



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

<https://jmme.um.ac.ir>



Iron&Steel
Society of Iran

Investigation of the Effect of Annealing Temperature on the Optical Properties and Microstructure of Nickel-Zinc Ferrite Thin Films Grown by Magnetron Sputtering*

Research Article

Mohsen Abdollahi¹, Mohammad Hossein Shams² , Mohammad Hossein Hosseini³

 10.22067/jmme.2026.97057.1230

Abstract: Nickel-zinc ferrite (NZF) thin films grown on single-crystal silicon and glass substrates were produced using RF magnetron sputtering. XRD, FE-SEM, AFM, UV-vis, and VSM tests were performed to determine the phase composition and surface topography, along with the optical and magnetic properties of the NZF ferrite thin films. All samples had a spinel structure. Optical investigations using UV-visible spectroscopy showed that light transmittance in the visible range increased with increasing annealing temperature. Also, FE-SEM images showed an increasing trend in grain size (from 32 to 42 nm) with increasing annealing temperature and a decrease in surface roughness, both of which can affect the optical properties of the films. These structural changes were consistent with the optical behavior of the films and were effective in reducing light scattering and improving transparency. Magnetic evaluation of the NZF/Si thin films showed an increase in M_s values from 42 to 59 emu/g with increasing annealing temperature, from 700 to 900 °C. These results indicate that by optimizing the annealing temperature, NZF films not only improve their soft magnetic properties but also develop suitable optical characteristics, facilitating their application in magneto-optical devices and high-frequency technologies.

Keywords: Nickel-zinc ferrite, Magnetron sputtering, Microstructure, Optical properties, Thin film

1- Introduction

Nickel-zinc ferrite (NZF) has long attracted significant research interest as a soft magnetic material characterized by high electrical resistivity, suitable saturation magnetization, low coercivity, and excellent chemical stability. Particularly in thin film form, NZF enables the integration of magnetic and optical functionalities into microelectronic chips [1]. In recent years, the growing trend toward miniaturization and integration of electronic devices has intensified efforts to develop ferrite thin films, as they not only exhibit process compatibility with the

semiconductor industry but also demonstrate promising optical properties in the ultraviolet and visible spectral ranges [2]. RF magnetron sputtering stands out as an ideal method for fabricating high-quality ferrite thin films with uniformity, density, and controlled stoichiometry, attributes essential for achieving desirable optical performance [3]. The optimal selection of post-deposition annealing temperature and atmosphere critically influences not only the crystalline phase and grain size but also directly affects key optical parameters such as direct/indirect bandgap energy, light absorption, and transmittance spectra. Despite recent advancements, a comprehensive and systematic understanding of the interrelationship among thermal processing conditions, resultant microstructural evolution (including grain size, crystallographic orientation, and defect density), and the consequent modifications in the optical response of nickel-zinc ferrite thin films remain incomplete [4]. This research gap underscores the necessity for concurrent investigations of structural, magnetic, and particularly optical properties of these films under varying annealing conditions. In the present study, in addition to extending the annealing temperature range for NZF films deposited on Si substrates, the optical properties of NZF films on glass substrates annealed at 200 and 250 °C are also investigated [5]. The findings of this work are expected to provide deeper insights into the structure property relationships in ferrite thin films and facilitate the optimized design of high-frequency and photonic devices based on these materials.

2- Materials and Methods

The sputtering target used in the magnetron sputtering process was fabricated via a standard ceramic processing route from iron, nickel, and zinc oxide precursors [6].

* Manuscript received December 23, 2025, Revised January 07, 2026, Accepted February 03, 2026.

¹ PhD Student, Faculty of Electromagnetics, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

² Corresponding Author: Associate Professor, Faculty of Electromagnetics, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Email: shams@mut-es.ac.ir

³ Assistant Professor, Faculty of Electromagnetics, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

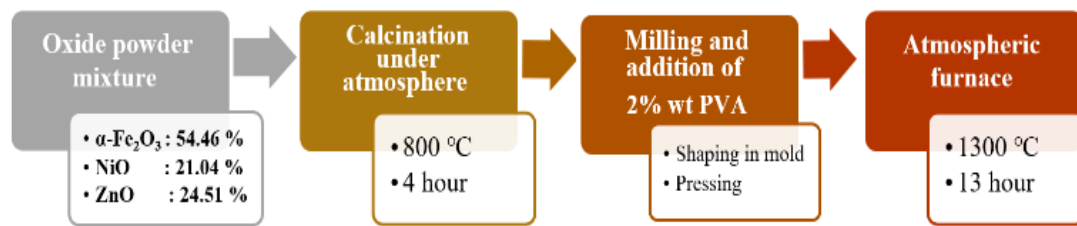


Fig 1. Sequence of fabrication steps, including raw materials, shaping, and sintering of the NZF ferrite target employed

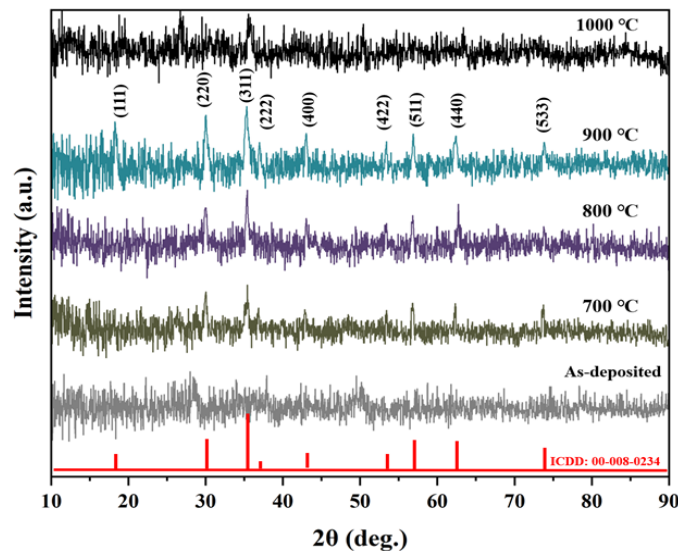


Fig 2. XRD of NZF/Si thin films after annealing at 700 to 1000 °C

The composition ratios and fabrication steps are illustrated in Fig. 1. Thin films of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ were deposited under identical deposition conditions onto two types of substrates: single-crystal silicon wafers with (111) orientation, and glass slides measuring $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$, to investigate their optical properties. Deposition was carried out using radio-frequency magnetron sputtering in a gaseous atmosphere composed of argon and oxygen.

3- Results and Discussion

Fig. 2 presents the XRD patterns of NZF thin films annealed at temperatures ranging from 700 to 1000 °C. All annealed samples exhibit a crystalline spinel structure. This structural consistency confirms the formation of a uniform crystalline phase, which is a prerequisite for predictable and reproducible optical behavior. Notably, none of the samples exhibit any preferred crystallographic orientation. This structural feature holds particular significance from an optical standpoint.

Fig. 3 shows a cross-sectional FE-SEM image of the NZF/Si thin films. The cross-sectional view reveals a film thickness of approximately 195 nm, which is further corroborated by profilometry measurements. This accuracy in thickness determination is crucial for the quantitative analysis of optical data, such as the calculation of the absorption coefficient and optical bandgap. The NZF thin films exhibit a dense, crack-free microstructure composed

of spherical grains with a relatively uniform distribution. This morphological homogeneity plays a key role in minimizing light scattering at grain boundaries, thereby enhancing spectral transparency and enabling a more predictable optical response. EDS spectra acquired from representative regions, including both central and peripheral areas of the NZF/Si thin film surface, are presented in Fig. 3.

Fig. 4, shows the plot of $(\alpha h\nu)^2$ as a function of photon energy ($h\nu$) for the sample annealed at 250 °C [7]. The observed reduction in optical bandgap with increasing annealing temperature can be attributed to grain growth and the consequent weakening of surface-related quantum confinement effects. As the annealing temperature rises, grain size increases, thereby diminishing quantum confinement effects at grain boundaries a phenomenon typically associated with a narrowing of the bandgap. Increasing the annealing temperature from 700 °C to 900 °C led to a significant enhancement in M_s and a concurrent reduction in H_c for the NZF/Si (111) thin film samples. This behavior is attributed to improved crystallinity combined with grain growth. These factors enhance the net magnetic spin moment, thereby increasing M_s .

