

تأثیر زیرلایه در بهبود خواص ترشوندگی نانوساختارهای ستونی مایل اکسید نیکل با اصلاح مورفولوژی سطح

محمد هادی کریمی تفتی

گروه مهندسی برق، واحد مهریز، دانشگاه آزاد اسلامی، مهریز، ایران

مهسا فخارپور

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

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۳ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴)

چکیده

در این تحقیق نانوساختارهای ستونی مایل اکسید نیکل به روش تبخیر فیزیکی با زاویه مایل روی زیرلایه‌های شیشه و استیل لایه‌نشانی شد. ساختار، مورفولوژی سطح و خواص ترشوندگی تحت تأثیر زیرلایه قرار می‌گیرند. مطالعات XRD نشان داد که نانوساختار لایه‌نشانی شده روی استیل در مقایسه با نانوساختار لایه‌نشانی شده روی شیشه جهت‌گیری بهتری دارد. بررسی‌های AFM و FESEM نشان داد که زبری سطح و اندازه دانه‌ها به نوع زیرلایه بستگی دارد. زبری سطح نانوساختار لایه‌نشانی شده روی استیل در مقایسه با نانوساختار لایه‌نشانی شده روی شیشه بیشتر است و دانه‌های بزرگ با رشد دانه‌های کوچک و پیوستن آنها به یکدیگر به وجود آمده است. اندازه دانه‌های سطح نانوساختار لایه‌نشانی شده روی استیل بزرگتر از شیشه است. اندازه‌گیری‌های زاویه تماس نشان داد که نانو ساختار لایه‌نشانی شده روی شیشه آبدوست و روی استیل آبگریز به ترتیب دارای زوایای تماس 78° و 120° می‌باشند. مورفولوژی سطح نانوساختار ستونی مایل اکسید نیکل لایه‌نشانی شده روی استیل باعث شد تا زاویه تماس قطره آب با سطح به شدت افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: اکسید نیکل، نانوساختار، ترشوندگی، زیرلایه

Effect of substrate on improving the wettability properties of nickel oxide oblique columnar nanostructures by modifying the surface morphology

Mohammad Hadi Karimi Tafti

Department of Electrical Engineering, Mehriz Branch, Islamic Azad University, Mehriz, Iran

Mahsa Fakharpour

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

(Received 21 May 2022, accepted 16 October 2022)

Abstract

In this study, nickel oxide oblique columnar nanostructures were deposited on glass and steel substrates by physical evaporation deposition with oblique angle. The surface morphology, structural and wettability properties are affected by the substrate. XRD studies showed that the nanostructure deposited on steel has a better orientation than the nanostructure deposited on glass. AFM and FESEM studies showed that surface roughness and grain size depend on the type of substrate. The surface roughness of the nanostructure deposited on steel is higher compared to the nanostructure deposited on glass, and big grains are formed by the growth of small grains and merging them together. The grains size of the nanostructure deposited on steel are higher than the nanostructure deposited on glass. Contact angle measurements showed that the nanostructures deposited on glass and steel are hydrophilic and hydrophobic in nature with contact angles of 78° and 120° , respectively. The morphology of the nickel oxide oblique columnar nanostructure surface deposited on steel causes to increase the contact angle of the water drop with the surface.

Keywords: Nickel oxide, Nanostructure, Wettability, Substrate.

Email of Corresponding author: dr.karimitafti@gmail.com.

مقدمه

افزایش یافت و رفتار فوق آبریز حاصل شد. دالووی^۲ و همکارانش [۱۶] لایه‌های نازک اکسید نیکل به روش الکتروشیمیایی با انواع اصلاح‌ساز سطح تهیه کردند که تمام نمونه‌ها رفتار آبریزی را نشان دادند. فو^۳ و همکارانش [۱۷] خاصیت ترشوندگی لایه‌های نازک اکسید نیکل به روش هیدروترمال با معرفی الگوهای سطحی با شکاف‌های ریز و پوشش‌های سلسه مراتبی بررسی کردند. سپس زوایای تماس این فیلم‌ها با زوایای تماس فیلم با پوشش‌های صاف و یکنواخت مقایسه کردند. در پژوهش‌های قبلی نانو ساختارهای مختلفی تهیه و خواص ترشوندگی آنها بررسی شد [۱۸، ۱۹].

