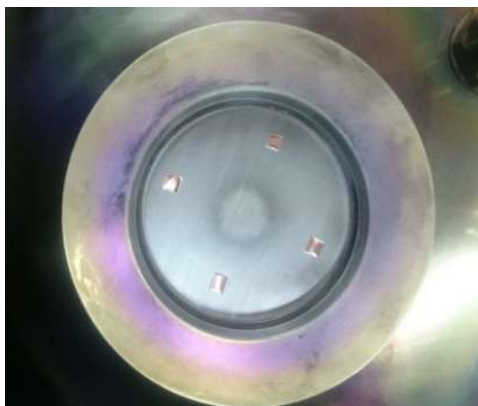
استفاده از روش کندوپاش واکنشی مگنترونی RF بر روی زیرلایه شیشه انباشت نموده و سپس خصوصیات ساختاری نمونه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج XRD فاز اکسید نیکل با ساختار مکعبی را نشان داد و همچنین با افزایش غلظت مس انرژی گاف نواری نمونه‌ها کاهش یافت.

وارون کومار و همکاران [۲۶]، لایه‌های اکسید نیکل آلاییده با مس را با استفاده از روش شیمیایی در دمای اتاق تهیه نموده و سپس در دماهای مختلف بازپخت نموده‌اند. نتایج آنالیز XRD تحقیق آنها، اکسید نیکل با ساختار مکعبی را نشان داد و همچنین طیف عبور نمونه‌های اکسید نیکل خالص و آلاییده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دما و افزودن ناخالصی، طیف عبوری از نمونه‌ها کاهش یافته است.

### کارهای آزمایشگاهی

در هر روش لایه‌نشانی اولین گام، شستشوی زیرلایه می‌باشد زیرا اگر زیرلایه به‌طور مناسبی تمیز نشود نمی‌توان لایه‌ای مناسب با چسبندگی مطلوب را به‌روی آن ایجاد کرد. در این تحقیق، زیرلایه‌هایی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند از جنس شیشه و سیلیسیم در ابعاد  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  و ضخامت حدود  $1\text{ mm}$  می‌باشند. نمونه‌های انباشتی بر روی شیشه با نماد (G) و نمونه‌های انباشتی بر روی سلیسیم با نماد (S) نام‌گذاری شده‌اند. برای تهیه لایه‌های نازک اکسید نیکل آلاییده با ناخالصی فلزی از روش کندوپاش مگنترونی واکنشی RF (مدل MSS-60) استفاده شده است. برای تمیز شدن زیر لایه‌ها از آلودگی موجود، ابتدا زیر لایه‌ها با آب و صابون شستشو داده شده و سپس در حمام فراصوتی آنها به‌ترتیب در استن (Acetone) و الکل هر بار به مدت  $15\text{ min}$  شستشو و سپس توسط گاز آرگون خشک شده‌اند. در فرآیند لایه‌نشانی، مطابق

توجه محققان قرار گرفته است. لایه‌های اکسید نیکل به دلیل داشتن شفافیت نوری بالا گزینه مناسبی برای استفاده در زمینه حسگرهای گاز، قطعات الکترونیکی شفاف، سلول‌های خورشیدی، الکترودهای شفاف و غیره هستند. برای لایه‌نشانی مواد مختلف، روش‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی به‌کار گرفته می‌شوند که هر کدام از این روش‌ها مزایای مختص به‌خود را دارند [۸-۳]. برای لایه‌نشانی ماده اکسید نیکل نیز روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن گزارش شده است. روش لایه‌نشانی، یکی از پارامترهای مؤثر بر ویژگی‌های الکتریکی و نوری لایه‌های نازک اکسید نیکل می‌باشد زیرا لایه نازک تهیه شده با روش‌های مختلف، از نظر یکنواختی، وجود تخلخل و تله‌های ساختاری و نیز کیفیت ساختار بلوری حاصل یکسان نیستند. برای تهیه لایه‌های نازک اکسید نیکل با کیفیت بالا، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود مانند: کندوپاش واکنشی مگنترونی RFDC [۵،۶]، تبخیر حرارتی [۷]، انباشت با پالس لیزری واکنشی (RPLD) [۸]، انباشت با باریکه یونی (IBAD) [۹]، تبخیر باریکه الکترونی [۱۱-۱۰]، سل ژل [۱۲]، لایه‌نشانی بخار شیمیایی [۱۳] و پیرولیز پاششی [۱۴]. اخیراً تلاش‌های زیادی برای بررسی ویژگی‌های لایه‌های نازک آلاییده با نانو ذرات فلزی مانند: Ni، Cr، Mg، In، Cu، Zn، Ag، Na و Mn توسط محققان [۲۳-۱۵] صورت گرفته است. کازویا و همکاران [۲۴]، لایه‌های اکسید نیکل آلاییده با مس را با روش کندوپاش مگنترونی RF بر روی کوارتز انباشت کرده و سپس تأثیر افزایش فشار گاز  $\text{O}_2$  را بر روی خواص نمونه‌ها بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که همه لایه‌ها آمورف بوده و خواص الکتریکی خوب و شفافیت بالا دارند. مژر و همکاران [۲۵]، لایه‌های اکسید نیکل آلاییده با مس با نسبت‌های مختلف را با



شکل ۱. هدف نیکل با ۴ عدد ناخالصی فلزی مس.

جدول ۲. شرایط بازپخت حرارتی نمونه‌ها.