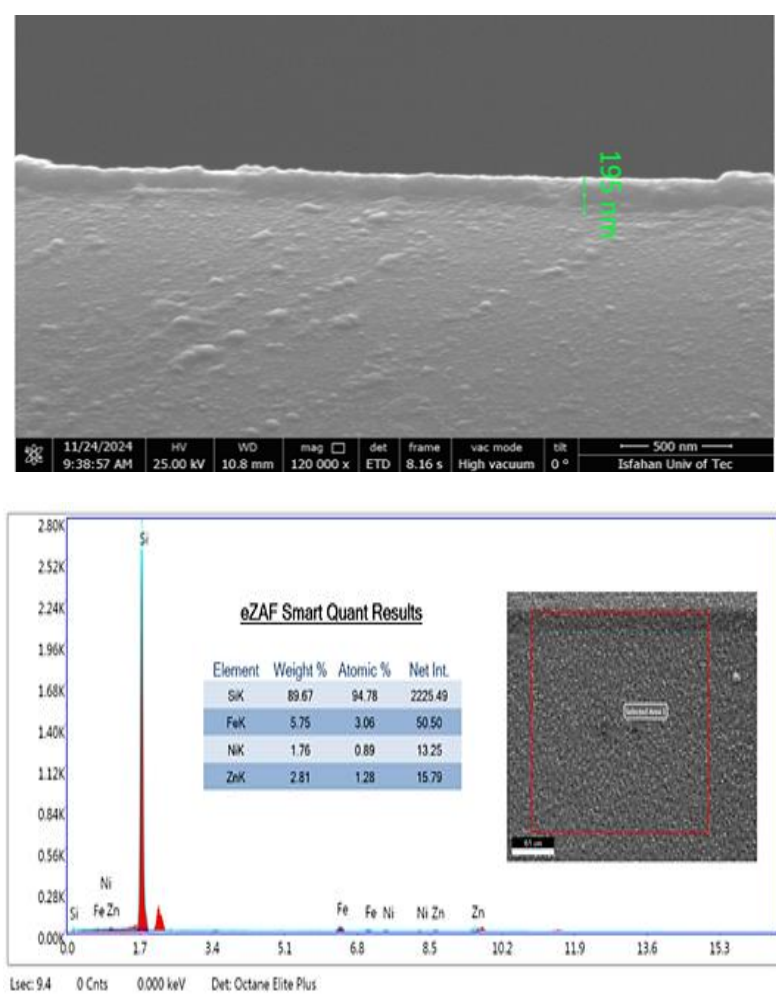


Fig 3. Cross-sectional FE-SEM image and EDS of the NZF/Si film

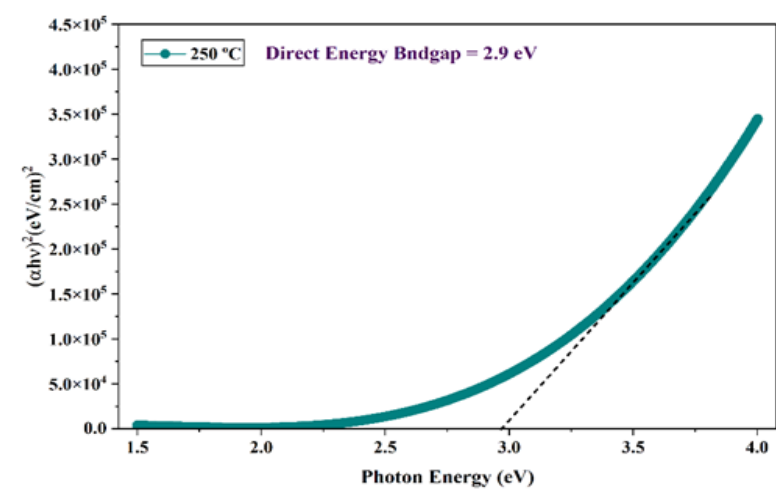


Fig 4. Plot of ($\alpha h\nu$)² versus ($h\nu$) for the NZF/glass thin film annealed at 250 °C

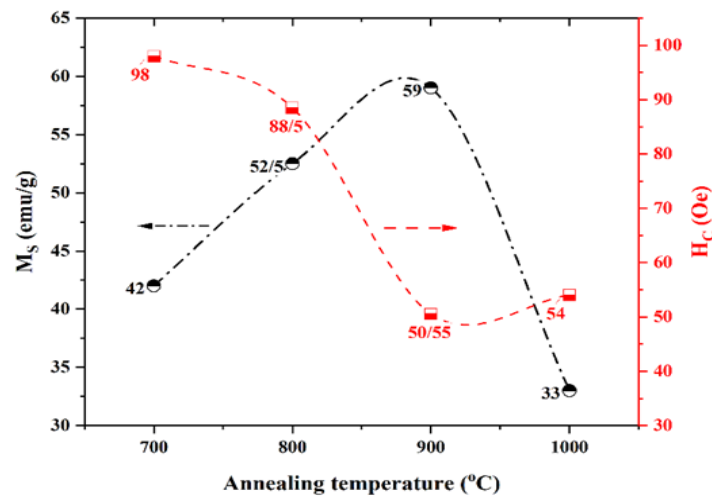


Fig 5. Variation of M_S and H_C of NZF/Si thin films

4- Conclusion

NZF thin films were successfully deposited via RF magnetron sputtering without substrate heating onto single-crystal Si and glass substrates. Post-deposition annealing was carried out in an oxygen atmosphere: NZF/Si films were annealed at 700 to 1000 °C, while NZF/glass films were annealed at 200 and 250 °C. XRD results confirmed the formation of a pure spinel phase. The film thickness was determined to be approximately 195 nm using cross-sectional imaging by FE-SEM. UV-Vis spectroscopy analysis revealed that light absorption in the visible and ultraviolet regions significantly increased with higher annealing temperatures. This behavior is accompanied by a reduction in the optical bandgap (E_g) from 1.3 eV for the sample annealed at 200 °C to 0.9 eV for the sample annealed at 250 °C. Although magnetic properties also exhibited a favorable trend namely, increased M_S and reduced H_C field with improved microstructure, the optical findings of this study clearly highlight that the annealing temperature is a key parameter governing both structural and optical characteristics of NZF thin films simultaneously. These results pave the way for the rational design of ferrite based thin films with tunable optical properties, enabling their potential application in future magneto-optical devices, high-frequency optical filters, and integrated photonic systems.

5- Reference

- [1] Kumar, R., et al., Application of Nanomaterials for Smart Devices, in *Nanotechnology: A Quick Guide to Materials and Technologies*. 2024, Bentham Science Publishers. p. 1-25. <https://doi.org/10.2174/97898152567721240101>
- [2] Guzman, L., et al., Growth, magnetic, and electronic properties of Ni-Zn ferrites thin films. *Materials Research Express*, . 11(9): p. 096403. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad78ae>
- [3] Zhou, Z. and J. He. Study on Crystallinity and Magnetic Properties of NiCuZn Ferrite Films Deposited by RF Sputtering. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2706/1/012070>
- [4] Yusuf, Y., et al., Microstructure and magnetic properties of Ni-Zn ferrite thin film synthesized using sol-gel and spin-coating technique. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2017. 53: p. 767-774. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0090-2>
- [5] Abdollahi, M., M.H. Shams, and M.H. Hosseini, Enhanced magnetic properties of Ni-Zn ferrite thin films grown on single-crystal silicon substrate using magnetron sputtering. *Indian Journal of Physics*, 2025: p. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12648-025-03774-y>
- [6] Thakur, P., et al., Recent advances on synthesis, characterization and high frequency applications of Ni-Zn ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021. 530: p. 167925. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167925>
- [7] Pawar, C., M. Gujar, and V. Mathe, Optical properties of spin-deposited nanocrystalline Ni-Zn ferrite thin films processed by sol-gel. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2017. 30(3): p. 615-625. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3720-y>



بررسی تأثیر دمای بازپخت بر خواص اپتیکی و ریزساختار لایه‌های نازک فریت نیکل - روی رشد یافته با روش کندوپاش مگنترونی*

مقاله پژوهشی

محمد حسین حسینی^(۳)

محمد حسین شمس^(۲)

محسن عبداللهی^(۱)

doi 10.22067/jmme.2026.97057.1230

چکیده لایه نازک‌های فریت نیکل - روی (NZF) رشد یافته بر روی زیرلایه تک بلور سیلیکون و شیشه با استفاده از کندوپاش مگنترون RF تولید شدند. آزمون‌های XRD، FE-SEM، AFM، UV-vis و VSM برای تعیین ترکیب فازی و توپوگرافی سطح به همراه خواص اپتیکی و مغناطیسی لایه‌های نازک فریت NZF انجام شد. تمامی نمونه‌ها دارای ساختار اسپینل هستند و میانگین ابعاد بلورک‌ها که با افزایش دمای بازپخت، رشد نشان داده‌اند در محدوده ۱۹-۳۱ نانومتر است. بررسی‌های اپتیکی با استفاده از طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی نشان داد که با افزایش دمای بازپخت، عبور نور در محدوده مرئی افزایش یافته است. همچنین، تصاویر FE-SEM و AFM نشان دهنده روند افزایشی در اندازه دانه‌ها (از ۳۲ تا ۴۲ نانومتر) با افزایش دمای بازپخت و کاهش زبری سطح بودند که هر دو می‌توانند بر ویژگی‌های نوری لایه‌ها تأثیرگذار باشند. این تغییرات ساختاری همراستا با رفتار اپتیکی لایه‌هاست و در کاهش پراکندگی نور و بهبود شفافیت مؤثر است. ارزیابی میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نازک بازپخت شده طبق آزمایش‌های پروفیلومتری، ارتفاع رسوب‌گذاری را ۱۹۸ نانومتر نشان می‌دهد و مؤید داده‌های FE-SEM است. ارزیابی مغناطیسی لایه‌های نازک NZF/Si نشان از افزایش مقادیر M_s از ۴۲ به ۵۹ emu/g و کاهش مقادیر H_c از ۹۸ به ۵۰ Oe با افزایش دمای بازپخت، از ۷۰۰ به ۹۰۰ °C است. این نتایج حاکی از آن است که با بهینه‌سازی دمای بازپخت، لایه‌های NZF علاوه بر بهبود خواص مغناطیسی نرم، ویژگی‌های اپتیکی مناسبی پیدا می‌کنند که کاربرد آن‌ها را در افزاره‌های مغناطیسی - اپتیکی و فناوری‌های بسامد بالا تسهیل می‌سازد.