تاکنون، گزارش‌های بسیار کمی در مورد نانو ساختارهای سه بعدی NiO و مطالعه خواص ترشوندگی آنها در دسترس است. در این تحقیق، نانو ساختار ستونی مایل NiO با تبخیر حرارتی و لایه‌نشانی مایل^۴ (OAD) بر روی زیرلایه شیشه و استیل تهیه شد. در این لایه‌نشانی، اتم‌های بخار فرودی به صورت مایل به زیرلایه برخورد می‌کنند. مکانیسم اصلی این لایه‌نشانی بر اساس خود سایه افکنی و رشد رقابتی است. ابتدا هسته‌ها بر روی زیرلایه تشکیل می‌شوند، سپس با رشد هسته‌ها، اثر خود سایه افکنی افزایش می‌یابد و در نتیجه ساختارهایی با مورفولوژی‌های مختلف مانند ستونی، کایرال، زیگزاگ به وجود می‌آید. یکی از ویژگی‌های این نانو ساختارها، تخلخل آنهاست که می‌تواند خواص ترشوندگی متفاوتی را ارائه دهد.

مواد و روش تحقیق

روش آزمایش

نانو ساختار ستونی مایل اکسید نیکل بر روی زیرلایه شیشه و استیل ضد زنگ با استفاده از تبخیر حرارتی از پودر NiO با خلوص ۹۹.۹۹ درصد در دمای اتاق تهیه

سطح فلزات و اکسیدهای فلزی به دلیل انرژی آزاد سطحی بالا؛ تمایل زیادی به آلودگی دارند که می‌تواند ترشوندگی آنها را به میزان قابل توجهی تغییر دهد [۳-۱]. در میان فلزات، نیکل (Ni) دوام نسبتاً بالا، پایداری شیمیایی، مقاومت در برابر خوردگی و استحکام بالا را نشان می‌دهد [۴، ۵]. علاوه بر این، وقتی اکسید نیکل (NiO) تحت پرتو ماوراء بنفش [۶] قرار می‌گیرد خواص الکترونیکی آن می‌تواند تغییر کند. همچنین در هنگام گرم شدن با هیدروژن/کربن یا فرآیند بازپخت، احتمال تبدیل شدن به نیکل فلزی کاهش می‌یابد [۷]. علاوه بر این، رفتار آبدوست NiO اجازه می‌دهد تا در بسیاری از کاربردها مانند ابرخازن‌های الکتروشیمیایی استفاده شود [۸-۱۲]. با این حال تحت شرایط خاصی، NiO تأثیرات متنوع و متناقضی بر ترشوندگی سطح نشان می‌دهد. جنگ^۱ و همکارانش در مطالعه‌شان [۱۳]، لایه‌های آرایه مخروطی میکرو-نانو نیکل بر روی زیرلایه مس لایه‌نشانی کردند، که زاویه تماس حدود ۵۰° اندازه‌گیری شد. پس از قرار گرفتن نمونه‌ها در معرض هوا به مدت ۱۵ روز، ترشوندگی سطح به طور قابل توجهی کاهش یافت و خواص فوق آبریزی با زاویه تماس ۱۵۳/۶° به دست آمد. با وجودی که مورفولوژی سطح در طول این تغییر یکسان باقی ماند. تغییرات شیمیایی سطح، به دلیل تشکیل NiO آبریز، باعث تغییر ترشوندگی شد. نتایج بسیار مشابهی در مطالعه‌ای توسط خرسند و همکارانش با توجه به زبری حاصل شد [۱۴]. از طرف دیگر، عمدتاً تغییر رفتار ترشوندگی سطوح فلزی را می‌توان با تغییر مورفولوژی سطح به جای تغییر ترکیب شیمیایی به دست آورد. بهرامیان و همکارانش [۱۵] لایه‌های نازک اکسید نیکل با تغییر مورفولوژی سطح و ایجاد ساختارهای سلسه مراتبی با زبری بالا تهیه کردند که زاویه تماس به شدت

² Dalavi

³ Fu

⁴ Oblique Angle Deposition

¹ Geng

شد. زیرلایه‌ها به ابعاد $2 \times 2 \text{ cm}^2$ برش داده و قبل از لایه-نشانی به روش اولتراسونیک در استون، اتانول و آب دی-یونیزه تمیز شدند. پودر NiO در یک بوته تنگستن (w) به عنوان منبع تبخیر در داخل محفظه خلاء قرار داده شد. فرآیند لایه‌نشانی تحت فشار $2 \times 10^{-2} \text{ torr}$ انجام شد. لایه‌های نازک NiO با ستون‌های کج شده با آهنگ لایه‌نشانی 0.3 nm/s به ضخامت $320\text{--}360 \text{ nm}$ لایه‌نشانی شدند. نانوساختارهای ستونی مایل با ثابت نگه داشتن نگهدارنده زیرلایه‌ها تحت زاویه 35° نسبت به خط عمود بر سطح ساخته شدند.