نام نمونه	دمای بازپخت حرارتی (K)	زمان بازپخت حرارتی (min)
S1, G1	-	-
S2, G2	۴۷۳	۱۲۰
S3, G3	۶۷۳	۱۲۰
S4, G4	۸۷۳	۱۲۰

جهت بررسی ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها از آنالیز پراش پرتو ایکس XRD مدل (Philips, pw 1800) استفاده شده است. برای بررسی مورفولوژی و زمختی سطح نمونه‌ها از میکروسکوپ نیروی اتمی AFM، مدل: (AFM: Park Scientific Instrument Auto probe, cp USA) استفاده شده است.

همچنین، برای تأیید عناصر موجود در ترکیب و ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها به ترتیب از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM: Hitachi s-4160) استفاده شده است.

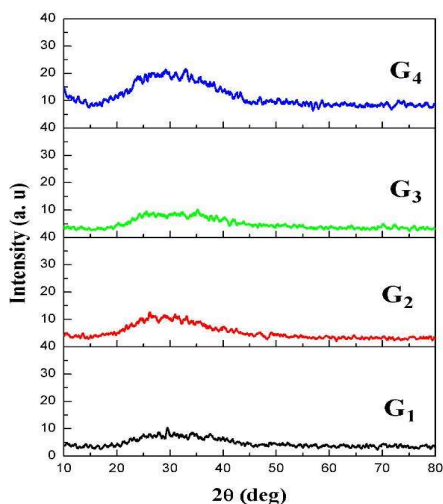
جهت مطالعه خواص نوری نمونه‌ها از طیف سنج فرابنفش-مرئی (CARY 500 scan) در بازه طول موج ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر استفاده شده است. جهت بررسی و تأیید عامل‌های شیمیایی از طیف سنجی

جدول ۱، فشار پایه  $10^{-3} \times 4,2$  میلی‌بار و فشار کاری  $10^{-2} \times 4,1$  میلی‌بار، همچنین از هدف فلزی نیکل (Ni) با خلوص ۹۹,۹۹۹٪ و ضخامت ۱۶ mm و قطر ۷ inch استفاده شده است. فاصله زیر لایه تا هدف ۷cm در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱ چهار عدد ناخالصی فلزی مس را روی هدف نیکل قرار داده و با استفاده از دو پمپ مکانیکی و دیفیوژن داخل محفظه سیستم کندوپاش خلأ شده است. طی فرآیند انباشت، دمای زیر لایه‌ها ثابت، گاز آرگون و اکسیژن به نسبت ۹۰٪ و ۱۰٪ و لایه‌نشانی به مدت ۶۰ دقیقه انجام شده است.

بعد از انباشت لایه‌های نازک Cu/NiO، نمونه‌ها به مدت یک ساعت مطابق شرایط جدول ۲، در دماهای مختلف ۴۷۳، ۶۷۳ و ۸۷۳ K به مدت ۲ ساعت تحت فلوی اکسیژن بازپخت حرارتی شدند.

جدول ۱. شرایط آزمایش

مقادیر	پارامترها
RF reactive sputtering	روش کندوپاش
Ni	هدف
شیشه و سیلیسیم	زیر لایه
۷۰	فاصله هدف تا زیر لایه (mm)
۳۰۰	دمای زیر لایه (K)
$4,2 \times 10^{-3}$	فشار پایه (mbar)
$4,1 \times 10^{-2}$	فشار کاری (mbar)
۹۰٪ (Ar) +۱۰٪ (O <sub>2</sub> )	درصد گاز آرگون و اکسیژن
۶۰	توان (w)
۶۰	زمان انباشت (min)



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های Cu/NiO بر روی زیر لایه‌های شیشه قبل و بعد از بازپخت حرارتی: G1: بدون بازپخت، G2: ۴۷۳ K : G3 و ۶۷۳ K : G4 و ۸۷۳ K

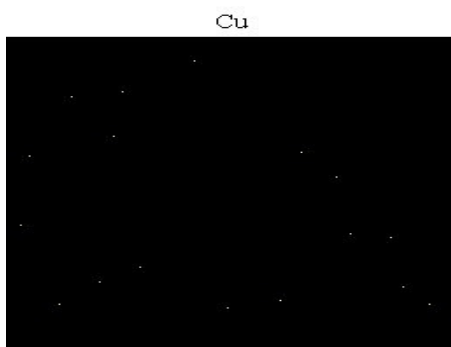
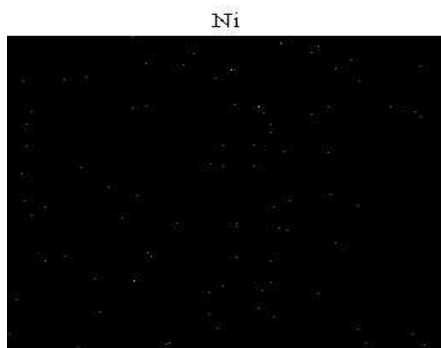
در کار تحقیقی قبلی ما [۲۷]، برای تهیه‌های لایه‌های اکسید نیکل، از روش اکسیژن دهی حرارتی لایه‌های نیکل انباشتی به روش تبخیر باریکه الکترونی استفاده شده است و تأثیر دمای بازپخت بر ویژگی‌های نانو ساختاری، مورفولوژی و نوری لایه‌های تهیه شده بررسی شده است. نتایج XRD نمونه‌ها نشان داد که ساختار لایه‌ها و بلورینگی آنها قویاً تحت تأثیر دمای بازپخت قرار گرفته و در دمای ۸۷۳ K بهترین خاصیت بلوری مشاهده شده است. در حالی که در تحقیق حاضر که از روش لایه‌نشانی کندوپاش مگنترونی واکنشی RF و نیز قرار دادن ناخالصی‌های مس بر روی هدف نیکل در حین لایه نشانی استفاده شده است حتی با بازپخت حرارتی نمونه‌ها تا دمای ۸۷۳ K نیز در لایه‌ها خاصیت بلوری مشاهده نشده است.