واژه‌های کلیدی فریت نیکل - روی، لایه نازک، کندوپاش مگنترونی، ریز ساختار، خواص اپتیکی.

Investigation of the Effect of Annealing Temperature on the Optical Properties and Microstructure of Nickel-Zinc Ferrite Thin Films Grown by Magnetron Sputtering

Mohsen Abdollahi

Mohammad Hossein Shams

Mohammad Hossein Hosseini

Abstract Nickel-zinc ferrite (NZF) thin films grown on single-crystal silicon and glass substrates were produced using RF magnetron sputtering. XRD, FE-SEM, AFM, UV-vis, and VSM tests were performed to determine the phase composition and surface topography, along with the optical and magnetic properties of the NZF ferrite thin films. All samples had a spinel structure, and the average crystallite sizes, which showed growth with increasing annealing temperature, ranged from 19-31 nm. Optical investigations using UV-visible spectroscopy showed that light transmittance in the visible range increased with increasing annealing temperature. Also, FE-SEM and AFM images showed an increasing trend in grain size (from 32 to 42 nm) with increasing annealing temperature and a decrease in surface roughness, both of which can affect the optical properties of the films. These structural changes were consistent with the optical behavior of the films and were effective in reducing light scattering and improving transparency. Atomic force microscopy evaluation of the annealed thin films, according to profilometry tests, showed a deposition height of 198 nm, confirming the FE-SEM data. Magnetic evaluation of the NZF/Si thin films showed an increase in M_s values from 42 to 59 emu/g and a decrease in H_c values from 98 to 50 Oe with increasing annealing temperature, from 700 to 900 °C. These results indicate that by optimizing the annealing temperature, NZF films not only improve their soft magnetic properties but also acquire suitable optical characteristics, facilitating their application in magneto-optical devices and high-frequency technologies.

Keywords Nickel-zinc ferrite, Thin film, Magnetron sputtering, Microstructure, Optical properties.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۱/۱۴ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری علوم و فناوری نانو، مجتمع دانشگاهی الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، مجتمع دانشگاهی الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

(۳) استادیار، مجتمع دانشگاهی الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

مقدمه

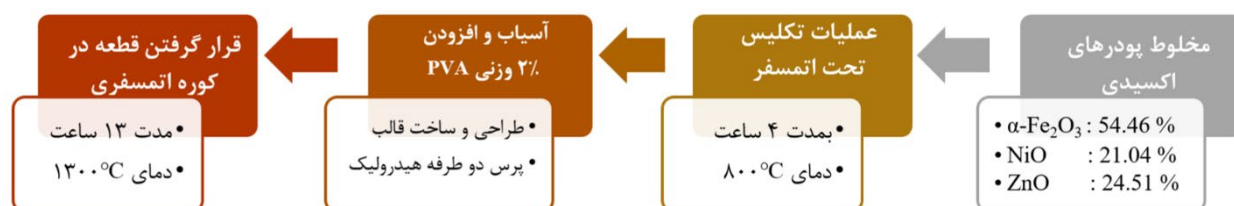
فریت نیکل - روی ($\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$: NZF) به عنوان یک ماده مغناطیسی نرم با مقاومت الکتریکی بالا، مغناطش اشباع مناسب، پسماند کم و پایداری شیمیایی عالی، همواره مورد توجه پژوهشگران در حوزه‌های الکترونیک فرکانس بالا بوده است. کاربردهای گسترده آن را از جمله در سیم‌پیچ‌ها، ترانسفورماتورها، فیلترهای جذب تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و اجزای مایکروویو می‌توان نام برد به ویژه در قالب لایه‌های نازک که امکان ادغام عملکردهای مغناطیسی و اپتیکی را در تراشه‌های میکروالکترونیک فراهم می‌کنند [1-3]. در سال‌های اخیر، روند فزاینده به سوی کوچک‌سازی و یکپارچه‌سازی افزاره‌ها، توسعه لایه‌های نازک فریت را تقویت کرده است، چرا که این لایه‌ها نه تنها سازگاری فرایندی با صنعت نیمه‌هادی دارند، بلکه از نظر رفتار اپتیکی نیز پتانسیل کاربرد در محدوده‌های فرابنفش و مرئی را از خود نشان می‌دهند [4-7]. از میان روش‌های لایه‌نشانی، کندوپاش مگنترونی فرکانس رادیویی (Radio Frequency Magnetron Sputtering) به دلیل توانایی تولید پوشش‌های یکنواخت، متراکم و با ترکیب استوکیومتری کنترل شده، گزینه‌ای ایده‌آل برای ساخت لایه‌های نازک فریت با کیفیت اپتیکی مناسب محسوب می‌شود [5] و [7-10]. با این حال، لایه‌های رسوب شده در دمای پایین معمولاً ساختار آمورف یا با بلورینگی ضعیف دارند که علاوه بر تأثیر منفی بر خواص مغناطیسی، منجر به پراکندگی بالای نور و کاهش عبور اپتیکی نیز می‌شود. عملیات حرارتی پس از لایه‌نشانی (بازپخت (Annealing)) نقشی کلیدی در بهبود خصوصیات اپتیکی ایفا می‌کند، زیرا افزایش دمای بازپخت، با تسهیل بازبلورش (Recrystallization) و رشد دانه، نقص‌های ساختاری به ویژه مرزدانه‌ها و تخلخل‌های سطحی را کاهش می‌دهد و در نتیجه شفافیت نوری و یکنواختی ضریب شکست را ارتقا می‌بخشد. انتخاب بهینه دمای بازپخت و اتمسفر آن، علاوه بر کنترل فاز بلوری و اندازه دانه، تأثیر مستقیمی بر پارامترهای اپتیکی مانند

گاف انرژی مستقیم/غیرمستقیم، جذب نور، و طیف عبور دارد. دماهای مناسب بازپخت با افزایش انتشار اتمی (Atomic diffusion) و بهبود چینش بلوری، سبب کاهش عیوب نقطه‌ای و تنش‌های ناشی از لایه‌نشانی می‌شوند که این عوامل به طور مستقیم بر پهنای نوار گاف و رفتار جذبی لایه تأثیر می‌گذارند [11-15]. در مقابل، دماهای بیش از حد بالا ممکن است منجر به تشکیل فازهای ثانویه یا ناهمواری سطح شوند که علاوه بر افزایش پراکندگی نور، می‌توانند طیف عبور را به طور نامطلوبی محدود کنند.

با وجود پیشرفت‌های اخیر، ارتباط ساختار یافته بین شرایط عملیات حرارتی، تحولات ریزساختاری (مانند اندازه دانه، جهت‌گیری بلوری و چگالی عیوب) و تغییرات ناشی از آن در پاسخ اپتیکی لایه‌های نازک فریت نیکل - روی هنوز به صورت جامع و یکپارچه مورد بررسی قرار نگرفته است. این شکاف پژوهشی، لزوم مطالعه همزمان ویژگی‌های ساختاری، مغناطیسی و به ویژه اپتیکی این سیستم‌ها را در شرایط مختلف بازپخت آشکار می‌سازد. نویسندگان در [16] خواص مغناطیسی NZF/Si را با دمای بازپخت تا 900°C بررسی کردند و در پژوهش حاضر علاوه بر افزایش گستره دمای بازپخت برای زیرلایه Si، خواص اپتیکی لایه نازک NZF بر روی زیرلایه شیشه در دو دمای بازپخت 200°C و 250°C نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند راهگشای درک عمیق‌تری از رابطه ساختار - خواص در لایه‌های نازک فریتی و همچنین طراحی بهینه‌تر افزاره‌های مبتنی بر این مواد برای کاربردهای فرکانس بالا و فوتونیک باشد.