شناسایی فاز و خواص ساختاری نانوساختارهای ستونی مایل با الگوی پراش اشعه ایکس (Philips PW1730، ژاپن) و تابش $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$) با اندازه گام 0.05° ، $V=40 \text{ Kv}$ و $I=30 \text{ mA}$ در محدوده $2\theta=35^\circ\text{--}80^\circ$ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM، MIRA III، TESCAN) و میکروسکوپ الکترونی نیروی اتمی (AFM، BRUKER، JPK NanoWizard) (II) برای بررسی مورفولوژی سطح لایه‌ها استفاده شد. ضخامت لایه از تصویر سطح مقطع FESEM به دست آمد. زاویه تماس استاتیک قطره آب مقطر با سطح لایه نازک با استفاده از یک لنز با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و یک دوربین دیجیتال (مدل canon-25 مگاپیکسل) به دست آمد. یک قطره آب مقطر به جرم ۵ میلی گرم به آرامی بر روی سطح لایه نازک به آرامی رها شد. تصویر زاویه تماس با کد نرم افزار ImageJ تجزیه و تحلیل شد [۲۰] و خواص ترشوندگی لایه‌ها بررسی شد.

نتایج و بحث

مشخصات ساختاری

شکل ۱ الگوی XRD نانوساختارهای ستونی مایل اکسید نیکل لایه‌نشانی شده روی زیرلایه‌های شیشه و استیل را نشان می‌دهد. ماکزیمم قله ایجاد شده توسط نانوساختار

ستونی NiO روی شیشه در صفحات پراش (۱ ۱ ۱) در زاویه $37/44^\circ$ می‌باشد (شکل ۱ الف)). علاوه بر این، به وضوح می‌توان مشاهده کرد که قله‌های دیگری در $43/47^\circ$ ، $63/20^\circ$ و $79/87^\circ$ تشکیل شده است که به ترتیب نشان‌دهنده صفحات پراش (۲ ۰ ۰)، (۲ ۲ ۰)، و (۲ ۲ ۲) می‌باشند و بیان می‌کند نانوساختار ستونی مایل NiO روی شیشه به صورت تصادفی جهت‌گیری شده است، اگرچه صفحه پراش (۱ ۱ ۱) جهت ترجیحی را نشان می‌دهد. قله‌ها، ماهیت پلی کریستالی نانوساختارهای NiO را نشان می‌دهد که با کارت JCPDS 00-001-1239 شناسایی شده است. سایر قله‌ها و نوسانات ایجاد شده در الگوی پراش به آمورف بودن شیشه نسبت داده می‌شود. پاتیل^۱ و همکارانش [۲۱] نیز گزارش کردند که فیلم‌های NiO لایه‌نشانی شده با روش حمام شیمیایی روی شیشه تمایل به جهت‌گیری ترجیحی در راستای (۱ ۱ ۱) دارند. صفحات پراش به دست آمده در این تحقیق با نتایج XRD نانوساختار NiO تهیه شده با روش OAD توسط کنان^۲ و همکارانش [۲۲] مطابقت دارد.

شکل ۱ (ب) الگوی XRD لایه نازک ستونی مایل NiO روی زیرلایه استیل را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱ (ب)، ماکزیمم قله ایجاد شده توسط لایه نازک ستونی NiO لایه‌نشانی شده روی زیرلایه استیل در صفحات پراش (۱ ۰ ۱۶) در زاویه $74/47^\circ$ می‌باشد. علاوه بر قله اصلی نانوساختار NiO، دو قله دیگر در جهات (۱ ۰ ۷) و (۱ ۰ ۱۰) به ترتیب در زوایای $43/60^\circ$ و $52/29^\circ$ نیز قابل مشاهده است که با کارت JCPDS 96-901-2317 شناسایی شده است. با این حال، نوساناتی که از الگوی XRD نانوساختار ستونی مایل NiO روی زیرلایه شیشه مشاهده می‌شود، در این نمونه قابل رویت نیست و ساختار کریستالی بهتری را نشان می‌دهد. زانگ^۳ و