برای تأیید عناصر موجود در ترکیب نمونه، بر روی نمونه Cu/NiO انباشتی بر روی زیرلایه سیلیسیم آنالیز EDSmap انجام شده و در شکل ۳ نتایج آن آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود عناصر سیلیسیم Si، اکسیژن O، نیکل Ni و مس Cu تأیید

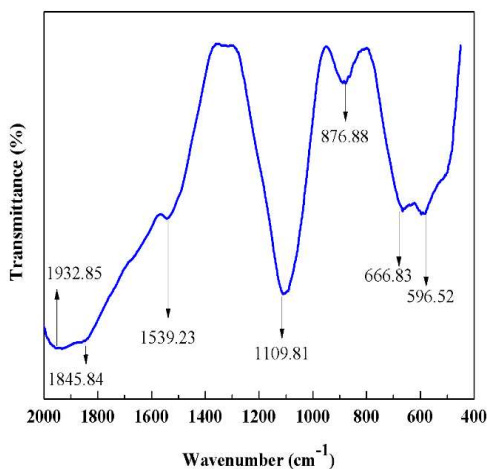
مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR; Perkin Elmer Spectrum 100) که یکی از روش‌ها برای شناسایی گروه‌های آلی در مولکول می‌باشد استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها از آنالیز مقطعی میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی استفاده شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور بررسی ساختار بلوری نمونه‌ها از آنالیز (XRD) استفاده شده است. برای تولید پرتو ایکس از یک هدف کبالت که طول موج پرتو ایکس ایجاد شده از آن برابر ۰٫۱۷۸۹۰۱ نانومتر است استفاده شده است. الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های انباشتی بر روی زیر لایه شیشه که با روش کندوپاش مگنترونی واکنشی RF تهیه شده‌اند قبل و بعد از بازپخت حرارتی در شکل ۲ آورده شده است. قله پهنی که در زاویه  $2\theta = 30^\circ$  مشاهده می‌شود مربوط به زیرلایه شیشه است و به جزء آن هیچ پیک دیگری در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود و بیانگر آن است که ساختار لایه‌های تهیه شده قبل و بعد از بازپخت حرارتی بی‌شکل می‌باشند. در تحقیقی که توسط کازویا و همکاران انجام شده است نیز، لایه‌های اکسید نیکل آلائیده با مس که با روش کندوپاش مگنترونی RF بر روی زیر لایه کوارتز انباشت شده‌اند بی‌شکل می‌باشند و افزایش فشار گاز  $O_2$  ساختار لایه‌ها را تغییر نداده است [۲۴].



شکل ۳. الگوی پراش انرژی پرتو ایکس EDS map لایه‌های Cu/NiO بر روی زیر لایه سیلیسیوم

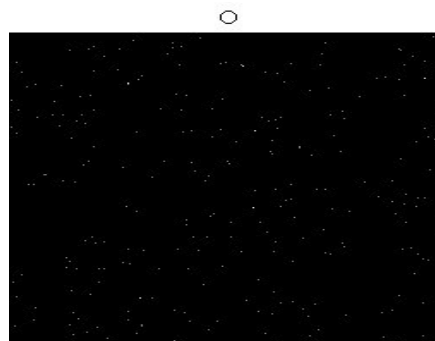
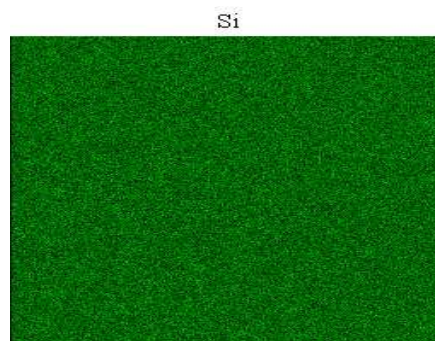


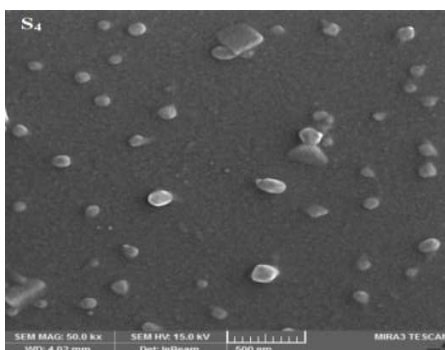
شکل ۴. طیف FTIR لایه اکسید نیکل آلاینده با مس بر روی زیر لایه سیلیسیوم.

با توجه به اینکه از لایه‌های نازک اکسید نیکل در قطعات اپتوالکترونیک استفاده می‌شود و از طرف دیگر ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها بر خواص اپتیکی لایه‌ها تأثیر به‌سزایی دارد به‌همین دلیل برای مطالعه ریز

شده و چگونگی پراکندگی عناصر در شکل قابل مشاهده است.

شکل ۴، طیف (FTIR) لایه اکسید نیکل آلاینده با مس که بر روی زیر لایه سیلیسیوم انباشت شده و در دمای ۸۷۳ K بازپخت حرارتی شده است را در محدوده  $450-2000 \text{ cm}^{-1}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله جذب در محدوده  $1540 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوندهای کششی (ارتعاشات خمشی) O-H می‌باشد. همچنین قله‌های مشاهده شده در عدد موج  $596 \text{ cm}^{-1}$  و  $667 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به اکسید نیکل خالص و مس Cu, Ni-O در لایه‌های Cu/NiO می‌باشند [۲۶].