روش ساخت

تارگت یا هدف مورد استفاده در کندوپاش مگنترونی، توسط روش استاندارد ساخت، از مواد اکسیدی آهن، نیکل و روی تولید شد [17]. نسبت مواد و همچنین مراحل تولید تارگت با قطر پنجاه و پنج و ضخامت پنج میلی‌متر در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱ نمایی از ترتیب و مراحل تولید، مواد اولیه، شکل‌دهی و تفجوشی تارگت فریت $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ مورد استفاده در این پژوهش

نیکل - روی بازپخت شده در دماهای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰°C را نشان می‌دهد. همان گونه که در بخش (الف) این شکل مشاهده می‌شود، الگوی پراش تارگت تنها شامل قله‌های متناظر با فاز اسپینل و با تطابق کامل با کارت استاندارد (ICDD) شماره ۰۰۸-۰۰۳۳۴ است. این یافته نه تنها تشکیل کامل و خالص فاز اسپینل در تارگت را تأیید می‌کند، بلکه عدم حضور هرگونه فاز ناخالصی را نیز اثبات می‌کند، عاملی که در کاهش پراکندگی نور و بهبود پاسخ اپتیکی لایه‌های رشد یافته از این تارگت نقش اساسی دارد.

بخش (ب) شکل (۲)، الگوهای XRD لایه‌های نازک NZF بخش (ب) در حالت تازه رشد یافته و هم پس از بازپخت در دماهای مختلف نشان می‌دهد. همه نمونه‌های بازپخت شده دارای ساختار بلوری اسپینل بوده و قله -۳۱۱- در آن‌ها برجسته است.

این تطابق ساختاری نشان دهنده تشکیل فاز بلوری یکنواخت است که شرط لازم برای رفتار اپتیکی قابل پیش‌بینی و تکرارپذیر محسوب می‌گردد. جالب توجه است که به جز نمونه بازپخت شده در دمای ۱۰۰۰°C، سایر نمونه‌ها هیچ گونه جهت‌گیری ترجیحی نشان نمی‌دهند. این رفتار ساختاری با یافته‌های گزارش شده در مطالعات پیشین [18-22] همخوانی دارد و از نظر اپتیکی دارای اهمیت ویژه است. توزیع همسانگرد فاز بلوری منجر به پاسخ اپتیکی یکنواخت در سطح لایه و کاهش وابستگی جهتی خواص نوری (مانند ضریب شکست و جذب) می‌شود. بنابراین، تأیید خلوص فازی و یکنواختی ساختار بلوری در سراسر محدوده دمایی بازپخت، پیش‌زمینه‌ای قوی برای تفسیر اصولی رفتار اپتیکی لایه‌های NZF، از جمله تغییرات گاف انرژی، شفافیت طیفی و پاسخ جذبی، فراهم می‌کند. ثابت‌های شبکه از صفحات پراش با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

که در آن a ثابت شبکه، d فاصله بین صفحه‌ای و h ، k و l شاخص‌های میلر صفحات بلوری هستند [23]. چگالی نابه‌جایی که به صورت طول خطوط نابه‌جایی در واحد حجم بلور محاسبه می‌شود، بر اساس رابطه معکوس مجذور اندازه بلورک، توسط رابطه زیر اندازه‌گیری شد [23]:

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2)$$

در اینجا، δ برای نشان دادن چگالی نابه‌جایی استفاده می‌شود، در حالی که D نشان دهنده میانگین اندازه بلورک است. کمیت

لایه‌های نازک فریت نیکل - روی ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) به منظور بررسی خواص اپتیکی، بر روی دو نوع زیرلایه سیلیکون تک‌بلور با جهت‌گیری (۱۱۱) با قطر ۲/۵۴ cm و شیشه با ابعاد ۰/۵ cm × ۰/۵ cm در شرایط یکسان لایه نشانی، رشد داده شدند. فرایند لایه‌نشانی با استفاده از روش کندوپاش مگنترونی فرکانس رادیویی در اتمسفر گازی متشکل از آرگون و اکسیژن انجام گرفت. فشار پایه قبل از کندوپاش کمتر از 10^{-5} Torr حفظ شد، در حالی که فشار کاری در طول فرایند لایه‌نشانی برابر با ۱/۱ Torr بود. فشار جزئی اکسیژن ($P(\text{O}_2) / P(\text{Ar} + \text{O}_2)$) شش درصد، سرعت لایه نشانی (۳/۲ نانومتر در دقیقه) و توان منبع RF، ۱۶۰ وات تنظیم شد. پس از رشد، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی در اتمسفر اکسیژن به مدت دو ساعت قرار گرفتند: نمونه‌های روی سیلیکون در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۱۰۰۰°C و نمونه‌های روی شیشه در دماهای ۲۰۰ و ۲۵۰°C. این عملیات حرارتی علاوه بر بهبود ساختار بلوری، نقش کلیدی را در بهینه‌سازی ویژگی‌های اپتیکی از جمله گاف انرژی، ضریب جذب و شفافیت طیفی لایه‌ها ایفا می‌کند.

ارزیابی دقیق خواص اپتیکی با استفاده از طیف‌سنج Vis (AVANTES AvaSpec-2048) در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر انجام شد. داده‌های طیفی عبور و بازتاب به منظور استخراج پارامترهای اپتیکی کلیدی از جمله ضریب جذب (α) و گاف انرژی (E_g) مورد تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین دقیق ضخامت لایه‌ها به عنوان پارامتری حیاتی در تحلیل کمی داده‌های اپتیکی، از دستگاه پروفایلمتر شرکت راگا استفاده شد.

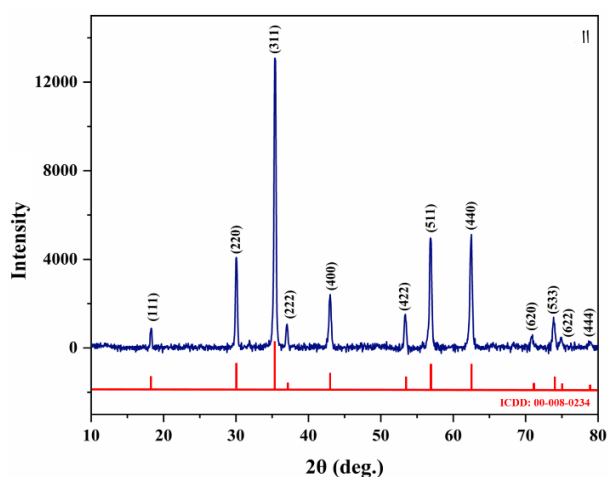
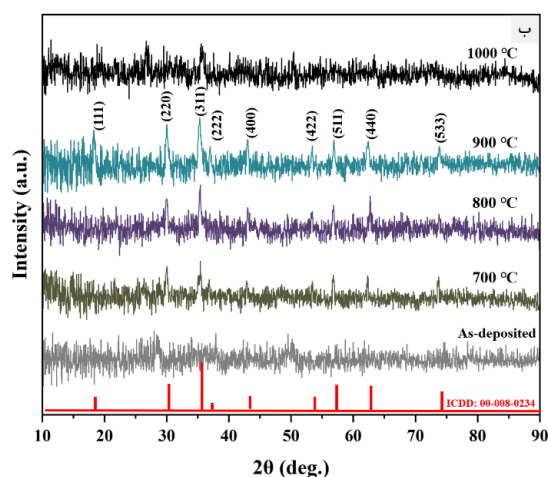
برای درک جامع‌تر رابطه بین ساختار و خواص اپتیکی، مشخصه‌یابی تکمیلی ساختاری و سطحی نیز با استفاده از پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD: Tongda TD-3700)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM: FEI QUANTA FEG-450) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM: OPTO-EDU) انجام گرفت. همچنین، برای اطمینان از وجود ویژگی‌های مغناطیسی مطلوب که در کاربردهای اپتو-مغناطیسی اهمیت دارد، رفتار مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه‌های ارتعاشی (VSM) بررسی شد.

نتایج و بحث

سنجش‌های ساختاری و تصویربرداری

شکل (۲) طیف پراش پرتو ایکس نرمال (Normal) و گریزینگ (Grazing) مربوط به تارگت ساخته شده و لایه‌های نازک فریت

بهتری نسبت به فیلم‌هایی که در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰°C عملیات حرارتی شدند، نشان دادند، پدیده‌ای که به تجمع بلورها ناشی از دمای عملیات حرارتی بالاتر نسبت داده می‌شود. کاهش ثابت شبکه و چگالی نابه‌جایی‌ها را می‌توان به کاهش عیوب شبکه و بهبود بلورینگی ناشی از افزایش دمای عملیات حرارتی نسبت داد. افزایش دمای عملیات حرارتی به ۱۰۰۰°C همان گونه که از طیف پراش پرتو ایکس مشخص است سبب افت کیفیت لایه نازک شده است که احتمالاً ناشی از تشکیل تنش‌های داخلی می‌باشد. متغیرهای ساختاری تارگت NZF و لایه‌های NZF/Si مستخرج از XRD و FE-SEM که در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰°C عملیات حرارتی شده‌اند، در جدول (۱) فهرست شده‌اند.