¹ Patil

² Kannan

³ Zhang

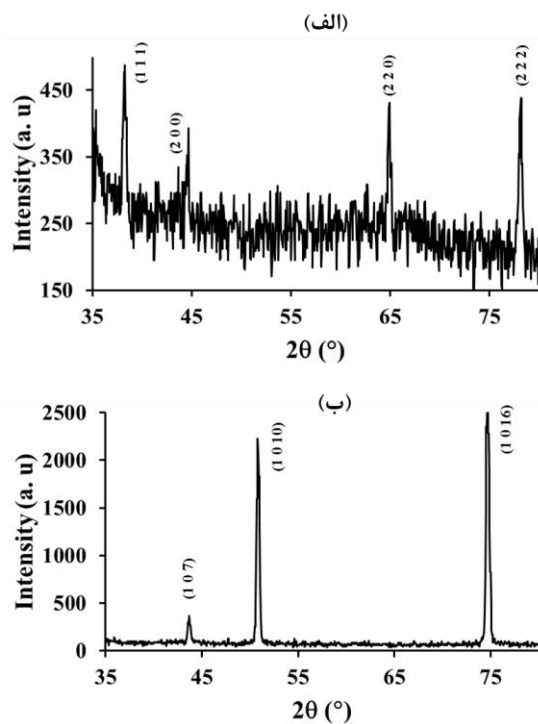
سطح صاف و در نواحی دیگر سطح متخلخل است. همانطور که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است، در بزرگنمایی زیاد سطح نانوساختار ستونی NiO دانه‌های درشت از ادغام دانه‌های کوچک تشکیل شده است که قطر ستون‌ها را مشخص می‌کند. شکل ۲ (پ) سطح مقطع نانوساختار NiO لایه نشانی شده روی شیشه با ستون‌های مایل را نشان می‌دهد که می‌توان ضخامت لایه نازک را به دست آورد. ضخامت نانوساختار ستونی مایل NiO روی شیشه ۳۶۰ nm تخمین زده شد.

شکل ۲ (ت) تصویر سطح نانوساختار ستونی مایل NiO روی زیرلایه استیل با بزرگنمایی کم نشان می‌دهد که سطح شامل دانه‌های گل مانند با توزیع یکنواخت روی سطح با ساختار متخلخل می‌باشد. تصویر با بزرگنمایی زیاد در شکل ۲ (ث) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سطح نانوساختار متخلخل و دانه‌های بزرگ از ادغام دانه‌های کوچک تشکیل شده است و به نظر می‌رسد سطح ناصاف‌تری نسبت به زیرلایه شیشه ایجاد شده است. شکل ۲ (ج) سطح مقطع نانوساختار ستونی NiO روی استیل را نشان می‌دهد. ضخامت نانوساختار ستونی مایل NiO روی استیل ۳۲۰ nm اندازه‌گیری شد. هر دو نانوساختار روی شیشه و استیل از نانوساختارهای ستونی مایل تشکیل شده است.

نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

تصاویر دو و سه بعدی AFM در مقیاس $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ از توپوگرافی سطح نانوساختار ستونی مایل NiO روی شیشه و استیل در شکل ۳ نشان داده شده است. از شکل ۳ مشخص است که مورفولوژی سطح لایه‌ها یکنواخت نیست و این عدم یکنواختی برای نانوساختار لایه‌نشانی شده روی استیل بیشتر است. رشد دانه‌های غیریکنواخت را می‌توان به اثر خود سایه‌افکنی در لایه‌نشانی مایل نسبت داد [۲۴]. همانطور که در شکل ۳ (الف) و (ب) آشکار است اندازه دانه‌ها روی دو سطح متفاوت است،

همکارانش [۲۳] نشان دادند، لایه نازک اکسید نیکل روی استیل در دماهای بالا در زاویه 43° رشد ترجیحی دارد. بنابراین، جهت‌مندی و ماهیت کریستالی نانوساختار به هسته‌های تشکیل شده روی زیرلایه، رشد دانه‌ها و در نتیجه به ماهیت ساختاری زیرلایه بستگی دارد.



شکل ۱. الگوهای پراش اشعه ایکس نانوساختار ستونی مایل NiO روی زیرلایه (الف) شیشه (ب) استیل.