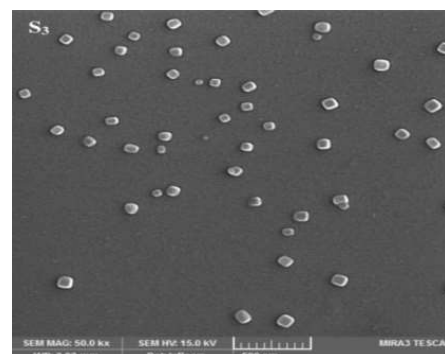
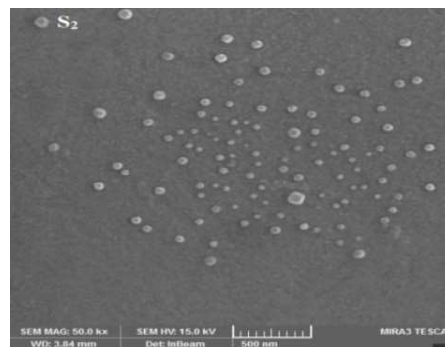
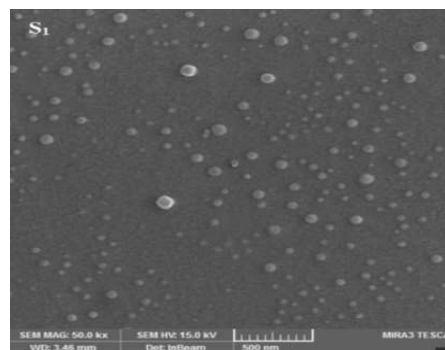




شکل ۵. تصویرهای FE-SEM لایه‌های Cu/NiO انباشتی بر روی زیرلایه سیلیسیم، قبل و بعد از باز پخت حرارتی: S1: بدون بازپخت، S2: ۴۷۳ K، S3: ۶۷۳ K و S4: ۸۷۳ K

ریخت شناسی و زبری سطح لایه‌های انباشتی بر روی زیرلایه سیلیسیم با آنالیز AFM بررسی شده است. تصویرهای AFM لایه‌های Cu/NiO انباشتی بر روی زیرلایه سیلیسیم قبل و بعد از بازپخت حرارتی در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. شکل ۶، تصویرهای AFM دو بعدی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تصویر دو بعدی AFM نمونه‌ها نشان می‌دهد که دانه‌های ریز کروی در کنار یکدیگر بر روی سطح لایه‌ها توزیع شده‌اند و با افزایش دمای بازپخت به علت افزایش تحرک اتم‌های روی سطح، دانه‌ها به هم نزدیک‌تر شده و لایه یکنواخت و همگنی را تشکیل داده‌اند. شکل ۷، تصویرهای سه بعدی نمونه‌ها را قبل و بعد از بازپخت حرارتی نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد قبل از بازپخت، رشد لایه در نمونه S1 به صورت کپه‌ای شکل می‌باشد اما بازپخت حرارتی در دماهای مختلف ۴۷۳، ۶۷۳ و ۸۷۳ K سبب تغییر ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها شده است. در جدول ۳، مقادیر جذر میانگین مربعی زبری ( $R_{rms}$ ) و زبری میانگین ( $R_a$ ) نمونه‌های تهیه شده آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای بازپخت،

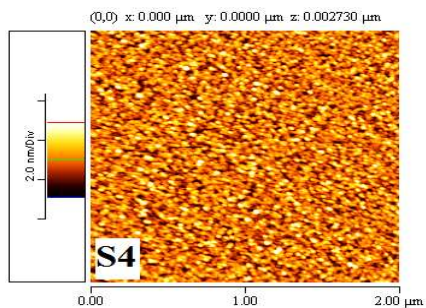
ساختارها و اثر ناخالصی بر روی ریخت شناسی سطح لایه‌های تهیه شده در این تحقیق، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. در شکل ۵ تصویرهای FESEM لایه‌های انباشتی بر روی زیر لایه‌های سیلیسیم در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، قبل و بعد از بازپخت حرارتی نشان داده شده است. در تصویرهای گرفته شده از لایه‌ها، ترک مشهودی مشاهده نمی‌شود. همچنین، تصاویر نشان می‌دهند که با افزایش دمای بازپخت ذرات به صورت کلوخه‌ای بر روی لایه رشد نموده‌اند.