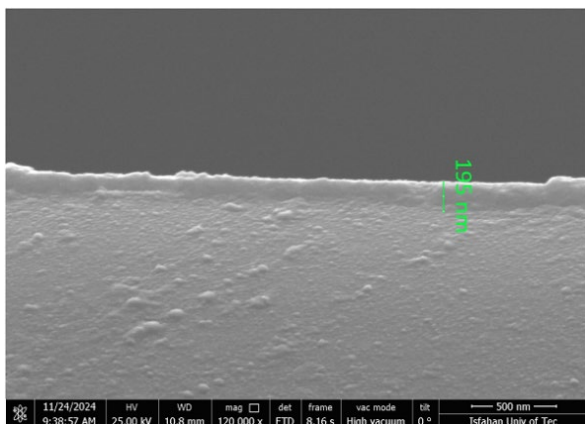


شکل ۲ طیف پراش پرتو ایکس: (الف) نرمال از تارگت فریت $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ و (ب) گریزینگ از لایه‌های نازک NZF/Si پس از لایه‌نشانی و بازپخت شده در دماهای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰°C

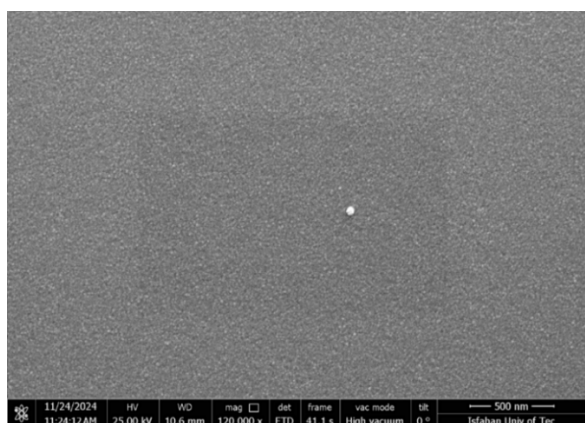
جدول ۱ ویژگی‌های ساختاری تارگت و لایه‌های نازک NZF در دماهای بازپخت ۷۰۰ تا ۱۰۰۰°C حاصل از طیف پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی

نمونه	دمای بازپخت (°C)	پارامتر شبکه (Å)	میانگین ابعاد بلورک‌ها از (nm)XRD	میانگین ابعاد دانه از (nm)SEM	چگالی نابه‌جایی (10^{15} lines/m ²)
تارگت	تفجوشی در ۱۳۰۰°C	۸/۴۰۸	۲۹/۸۹۸۵		
NZF	۷۰۰	۸/۴۲۰	۱۹/۳۶۰۸	۳۲/۵۷	۴/۲۴
NZF	۸۰۰	۸/۴۱۹	۲۱/۸۲۲۱	۳۵/۹۲	۲/۹۹
NZF	۹۰۰	۸/۴۱۸	۲۷/۶۵۵۵	۴۰/۴۶	۱/۳۱
NZF	۱۰۰۰	۸/۴۱۶	۲۷/۸۸۲۴	۴۳/۵۲	۱/۳۲

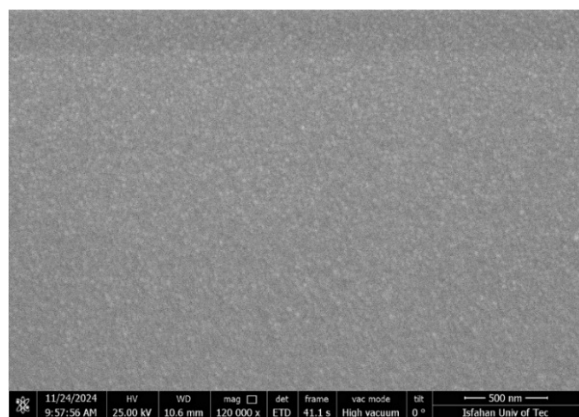
مجموع، پایه‌های فیزیکی رفتار اپتیکی در ساختار را تشکیل می‌دهند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳ تصاویر FE-SEM: (الف) مقطع عرضی لایه نازک NZF/Si با ضخامت لایه ۱۹۵ nm، (ب) و (ج) سطح لایه‌های نازک پس از بازپخت در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰°C

در شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) لایه‌های نازک NZF/Si به صورت مقطع عرضی از نمونه قبل از عملیات حرارتی و بازپخت شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰°C آمده است. تصویر مقطع عرضی نمونه نشان از ضخامتی در حدود ۱۹۵ نانومتر برای لایه نازک دارد و روش ضخامت‌سنجی پروفایلمتری نیز داده‌های میکروسکوپی را تأیید می‌کند. این دقت در تعیین ضخامت، اهمیت ویژه‌ای برای تحلیل کمی داده‌های اپتیکی (مانند محاسبه ضریب جذب و گاف انرژی) دارد. لایه‌های نازک NZF ساختاری متراکم و بدون ترک با دانه‌های کروی و توزیع نسبتاً یکنواخت از خود نشان می‌دهند (شکل‌های ۳-ب و ۳-ج). این همگنی ریخت‌شناختی نقش کلیدی در کاهش پراکندگی نور در مرز دانه‌ها ایفا می‌کند و در نتیجه به بهبود شفافیت طیفی و پاسخ اپتیکی قابل پیش‌بینی لایه کمک می‌کند. میانگین اندازه دانه‌ها (بر اساس FE-SEM) با افزایش دمای بازپخت روند صعودی نشان می‌دهد: از ۳۲/۵۷ نانومتر در ۷۰۰°C به ترتیب به ۳۵/۹۲ نانومتر در ۸۰۰°C، ۴۰/۴۶ نانومتر در ۹۰۰°C و ۴۲/۵۲ نانومتر در ۱۰۰۰°C می‌رسد. این روند به خوبی با نتایج به دست آمده از پراش اشعه ایکس (XRD) همخوانی دارد، گرچه که مقادیر XRD (بر اساس رابطه شرر) اندازه‌های کوچک‌تری را گزارش می‌کنند. این تفاوت قابل انتظار است، زیرا XRD میانگین ابعاد بلورک‌ها را اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که FE-SEM کل دانه (شامل اکسیدهای سطحی و دامنه‌های پراش همدوس چندگانه درون نانودانه‌ها) را مشاهده می‌کند [15].

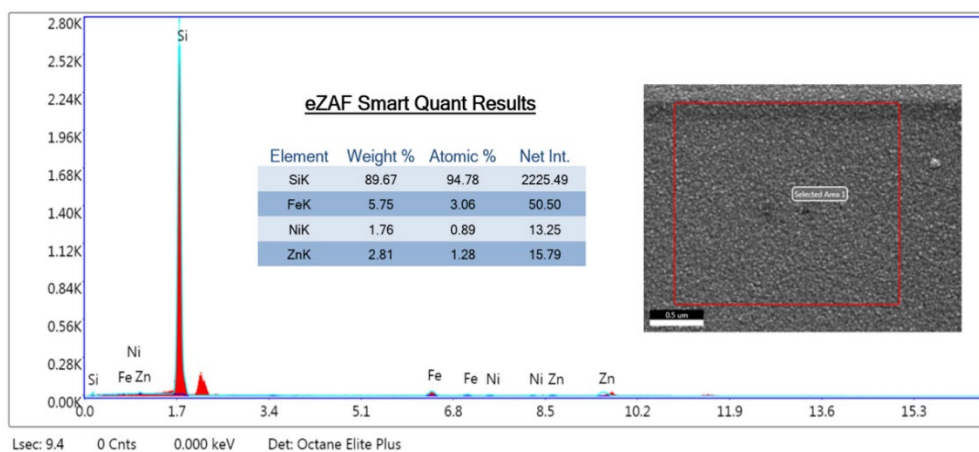
همگنی ساختاری و شکل کروی دانه‌ها می‌تواند ناشی از تعادل انرژی سطحی و نیروهای جاذبه مغناطیسی در طول رشد و بازپخت باشد. این ساختار متراکم نه تنها برای کاربردهای مغناطیسی نرم در فرکانس‌های بالا مطلوب است، بلکه از نظر اپتیکی نیز مزیت‌هایی چشم‌گیر دارد: کاهش حجم مرزهای دانه منجر به کاهش پراکندگی نور و افزایش یکنواختی شاخص شکست در سراسر لایه می‌شود. این ویژگی‌ها به ویژه در طراحی لایه‌های نازک برای دستگاه‌های اپتوالکترونیکی و فوتونیکی اهمیت حیاتی دارند [24]. داده‌های کمی مربوط به میانگین اندازه دانه، ثابت شبکه و چگالی ناهم‌جایی در جدول (۱) جمع‌بندی شده‌اند و به خوبی رابطه بین پارامترهای فرایندی، ریخت‌شناسی و کیفیت ساختاری لایه‌ها را نشان می‌دهند، عواملی که در

و می‌توانند منجر به کاهش شدت عبور/بازتاب و ایجاد نوفه به ویژه در محدوده مرئی و فرابنفش در طیف‌های اپتیکی شوند. از سوی دیگر، در حوزه مغناطیسی، چنین ناهمواری‌هایی ممکن است به عنوان موانعی برای حرکت دیواره‌های مغناطیسی عمل کنند و منجر به افزایش جزئی وادارندگی شوند. با این حال، تأثیر آن‌ها بر مغناطش اشباع ناچیز گزارش شده است و عمدتاً ناشی از نوسانات موضعی در توپوگرافی سطح است [8,25,26]. بررسی یکنواختی ضخامت با وجود انحرافات جزئی (که ممکن است به شرایط رسوب یا خواص زیرلایه مربوط باشد) با انحراف معیار $\pm 2/3\%$ به دست آمد. این میزان ناهمگنی، که احتمالاً ریشه در تغییرات جزئی شرایط رسوب یا ناهمگنی خواص زیرلایه دارد، می‌تواند بر خواص مغناطیسی حساس به ضخامت (مانند وادارندگی) تأثیر بگذارد. از منظر اپتیکی، چنین تغییراتی در ضخامت ممکن است منجر به نوسانات فضایی در الگوی تداخل نوری و در نتیجه، ناپایداری در پاسخ طیفی لایه شود [26]. بنابراین، بهینه‌سازی پارامترهای لایه‌نشانی برای دستیابی به یکنواختی بیشتر ضخامت، نه تنها برای بهبود عملکرد مغناطیسی، بلکه برای دستیابی به رفتار اپتیکی قابل اطمینان و تکرارپذیر در کاربردهای فوتونیک ضروری است.