بررسی نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر

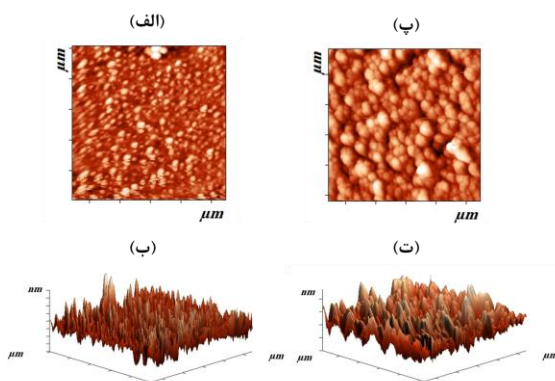
میدانی (FESEM)

شکل ۲ تصاویر FESEM از سطح و سطح مقطع نانوساختار ستونی مایل NiO لایه‌نشانی شده روی زیرلایه‌های شیشه و استیل را نشان می‌دهد. شکل ۲ (الف) تصویر سطحی از نانوساختار ستونی NiO روی زیرلایه شیشه با بزرگنمایی کم را نشان می‌دهد که سطحی ناهموار با حفره‌های بزرگ روی سطح و توزیع نامنظم دانه‌ها مشاهده می‌شود که به مورفولوژی شیشه و نوع لایه‌نشانی مربوط می‌شود. همچنین، در بعضی نواحی

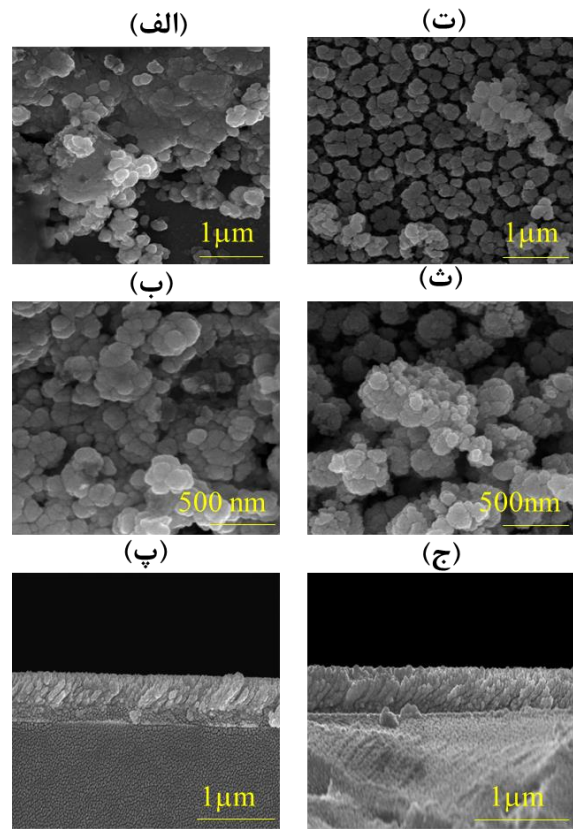
زیرلایه استیل مرتبط است که به خوبی با نتیجه FESEM مطابقت دارد. بنابراین، زبری سطح و اندازه دانه‌ها به نوع زیرلایه بستگی دارد. زبری کمتر نانوساختار ستونی مایل NiO روی شیشه به دلیل کاهش اندازه دانه‌ها روی این نانوساختار است. روفینو^۱ و همکارانش [۲۵] رابطه زبری سطح و اندازه دانه‌ها در لایه‌نشانی زاویه مایل را مطالعه کردند. بنابراین، نانوساختارهای ستونی NiO تهیه شده با دانه‌بندی بزرگتر و زبری بیشتر منجر به زاویه تماس بیشتر می‌شود. زبری بیشتر نانوساختارهای ستونی NiO بر روی استیل به دلیل اندازه بزرگتر دانه‌های روی سطح است که در مطالعات سطح FESEM و AFM مشهود است.

رفتار ترشوندگی

ترشوندگی سطوح جامد با مایعات توسط تغییرات شیمیایی (کاهش انرژی سطحی) و ساختارهای هندسی سطح کنترل می‌شود. در صورتی که زاویه تماس آب با یک سطح بیشتر از ۹۰° باشد این سطح آب‌گریز و در صورتی که زاویه تماس با آب کمتر از ۹۰° باشد سطح آب‌دوست نامیده می‌شود. نتایج زاویه تماس نانوساختار ستونی مایل NiO روی شیشه و استیل در شکل ۴ نشان داده شده است.