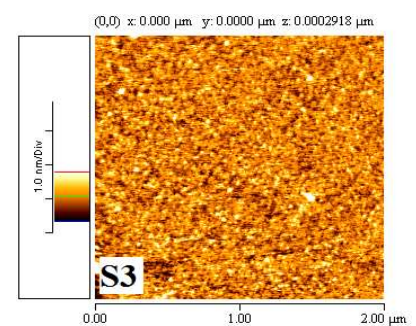
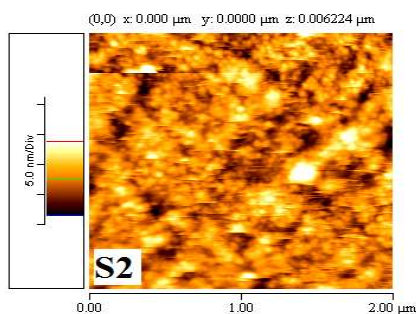
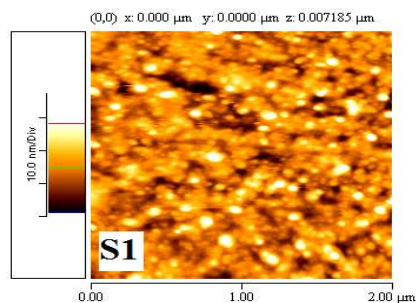
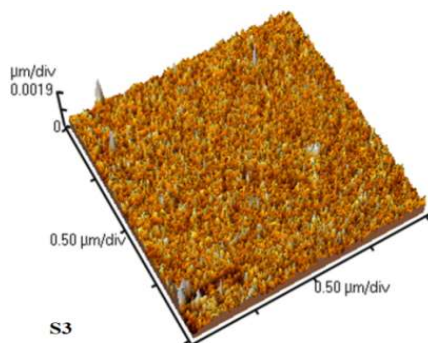
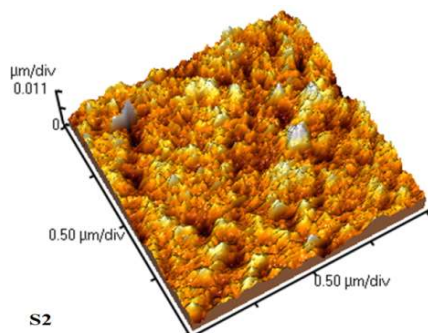
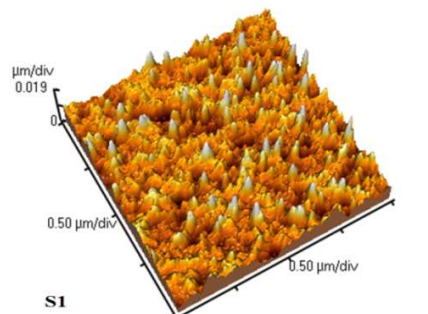
مورفولوژی و زبری سطح لایه‌های اکسید نیکل آلیپده با مس را تحت تأثیر قرار داده است.

جدول ۳. مقادیر زبری (Rrms) و زبری میانگین (Ra) لایه‌های Cu/NiO قبل و بعد از باز پخت حرارتی. S1: بدون بازپخت، S2: ۴۷۳ K، S3: ۶۷۳ K و S4: ۸۷۳ K

نام نمونه	دمای بازپخت (K)	زبری (Rrms) (nm)	زبری (Ra) (nm)
S1	-	۰٫۶۰	۰٫۴۸
S2	۴۷۳	۰٫۲۶	۰٫۲۰
S3	۶۷۳	۰٫۲۵	۰٫۱۹
S4	۸۷۳	۰٫۶۳	۰٫۵۰

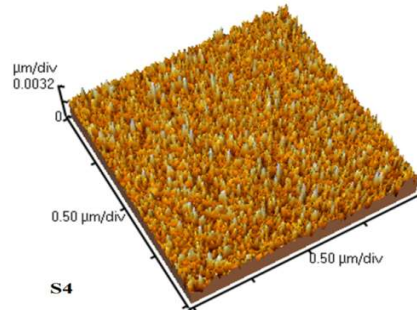


شکل ۶. تصویر دو بعدی AFM لایه‌های نازک Cu/NiO قبل و بعد از بازپخت حرارتی: S1: بدون بازپخت، S2: ۴۷۳ K، S3: ۶۷۳ K و S4: ۸۷۳ K

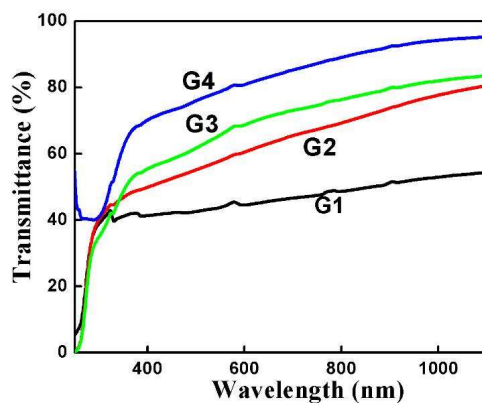




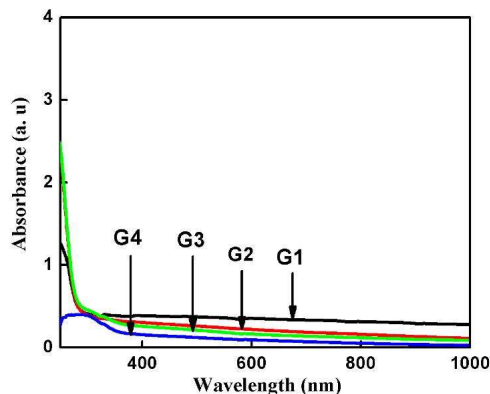
ژانگ [۷]، لایه‌های اکسید نیکل آلائیده با مس را با روش کندوپاش مگنترونی DC در دماهای متفاوت زیرلایه تهیه کرده و مشاهده نمود که با افزایش دمای زیرلایه میزان طیف عبوری از لایه‌ها افزایش یافته است. در این تحقیق، با توجه به شفافیت نوری بالای نمونه‌های تهیه شده، می‌توان از این نمونه‌ها در قطعات اپتوالکترونیک استفاده نمود.