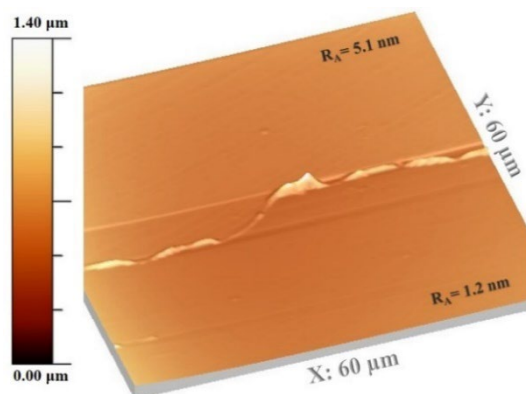
تصاویر AFM از سطوح لایه نازک فریت بر روی زیر لایه Si در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت و دماهای بازپخت از ۷۰۰ تا ۱۰۰۰°C در شکل (۶) قابل مشاهده است. پس از عملیات حرارتی، لایه‌های نازک نمونه‌ها به ریزساختارهای متراکم، یکنواخت و عاری از ترک یا شکستگی در سطوح آن‌ها تبدیل شدند که گواهی بر یکپارچگی مکانیکی و همگنی ساختاری در سطح لایه است. این ریزساختار یکنواخت که در مطالعات مشابه به گروه‌بندی خودبه‌خودی نانوذرات کروی نسبت داده شده است، از نظر اپتیکی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا کاهش ناپیوستگی‌های سطحی و ساختاری منجر به کاهش پراکندگی غیر ارادی نور و بهبود پاسخ طیفی لایه می‌شود [27]. ریزساختار سطحی لایه‌ها دارای ویژگی دانه‌ای است که همسو با یافته‌های XRD، تأیید کننده ماهیت بلوری فاز NZF است.

خروجی طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) برای لایه نازک NZF/Si اخذ شده از ناحیه مشخص سطح اعم از نواحی مرکزی و پیرامونی در شکل (۴) ارائه شده است. این تحلیل به منظور ارزیابی همگنی ترکیبی و وفاداری فرایند لایه‌نشانی به ترکیب اسمی هدف انجام شد. طیف EDS حضور پیک‌های مشخص عناصر Ni، Zn و Fe را تأیید می‌کند که همراه با پیک قوی سیلیسیم (Si) مربوط به زیرلایه ظاهر می‌شوند. نسبت‌های اتمی عناصر فلزی در لایه نازک با مقایسه مستقیم با ترکیب اسمی هدف مورد استفاده در فرایند کندوپاش تعیین گردید. یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیب شیمیایی اندازه‌گیری شده در لایه نازک تطابق بسیار نزدیکی با ترکیب هدف دارد. این وفاداری ترکیبی نشان دهنده کنترل دقیق فرایند لایه‌نشانی و توزیع یکنواخت عناصر در سطح لایه است و این عاملی حیاتی است که مستقیماً بر خواص اپتیکی تأثیر می‌گذارد. در واقع، ناهمگنی ترکیبی می‌تواند منجر به نوسانات محلی در گاف انرژی، افزایش جذب غیر یکنواخت و کاهش شفافیت طیفی شود. نسبت اتمی مشاهده شده برای Ni:Zn:Fe در لایه نازک با مقادیر گزارش شده در منابع معتبر [7] نیز سازگار است و تأیید می‌کند که ساختار اسپینل NZF با ترکیب شیمیایی مورد انتظار تشکیل شده است. این همگنی ترکیبی، در کنار یکنواختی ساختاری و ریزساختارشناسی گزارش شده در بخش‌های پیشین، زمینه لازم برای رفتار اپتیکی پایدار و قابل تکرار در این لایه‌های نازک فراهم می‌آورد.

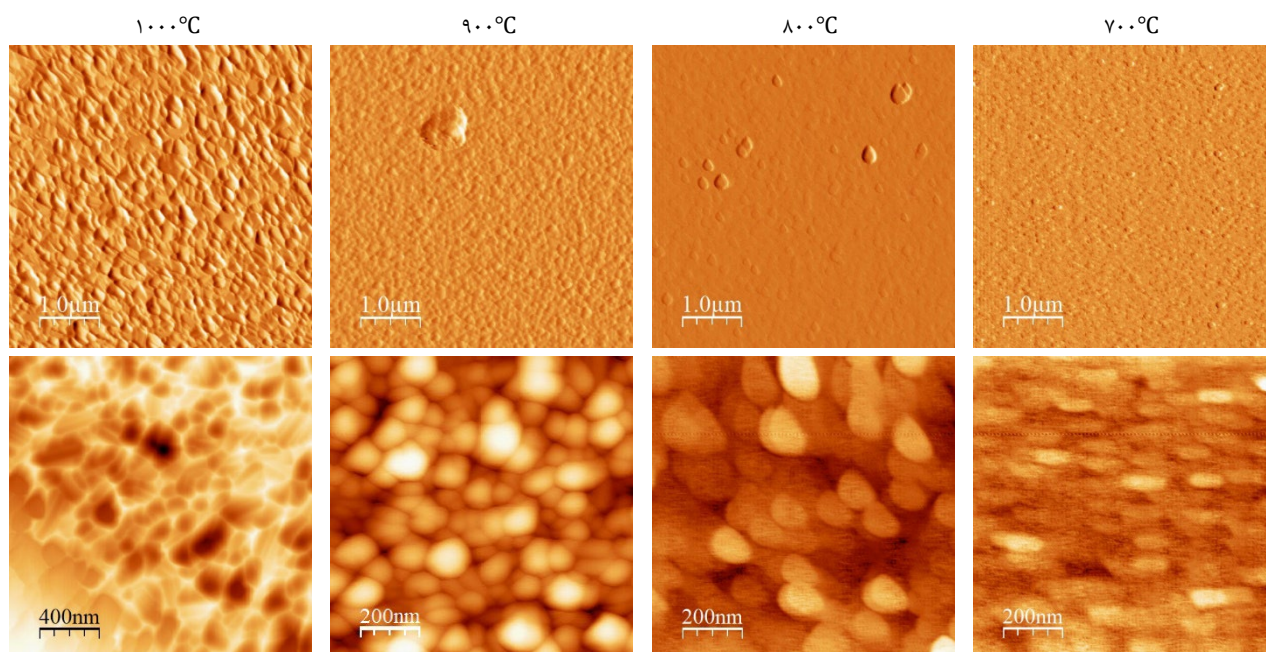
شکل (۵) تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مربوط به لایه نازک NZF/Si را پس از لایه‌نشانی (بدون عملیات حرارتی) نشان می‌دهد که با ایجاد یک لبه پله مانند (step edge) در حین فرایند رسوب، امکان بررسی مستقیم ضخامت لایه فراهم شده است. تحلیل ارتفاع لبه نشان می‌دهد که ضخامت لایه نازک حدود ۱۹۸ نانومتر است که با دقت خوبی با نتایج به دست آمده از تصاویر مقطع عرضی FE-SEM همخوانی دارد. این تطابق از اندازه‌گیری ضخامت، اطمینان لازم برای تحلیل کمی داده‌های اپتیکی، به ویژه در محاسبه ضریب جذب و گاف نواری را فراهم می‌آورد. همچنین میانگین زبری سطوح در بخش‌های لایه نازک و زیرلایه به ترتیب پنج نانومتر و یک نانومتر اندازه‌گیری شد. زبری سطح، حتی در مقیاس نانومتری، می‌تواند تأثیر غیر قابل چشم‌پوشی بر خواص فیزیکی لایه داشته باشد. از دیدگاه اپتیکی، ناهمواری‌های سطحی به عنوان منبع پراکندگی نور عمل می‌کنند