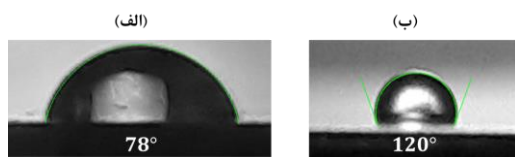


شکل ۳. تصاویر AFM دو و سه بعدی نانوساختار ستونی مایل NiO لایه‌نشانی شده روی زیرلایه‌های مختلف (الف) تصویر دو بعدی نانوساختار روی شیشه (ب) تصویر سه بعدی نانوساختار روی شیشه (پ) تصویر دو بعدی نانوساختار روی استیل (ت) تصویر سه بعدی نانوساختار روی استیل.



شکل ۴. تصاویر FESEM نانوساختار ستونی مایل NiO روی زیرلایه‌های مختلف (الف) تصویر سطح نانوساختار روی شیشه با بزرگنمایی کم (ب) تصویر سطح نانوساختار روی شیشه با بزرگنمایی زیاد (پ) تصویر سطح مقطع نانوساختار روی شیشه (ت) تصویر سطح نانوساختار روی استیل با بزرگنمایی کم (ث) تصویر سطح نانوساختار روی استیل با بزرگنمایی زیاد (ج) تصویر سطح مقطع نانوساختار روی استیل. اندازه دانه‌های ایجاد شده روی سطح نانوساختار ستونی مایل NiO روی زیرلایه شیشه و استیل به ترتیب در محدوده ۱۱۸ nm و ۳۳۳ nm می‌باشد. از تصویر سه بعدی AFM نانوساختار روی شیشه (شکل ۳ (ب)) مشاهده می‌شود که سطح ناهمواری کمتری دارد، در حالی که مورفولوژی سطح نانوساختار روی استیل (شکل ۳ (ت)) بسیار ناهموار است. زبری ریشه میانگین مربعی (rms) نواحی به طور تصادفی انتخاب شده برای نانوساختار ستونی NiO روی شیشه و استیل به ترتیب ۲۰/۶ nm و ۶۴/۵ nm به دست آمد. مقدار زبری بزرگ نانوساختار ستونی NiO روی استیل به مورفولوژی

¹ Ruffino



شکل ۴. تصاویر زاویه تماس قطره آب با نانو ساختار ستونی مایل NiO (لایه نشانی شده روی زیرلایه الف) شیشه ب) استیل.

نتیجه گیری

نانو ساختارهای ستونی مایل اکسید نیکل با روش تبخیر فیزیکی و شار فرودی مایل روی زیرلایه های شیشه و استیل تهیه شد. نتایج مورفولوژی سطح نشان داد، سطح نانو ساختار لایه نشانی شده روی هر دو زیرلایه متخلخل است. اما اندازه دانه ها و زبری سطح نانو ساختار لایه نشانی روی زیرلایه استیل بیشتر از زیرلایه شیشه است. رفتار ترشوندگی پوشش ها با اندازه گیری زاویه تماس قطره آب با سطح تماس نانو ساختارها به دست آمد. نانو ساختار ستونی مایل لایه نشانی شده روی شیشه ماهیت آبدوستی و نانو ساختار لایه نشانی شده روی استیل ماهیت آبگریزی دارد و میانگین زوایای تماس لایه نازک با قطره آب به ترتیب $78^\circ \pm 3^\circ$ و $120^\circ \pm 3^\circ$ اندازه گیری شد. بنابراین، با استفاده از لایه نشانی زاویه مایل و ایجاد ساختار متخلخل و اصلاح مورفولوژی ساختار NiO روی زیرلایه های مختلف می توان زوایای تماس را کنترل کرد.

مراجع

1. W. Birch, A. Carre, K. L. Mittal, *Wettability techniques to monitor the cleanliness of surfaces*, in: *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Fundamentals and Applied Aspects*, (2008) 693–723.
2. T. Yasukatsu, M. Toshiaki, S. Kazutomi, *The effect of water vapor on contamination of metallic oxide surfaces*, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 50 (1977) 1881–1882.
3. T. Matsunaga, in: K. L. Mittal (Ed.), *Surface Contamination: Genesis, Detection, and Control*, Springer, US, Boston, (1979) 47–56.
4. Y. Zhao, T. Topping, J. F. Bingert, J. J. Thornton, A. M. Dangelewicz, Y. Li, W. Liu, Y. Zhu, Y. Zhou, E. J. Lavernia, *High tensile*