شکل ۷. تصویر سه بعدی AFM لایه‌های نازک Cu/NiO قبل و بعد از بازپخت حرارتی: S1: بدون بازپخت، S2: ۴۷۳ K، S3: ۸۷۳ K و S4: ۶۷۳ K



شکل ۸. طیف عبوری نمونه‌های انباشتی بر روی شیشه قبل و بعد از باز پخت حرارتی. G1: بدون بازپخت، G2: ۴۷۳ K، G3: ۸۷۳ K و G4: ۶۷۳ K



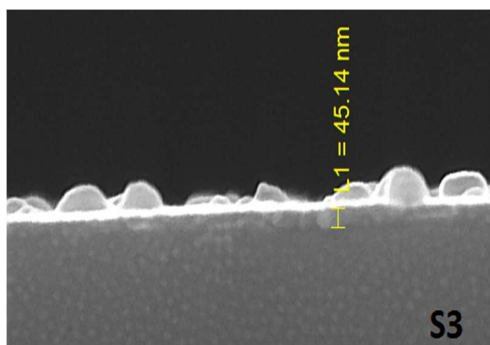
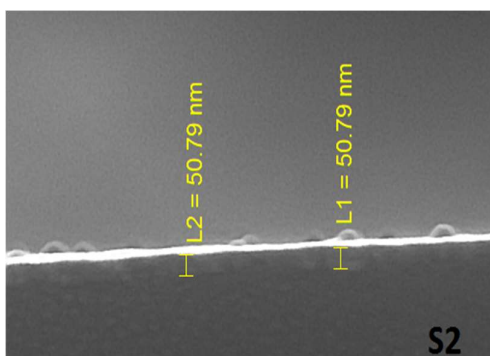
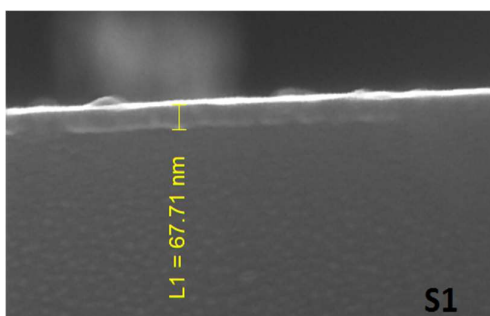
شکل ۹. طیف جذب نمونه‌های انباشتی بر روی شیشه قبل و بعد از باز پخت حرارتی. G1: بدون بازپخت، G2: ۴۷۳ K، G3: ۸۷۳ K و G4: ۶۷۳ K

برای بررسی ویژگی‌های نوری لایه‌های تهیه شده از طیف سنجی نوری در ناحیه طول‌موجی ۱۱۰۰-۲۰۰ نانومتری استفاده شده است. شکل‌های (۸ و ۹) طیف عبوری و جذب لایه‌های انباشتی بر روی زیرلایه شیشه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای اتاق میزان عبور نور کم می‌باشد که می‌تواند به‌خاطر وجود نقص‌ها در لایه باشد. همچنین با افزایش دمای بازپخت میزان طیف عبوری از لایه‌ها افزایش و میزان جذب کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل اکسید شدن بیشتر لایه‌ها در اثر بازپخت و نیز افزایش دمای بازپخت باشد.

با بازپخت حرارتی اتم‌های Cu در ساختار NiO جایگزین می‌شود که این امر می‌تواند سبب کاهش جذب تابش فرودی به لایه‌ها شود. همچنین افزایش دمای بازپخت سبب جابه‌جایی لبه جذب به ناحیه مرئی شده است.

چنگ یانگ و همکاران [۱۴] لایه‌های اکسید نیکل آلائیده با لیتیوم را تهیه و نمونه‌ها را در دمای ۴۷۳-۸۷۳ درجه کلوین بازپخت نموده و مشاهده کردند که با افزایش دمای بازپخت میزان عبور نور از لایه‌ها بیشتر شده است.

ضخامت لایه‌ها که در شکل ۱۰ آورده شده است با افزایش دمای بازپخت تا ۶۷۳K مقدار ضخامت کاهش یافته اما پس از بازپخت در دمای ۸۷۳K مقدار ضخامت لایه افزایش یافته است. تغییرات زبری سطح لایه‌ها هم می‌تواند در اثر همین تغییرات ضخامت باشند.



یکی از پارامترهای مهم در بررسی خواص نوری نمونه‌ها، گاف نواری نوری ( $E_g$ ) می‌باشد. که برای محاسبه آن، ابتدا ضریب جذب ( $\alpha$ ) را از رابطه ۱ به دست می‌آوریم:

$$\alpha = (1/d) \cdot \ln(1/T) \quad 1$$

در این رابطه،  $\alpha$  ضریب جذب،  $d$  ضخامت لایه و  $T$  درصد عبور نور از لایه می‌باشد. در این تحقیق، ضخامت لایه‌ها با استفاده از آنالیز مقطعی FESEM که نتایج آن در شکل ۱۰ آورده شده محاسبه شده است. گاف نواری نوری ( $E_g$ ) نمونه‌ها با استفاده از رابطه توک [۲۶] طبق رابطه ۲، محاسبه می‌شود.

$$(\alpha h\nu) = A (E_g - h\nu)^{1/n} \quad 2$$

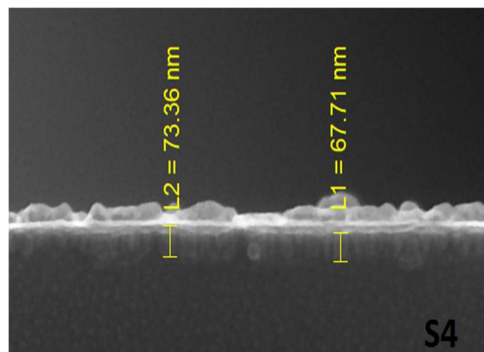
در رابطه ۲،  $\alpha$  ضریب جذب،  $h\nu$  انرژی فوتون فرودی،  $E_g$  گاف نواری نوری،  $A$  مقدار ثابت عددی است که به جرم ماده بستگی دارد.  $n$  برای گاف غیرمستقیم و مجاز مساوی ۲ و برای گاف مستقیم و مجاز برابر ۰/۵ می‌باشد. اگر بعد از رسم نمودار، قسمت خطی نمودار در نزدیکی لبه جذب را امتداد دهیم، محل برخورد این خط با محور انرژی، مقدار گاف انرژی نوری را به ما خواهد داد.