شکل ۴ خروجی طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) به همراه نسبت‌های اتمی، مربوط به لایه نازک NZF/Si اخذ شده از ناحیه مشخص شده در تصویر

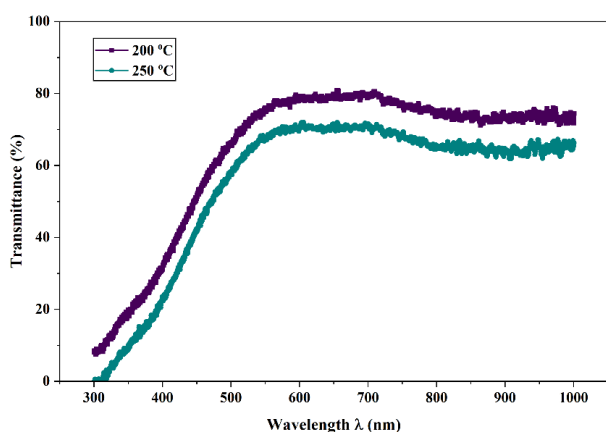


شکل ۵ تصویر سه‌بعدی AFM از لایه ایجاد شده در لایه نازک NZF/Si به منظور سنجش ضخامت لایه نازک (ابعاد $60 \times 60 \mu\text{m}^2$) و زبری سطح در نواحی لایه نازک و زیرلایه

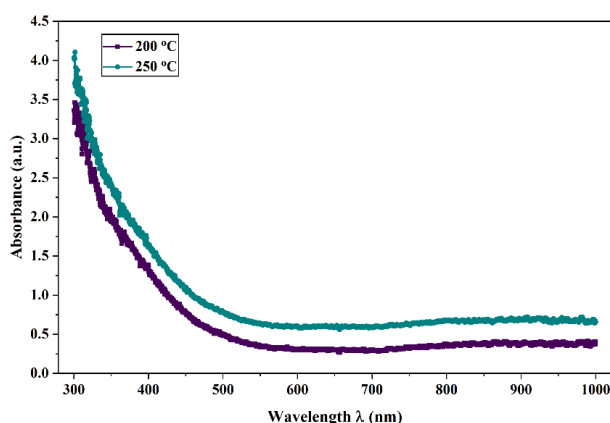


شکل ۶ تصاویر AFM دوبعدی از سطح لایه نازک NZF/Si پس از عملیات حرارتی در دماهای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰°C در دو ابعاد متفاوت

و 250°C اخذ شده است. با افزایش دمای بازپخت، میزان عبور نور از لایه‌ها به طور قابل توجهی کاهش و در مقابل، جذب اپتیکی افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند ناشی از بهبود پیوستگی لایه، افزایش چگالی، و ساختارمندتر شدن فاز بلوری باشد که منجر به کاهش پراکندگی نور و افزایش تعامل فوتون - الکترون در شبکه بلوری می‌گردد [29,30]. این یافته‌ها همسو با تحولات ریزساختاری گزارش شده در بخش‌های پیشین، از جمله رشد اندازه دانه و کاهش نقص‌های سطحی است و برجسته‌ساز نقش دمای بازپخت در هدایت همزمان خواص ساختاری و اپتیکی لایه‌های نازک فریت است.



شکل ۷ طیف عبوری از لایه نازک NZF/glass در دماهای بازپخت 200°C و 250°C در طول موج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر



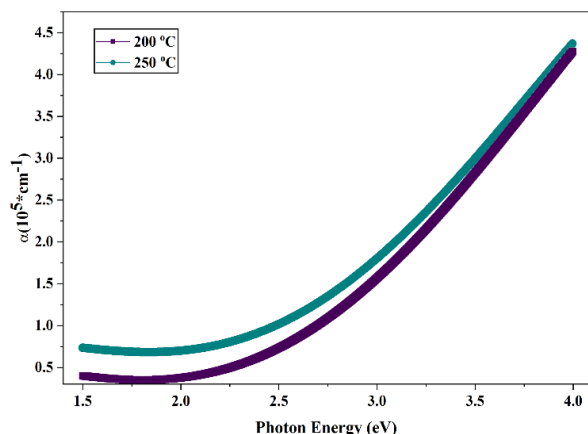
شکل ۸ طیف جذب از لایه نازک NZF/glass در دماهای بازپخت 200°C و 250°C در طول موج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر

تعیین ضریب جذب از روی داده‌های طیف جذب نمونه‌ها و رابطه زیر قابل محاسبه است [28]:

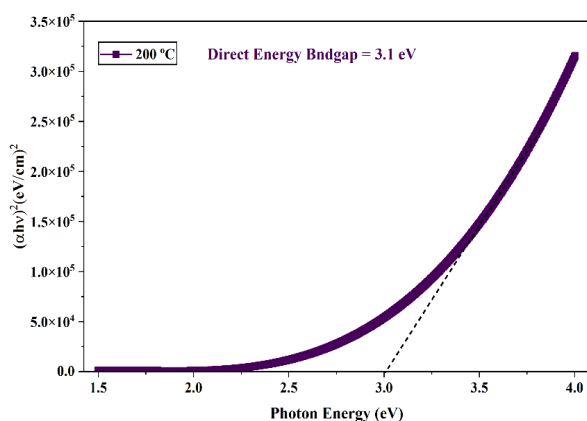
با افزایش دمای بازپخت، رشد قابل توجهی در اندازه دانه‌ها مشاهده می‌شود که نشان دهنده تداوم فرایند رشد دانه در دماهای بالا است. همزمان، زبری متوسط سطح نیز افزایش می‌یابد، (700°C : $5/9$ نانومتر، 800°C : $7/1$ نانومتر، 900°C : $8/5$ نانومتر و 1000°C : $9/8$ نانومتر). این افزایش زبری عمدتاً ناشی از رشد دانه‌های بزرگ‌تر و تشکیل مرزهای برجسته‌تر بین آن‌هاست. از دیدگاه اپتیکی، این افزایش تدریجی در زبری سطح می‌تواند تأثیر دوگانه‌ای داشته باشد. از یک سو، رشد دانه‌ها منجر به کاهش تعداد مرزهای دانه درون حجمی و در نتیجه کاهش پراکندگی نور در عمق لایه می‌شود. از سوی دیگر، افزایش ناهمواری سطح می‌تواند پراکندگی سطحی نور را تشدید کند و به ویژه در محدوده مرئی - فرابنفش، باعث کاهش شفافیت مؤثر و افزایش نوفه در طیف‌های عبور/بازتاب شود. بنابراین، وجود یک تعادل بهینه بین اندازه دانه و زبری سطح، می‌تواند کلید دستیابی به عملکرد اپتیکی بهینه در لایه‌های NZF باشد. این روند ساختاری، در کنار یافته‌های XRD و EDS، تصویر جامعی از تکامل فیزیکی - شیمیایی لایه‌ها در طول بازپخت ارائه می‌دهد و زمینه لازم برای تفسیر سیستماتیک خواص اپتیکی، از جمله گاف انرژی، ضریب جذب و پایداری طیفی را فراهم می‌کند [28].

سنجش‌های اپتیکی

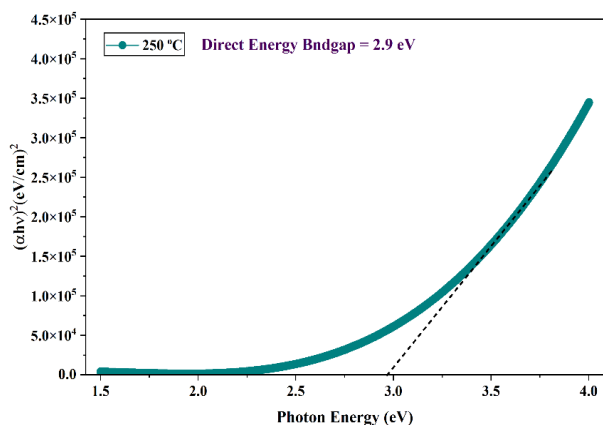
به منظور بررسی ویژگی‌های اپتیکی لایه‌های نازک فریت نیکل - روی، از زیرلایه شیشه استفاده شد در حالی که تمام پارامترهای فرایند کندوپاش RF مانند توان، فشار گاز، زمان رسوب و فاصله تارگت - زیرلایه، کاملاً مشابه شرایط به کار رفته برای نمونه‌های رشد یافته بر روی زیرلایه سیلیکون حفظ گردید. این رویکرد تضمین می‌کند که تفاوت‌های مشاهده شده در خواص اپتیکی، ناشی از تأثیر زیرلایه نیست و مقایسه ضخامت، ریخت‌شناسی و سایر ویژگی‌های لایه‌ها معتبر است. همچنین، نتایج طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های مربوطه وجود فاز اسپینل خالص را تأیید کرد که برای اختصار در این بخش آورده نشده است. شکل‌های (۷) و (۸) نتایج طیف‌سنجی اپتیکی لایه‌های NZF را در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر نشان می‌دهند که شامل طیف‌های عبور (Transmittance) و جذب (Absorbance) است که پس از بازپخت در دماهای 200°C