زوایای تماس با استفاده از نرم افزار ImageJ به دست آمده است. اندازه گیری های زاویه تماس (شکل ۴ الف) و (ب)) نشان می دهد که نانو ساختار ستونی مایل لایه نشانی شده روی شیشه ماهیت آبدوستی و نانو ساختار لایه نشانی شده روی استیل ماهیت آبگریزی دارد و میانگین زوایای تماس لایه نازک با قطره آب به ترتیب $78^\circ \pm 3^\circ$ و $120^\circ \pm 3^\circ$ به دست آمده است. افزایش زاویه تماس نانو ساختار ستونی NiO روی زیرلایه استیل نسبت به زیرلایه شیشه را می توان به افزایش زبری سطح نانو ساختار روی استیل نسبت داد. ترشوندگی سطوح توسط وزنل^۱ [۲۶] با در نظر گرفتن اختلاف انرژی های ترمودینامیکی (مربوط به کشش سطحی) مرزهای مختلف مانند فیلم هوا، فیلم مایع و مایع-هوا که بیشتر تحت تأثیر ناحیه موثر زاویه تماس بین مرزهای مختلف قرار می گیرند، توضیح داده می شود. در زبری سطح، فاکتور مساحت در نظر گرفته می شود و از این رو نقش مهمی در تعیین خواص ترشوندگی سطوح دارد [۲۶]. لایه نشانی زاویه مایل موجب تشکیل لایه نازک متخلخل و افزایش زبری سطح می شود [۲۸، ۲۷]. زبری سطح بسته به ماهیت مرزها و نوع تله های هوایی تشکیل شده در طول خیس شدن سطح می تواند آبگریزی سطح را افزایش یا کاهش دهد [۲۴]. در این تحقیق، افزایش زاویه تماس با افزایش زبری سطح با مدل وزنل مطابقت می کند [۲۶]. همانطور که از تصاویر FESEM و AFM مشاهده می شود، به دلیل گیر افتادن هوا در ساختار متخلخل نانو ساختار ستونی NiO، مرز هوا-مایع تشکیل می شود که مانع نفوذ مایع به ساختار فیلم می شود. دلایلی و همکاری آنها [۱۶] زاویه تماس لایه نازک NiO حدود $64/28^\circ$ به دست آوردند. در این تحقیق، با لایه نشانی زاویه مایل و ایجاد ساختار متخلخل و تغییر مورفولوژی ساختار NiO روی زیرلایه های مختلف، زوایای تماس افزایش یافته است.