شکل ۱۰، نمودار تغییرات  $(\alpha h\nu)^2$  برحسب انرژی فوتون را برای نمونه‌های تهیه شده نشان می‌دهد. با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که گاف نواری نمونه‌ها به ترتیب: ۳/۱۴، ۳/۲۵، ۳/۵۰، ۳/۳۹ و الکترون ولت است که در توافق خوبی با مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین [۱۹، ۲۶، ۲۷] می‌باشند. همچنین با افزایش دمای بازپخت تا ۶۷۳K مقدار گاف نواری افزایش یافته اما پس از بازپخت در دمای ۸۷۳K مقدار گاف نواری کاهش یافته است که این تغییرات می‌تواند ناشی از تغییرات ضخامت لایه‌ها باشد. با توجه به نتایج

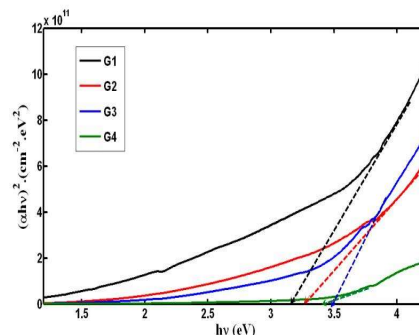
نشان می‌دهد که در لایه‌ها ترک مشهودی مشاهده نشده است و با افزایش دمای بازپخت دانه‌ها به صورت کلوخه‌ای بر روی لایه رشد نموده‌اند. آنالیز AFM نشان می‌دهد که قبل از بازپخت حرارتی رشد لایه به صورت کپه‌ای بوده، اما بازپخت حرارتی لایه‌ها در دماهای مختلف ۴۷۳ K، ۶۷۳ K و ۸۷۳ K سبب تغییر ریخت شناسی سطح لایه‌ها شده است. همچنین زبری میانگین لایه‌ها بین ۰/۱۹ nm تا ۰/۵۰ nm تغییر نموده است. طیف عبوری از لایه‌ها بیانگر آن است که بازپخت حرارتی و همچنین افزایش دمای بازپخت منجر به افزایش میزان طیف عبوری و کاهش میزان جذب نور در لایه‌ها شده است. که این می‌تواند به دلیل جایگزینی اتم‌های Cu در ساختار NiO باشد. همچنین گاف نواری نوری محاسبه شده از قانون توک بیانگر آن است که افزودن ناخالصی و دمای بازپخت گاف نواری نوری نمونه‌ها را تحت تأثیر خود قرار داده است.

### مرجع‌ها

- [1] A. Razeghizadeh, *Thin Layer Physics*, Payam Noor University, (2018) 50-65.
- [2] M. Abila Marselin, N. Victor Jaya, Structural, optical and high pressure electrical resistivity studies of pure NiO and Cu-doped NiO nanoparticles, *International Journal of Modern Physics B* **30** (2016) 1650-1656. <https://doi.org/10.1142/S0217979216500569>
- [3] Y. Wang, J. Zhu, X. Yang, L. Lu, X. Wang, Preparation of NiO nanoparticles and their catalytic activity in the thermal decomposition of ammonium perchlorate, *Thermochemical Acta* **437** (2005) 106-109. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.06.027>
- [4] M. Arif, A. Sanger, M. Shkir, A.R.S. Singh, Katiyar, Influence of interparticle



شکل ۱۰. تصویرهای مقطعی FE-SEM لایه‌های Cu/NiO. قبل و بعد از بازپخت حرارتی S1: بدون بازپخت، S2: ۴۷۳ K، S3: ۶۷۳ K و S4: ۸۷۳ K



شکل ۱۱. نمودار  $(\alpha hv)^2$  برحسب  $hv$  برای لایه‌های Cu/NiO قبل و بعد از بازپخت حرارتی. G1: بدون بازپخت، G2: ۴۷۳ K، G3: ۶۷۳ K و G4: ۸۷۳ K.

### نتیجه‌گیری

لایه‌های نازک Cu/NiO بر روی زیر لایه‌های شیشه و سیلیسیوم با روش کندوپاش مگنترونی واکنشی انباشت شده و سپس تأثیر دمای بازپخت بر روی ویژگی‌های ساختاری، ریخت شناسی و نوری نمونه‌ها بررسی شده است. ساختار تمامی لایه‌های تهیه شده به صورت بی‌شکل می‌باشند و دمای بازپخت روی ساختار بلوری لایه تأثیر نداشته است. آنالیز FTIR تشکیل لایه NiO را تأیید می‌کند. آنالیز EDS map وجود عناصر سیلیسیوم Si، اکسیژن O، نیکل Ni و مس Cu را در لایه تأیید می‌نماید. تصویرهای FESEM