¹ Wenzel

- electrodeposition process*, Applied Surface Science, 305 (2014) 498–505.
15. A. Bahramian, M. Eyraud, F. Vacandio, V. Hornebecq, T. Djenizian, P. Knauth, *Single-step electrodeposition of superhydrophobic black NiO thin films*, Journal of Applied Electrochemistry, 49 (2019) 621–629.
16. D. S. Dalavi, M. J. Suryavanshi, S. S. Mali, D. S. Patil, P. S. Patil, *Efficient maximization of coloration by modification in morphology of electrodeposited NiO thin films prepared with different surfactants*, Journal of Solid State Electrochemistry, 16 (2012) 253–263.
17. Y. Fu, F. Zhao, Z. Zhao, H. Tang, S. To, C. H. Cheng, *Water droplet bouncing on a hierarchical superhydrophobic surface fabricated by hydrothermal synthesis and ultraprecision machining*, Journal of Adhesion Science and Technology, (2022) 1–15.
18. M. Fakharpour, G. Taheri, *Fabrication of Al zigzag thin films and evaluation of mechanical and hydrophobic properties*, Applied Physics A, 126 (2020) 1–8.
۱۹. فخارپور مهسا، میرجلیلی فاطمه و گلشن وحید، خواص ضدباکتریایی و آبدوستی پوششهای TiO_2 و TiO_2-Ag روی سطح کاشی: تأثیر نسبت‌های مختلف، نشریه علوم و مهندسی سطح، ۴۸ (۱۴۰۰) ۱–۱۰.
20. A. F. Stalder, G. Kulik, D. Sage, L. Barbieri, P. Hoffmann, *A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles*, Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 286 (2006) 92–103.
21. U. M. Patil, R. R. Salunkhe, K. V. Gurav, C. D. Lokhande, *Chemically deposited nanocrystalline NiO thin films for supercapacitor application*, Applied Surface Science, 255 (2008) 2603–2607.
22. V. Kannan, A. I. Inamdar, S. M. Pawar, H. S. Kim, H. C. Park, H. Kim, Y. S. Chae, *Facile route to NiO nanostructured electrode grown by oblique angle deposition technique for supercapacitors*, ACS applied materials & interfaces, 8 (2016) 17220–17225.
23. K. Zhang, C. Rossi, P. Alphonse, C. Tenaillon, *Synthesis of NiO nanowalls by thermal treatment of Ni film deposited onto a stainless steel substrate*, Nanotechnology, 19 (2008) 155605.
24. R. K. Jain, Y. K. Gautam, V. Dave, A. K. Chawla, R. Chandra, *A study on structural, ductility and strength in bulk nanostructured nickel*, Advanced Materials, 20 (2008) 3028–3033.
5. S. B. Ding, T. F. Xiang, C. Li, S. L. Zheng, J. Wang, M. X. Zhang, C. Dong, W. Chan, *Fabrication of self-cleaning superhydrophobic nickel/graphene hybrid film with improved corrosion resistance on mild steel*, Materials & Design, 117 (2017) 280–288.
6. R. Islam, G. Chen, P. Ramesh, J. Suh, N. Fuchigami, D. Lee, K. A. Littau, K. Weiner, R. Collins, K. C. Saraswat, *Investigation of the changes in electronic properties of nickel oxide (NiOx) due to UV/Ozone treatment*, ACS Applied Materials & Interfaces, 9 (2017) 17202–17208.
7. J. Bachmann, A. Zolotaryov, O. Albrecht, S. Goetze, A. Berger, D. Hesse, D. Novikov, K. Nielsch, *Stoichiometry of nickel oxide films prepared by ALD*, Chemical Vapor Deposition, 17 (2011) 177–180.
8. I. A. Dhole, S. T. Navale, Y. H. Navale, Y. M. Jadhav, C. S. Pawar, S. S. Suryavanshi, V. B. Patil, *Performance evaluation of galvanostatically deposited nickel oxide electrode for electrochemical supercapacitors*, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28 (2017) 10819–10829.
9. Y. Z. Zheng, H. Y. Ding, M. L. Zhang, *Preparation and electrochemical properties of nickel oxide as a supercapacitor electrode material*, Materials Research Bulletin, 44 (2009) 403–407.
10. W. Xing, F. Li, Z. F. Yan, G. Q. Lu, *Synthesis and electrochemical properties of mesoporous nickel oxide*, Journal of power sources, 134 (2004) 324–330.
11. K. W. Nam, W. S. Yoon, K. B. Kim, *X-ray absorption spectroscopy studies of nickel oxide thin film electrodes for supercapacitors*, Electrochimica Acta, 47 (2002) 3201–3209.
12. K. C. Liu, M. A. Anderson, *Porous nickel oxide/nickel films for electrochemical capacitors*, Journal of the Electrochemical Society, 143 (1996) 124–130.
13. W. Geng, A. Hu, M. Li, *Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of a surface with Ni micro-nano cones array*, Applied Surface Science, 263 (2012) 821–824.
14. S. Khorsand, K. Raeissi, F. Ashrafzadeh, *Corrosion resistance and long-term durability of superhydrophobic nickel film prepared by*

optical and hydrophobic properties of oblique angle sputter deposited HfO₂ films, Applied Surface Science, 283 (2013) 332–338.

25. F. Ruffino, M. G. Grimaldi, *Control of kinetic roughening in nanostructured Ag films by oblique sputter-depositions*, Nanoscience and Nanotechnology Letters, 4 (2012) 309–315.

26. R. N. Wenzel, *Resistance of solid surfaces to wetting by water*, Industrial & Engineering Chemistry, 28 (1936) 988–994.

27. S. Zenkin, A. Belosludtsev, Š. Kos, R. Čerstvý, S. Haviar, M. Netrvalová, *Thickness dependent wetting properties and surface free energy of HfO₂ thin films*, Applied Physics Letters, 108 (2016) 231602-1–231602-5.

28. S. R. Jian, P. H. Le, C. W. Luo, J. Y. Juang, *Nanomechanical and wettability properties of Bi₂Te₃ thin films: effects of post-annealing*, Journal of Applied Physics, 121 (2017) 175302-1–175302-5.