- deposited by e-beam evaporation at room temperature, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **120** (2014) 109-115. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.024>
- [11] F. Hajakbari, Effect of annealing temperature on nano structural, morphological and optical properties of nickel oxide films prepared by thermal oxidation of nickel films deposited by electron beam evaporation, *Journal of Research on Manybody Systems* **9** (2019) 69 - 82. <https://dx.doi.org/10.22055/jrmbms.2019.14921>
- [12] I. Sta, M. Jlassi, M. Hajji, H. Ezzaouia, Structural, optical and electrical properties of undoped and Li-doped NiO thin films prepared by sol-gel spin coating method, *Thin Solid Films* **555** (2014) 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.10.137>
- [13] T.M. Roffo, S. Nozaki, K. Uchida, Growth mechanism of single-crystalline NiO thin films grown by metal organic chemical vapor deposition, *Journal of Crystal Growth* **451** (2016) 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.06.047>
- [14] Ch. Ching Wu, Ch-F. Yang, Fabricate Heterojunction Diode by using the modified spray pyrolysis method to deposit Nickel - Lithium Oxide on Indium Tin Oxide substrate, *ACS Applied Materials & Interfaces* **5** (2013) 4996-5001. <https://doi.org/10.1021/am400763m>
- [15] H. Ghorbani, M. Eshraghi, Investigation of chromium doping effect on the structural and magnetic properties of  $\text{MnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  ferrite nanoparticles, *Journal of Research on Manybody Systems* **6** (2017) 1-9.
- interaction on the structural, optical and magnetic properties of NiO nanoparticles, *Physica B* **552** (2018) 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.09.023>
- [5] H. Ehssan Salah, S. Asrar Abdulmunem, K. Abdulhussain, Doping and thickness variation influence on the structural and sensing properties of NiO film prepared by RF magnetron sputtering, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **27** (2016) 1270-1277. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3885-3>
- [6] Y.A.K. Reddy, A.S. Reddy, P.S. Reddy, Substrate temperature dependent properties of Cu doped NiO films deposited by DC reactive magnetron sputtering, *Journal of Materials Science & Technology* **29** (2013) 647-651. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.03.005>
- [7] Y. Zhang, Thermal oxidation fabrication of NiO film for optoelectronic devices, *Applied Surface Science* **344** (2015) 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.099>
- [8] I. Fasaki, A. Giannoudakos, M. Stamataki, M. Kompitsas, E. Gyorgy, I.N. Mihailescu, F. Robani-Kalantzopoulou, A. Lagoyannis, S. Harissoplos, Nickel oxide thin films synthesized by reactive pulsed laser deposition: characterization and application to hydrogen sensing, *Applied Physics A* **91** (2008) 487-492. <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-008-4435-0>
- [9] D.Y. Jiang, J.M. Qin, X. Wang, S. Gao, Q.C. Liang, J.X. Zhao, Optical properties of NiO thin films fabricated by, electron beam evaporation, *Vacuum* **86** (2012) 1083-1089. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.10.003>
- [10] S. Pereira, A. Goncalves, N. Correia, J. Pinto, L. Pereira, R. Martins, E. Fortunato, Electrochromic behavior of NiO thin films

- Mg) on ferromagnetic half-metallic properties of NiO, *Physica B* **19** (2019) 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.01.023>
- [22] S. Kerli, U. Alver, H. Yaykash, Investigation of the properties of In doped NiO films, *Applied Surface Science* **318** (2014) 164-167. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.141>
- [23] S. Layek, H.C. Verma, Room temperature ferromagnetism in Mn-doped NiO nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **397** (2016) 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.08.082>
- [24] S. Kazuya, K. Sangcheol, K. Shuji, Z. Xinwei, Characteristics of Cu-doped amorphous NiO thin films formed by RF magnetron sputtering, *Japanese Journal of Applied Physics* **55** (2016) 5-10. <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.06GJ10>
- [25] S.J. Mezher, M.O. Dawood, M.O. Abdulmunem, M.K. Mejbel, Copper doped nickel oxide gas sensor, *Vacuum* **172** (2020) 109074-109093. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109074>
- [26] K. Varun kumar, R. Hussani, G. Hegde, A.S. Ethiraj, Effect of calcination temperature on Cu doped NiO nanoparticles prepared via wet-chemical method: Structural, optical and morphological studies, *Journal Materials Science in Semiconductor Processing* **66** (2017) 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.04.009>
- [27] F. Hajakbari, S. Rashvand, A. Hojabri, Effect of plasma oxidation parameters on physical properties of nanocrystalline nickel oxide thin films grown by two-step method: DC sputtering and plasma oxidation, *Journal of Theoretical and Applied* <https://dx.doi.org/10.22055/jrmbms.2016.12437>
- [16] S. Sadat Parhizgar, F. morovati, Investigation of the layer deposition time effects on physical properties of thin layers N: ZnO, *Journal of Research on Manybody Systems* **9**(2019)33-39. <https://dx.doi.org/10.22055/jrmbms.2019.14585>
- [17] Rufus O. Ijeh, Assumpta C. Nwanya, Agnes C. Nkele, Itani G. Madib, Z. Khumalo, A.K.H. Bashir, R.U. Osuji, M. Maaza, Fabian I. Ezema, Magnetic and optical properties of electrodeposited nanospherical copper doped nickel oxide thin films, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **113** (2019) 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.05.013>
- [18] R. Sharma, A.D. Acharya, S.B. Shirvastava, M.M. Patidar, M. Gangrade, T. Shripathi, V. Ganesan, Studies on the structure optical and electrical properties of Zn-doped NiO thin films grown by spray pyrolysis, *Optik* **127** (2016) 4661-4668. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.01.050>
- [19] A. Mohammed. Hameed, Omar A. Ali, Sarmed S.M. Al-Awadi, Optical properties of Ag-doped nickel oxide thin films prepared by Pulsed-Laser deposition technique, *Optik* **206** (2020) 164352. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164352>
- [20] Y. Denny, K. Lee, C. Park, S.K Oh, H.J. Kang, D-S. Yang, S. Seo, Electronic, electrical and optical properties of undoped and Na-doped NiO thin films, *Thin Solid Films* **591** (2015)255-260. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.04.043>
- [21] N. Zhou, Y. Cheng, B. Huang, X. Liao, Effect of nonmagnetic dopants (Ag, Cu or

*Physics* **13** (2019) 365–373.

<https://dx.doi.org/10.1007/s40094-019-00350-8>