شکل ۹ نمودار ضرایب جذب اپتیکی لایه نازک NZF/glass بر حسب انرژی فوتون در دماهای بازپخت ۲۰۰ و ۲۵۰ °C



شکل ۱۰ منحنی $(\alpha hv)^2$ بر حسب (hv) لایه نازک NZF/glass در دمای آنیل ۲۰۰ °C



شکل ۱۱ منحنی $(\alpha hv)^2$ بر حسب (hv) لایه نازک NZF/glass در دمای آنیل ۲۵۰ °C

سنجش‌های مغناطیسی

مطالعه ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به نمونه‌های لایه نازک NZF/Si پس از بازپخت تحت اتمسفر اکسیژن در دماهای ۷۰۰

$$\alpha = (2.303 \times A)/t \quad (۳)$$

که در آن A مقادیر به دست آمده از طیف جذب، t ضخامت لایه نازک و α ضریب جذب است. همان گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، لایه‌های نازک فریت نیکل - روی در محدوده طیف مرئی دارای ضریب جذب بالایی هستند که با افزایش انرژی فوتون (hv) روند صعودی نشان می‌دهند. این افزایش جذب مستقیماً با کاهش طیف عبور همراه است و نشان دهنده قوی بودن تعامل نور با ساختار الکترونی لایه است. علاوه بر این، نمونه‌های تحت بازپخت در دمای بالاتر، ضریب جذب بیشتری را در کل محدوده طیفی مورد مطالعه از خود نشان می‌دهند، که می‌تواند ناشی از بهبود بلورینگی، افزایش اندازه دانه و کاهش تراکم نقص‌های ساختاری باشد. به منظور تعیین گاف انرژی نواری (E_g) در نمونه‌ها، از رابطه زیر و رسم منحنی $(\alpha hv)^2$ بر حسب (hv) و برون‌یابی بخش خطی نمودار به محور انرژی، گاف نواری نمونه‌ها قابل حصول است [28,31]:

$$\alpha hv = A (hv - E_g)^r \quad (۴)$$

و در آن α ضریب جذب و (hv) انرژی فوتون است و r نمایی است که بسته به ماهیت انتقال الکترونی برای محاسبه گاف نواری مستقیم و غیر مستقیم به ترتیب $(r=1/2)$ و $(r=2)$ تعیین می‌شود.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، منحنی‌های $(\alpha hv)^2$ به عنوان تابعی از (hv) را برای نمونه‌های بازپخت شده در دمای ۲۰۰ و ۲۵۰ °C درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. مقادیر گاف انرژی به دست آمده به ترتیب برابر با ۳/۱ eV و ۲/۹ eV هستند. کاهش گاف انرژی با افزایش دمای بازپخت می‌تواند ناشی از رشد اندازه دانه‌ها و کاهش اثرات کوانتومی سطحی باشد، چرا که با افزایش دما، دانه‌ها رشد می‌کنند و تأثیرات محدودیت کوانتومی در مرز دانه‌ها کاهش می‌یابد، که معمولاً منجر به تنگ شدن گاف نواری می‌شود [28,32].

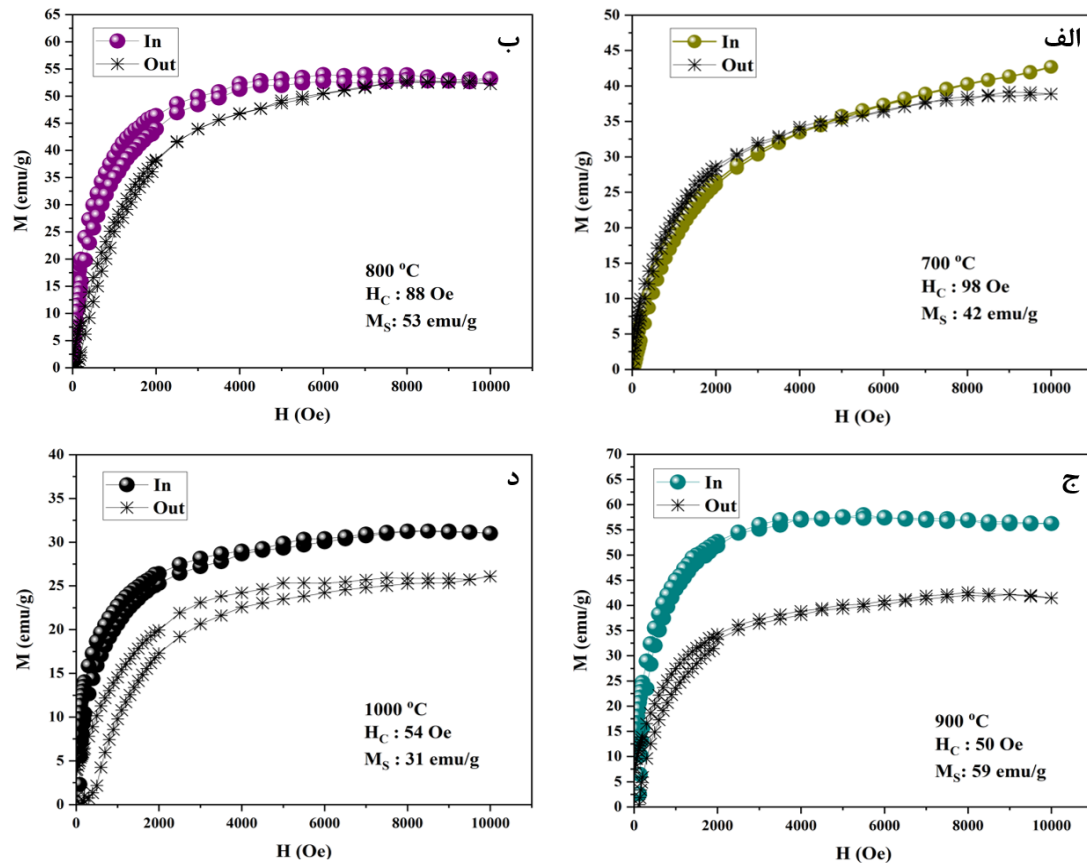
وادرندگی به این دلیل رخ می‌دهد که ماده از حالت تک‌دامنه‌ای (Single-domain) به حالت چنددامنه‌ای (Multidomain) تغییر می‌کند. وادرندگی زمانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد که ماده دارای دانه‌هایی با قطر $32/57$ نانومتر باشد، اما وقتی اندازه دانه‌ها از این آستانه به $40/46$ نانومتر برسد، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. وقتی دانه‌ها اندازه‌های کوچک‌تری داشته باشند، انرژی حرارتی اثرات تصادفی ایجاد می‌کند که در درجه اول مقدار H_c را کاهش می‌دهد. انرژی حرارتی این ذرات مغناطیسی تک‌دامنه به عنوان یک عامل اساسی عمل می‌کند که بر ناپایداری مغناطیسی تأثیر می‌گذارد زیرا کاهش اندازه دانه‌ها تنها باعث تحریک ضعیف حرارتی می‌شود و نمی‌تواند نوسانات جهت‌گیری اسپینی را ایجاد کند در نتیجه منجر به آرایش نانوذر در جهت‌های تصادفی می‌شود. کاهش سطوح ثابت ناهمسانگردی احتمالاً باعث کاهش قابل توجه وادرندگی طبق اصول مدل ناهمسانگردی تصادفی می‌شود. تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط فرناندو و همکاران [37] نشان می‌دهد که H_c مستقیماً با افزایش اندازه دانه D کاهش می‌یابد، بنابراین برای نشان دادن رابطه معکوس خطی آن‌ها فرمول ریاضی $H_c \propto 1/D$ استفاده می‌شود [15,38,39] که در نمودار شکل (۱۳) این مطلب قابل مشاهده است.

روندهای متفاوت حلقه‌های پسماند در جهت‌های عمود و موازی نشان می‌دهند که لایه نازک فریت NZF دارای مقداری ناهمسانگردی است و صفحه لایه نازک، صفحه مغناطیسی آسان باقی می‌ماند. بر اساس مدل ناهمسانگردی دوطرفه (Bianisotropy model)، دو میدان ناهمسانگردی H_{a1} و H_{a2} برای مواد مغناطیسی وجود دارند که میدان‌های ناهمسانگردی مؤثر هنگام واگرا شدن مغناطش از محور آسان در صفحه سخت و آسان هستند [40]. برای فریت نیکل - روی در حالت توده‌ای، رابطه $H_{a1} = H_{a2} = H_k$ برقرار است و برابری با میدان ناهمسانگردی مغناطیسی بلوری مکعبی وجود دارد. برای لایه‌های نازک فریت نیکل - روی، میدان مغناطیس‌زدایی خارج از صفحه تقریباً با مغناطش اشباع برابر است ($H_{a1} \approx M_s$)، به دلیل اینکه صفحه لایه نازک صفحه آسان مغناطیسی و محور مغناطیسی سخت، عمود بر صفحه لایه نازک است. در صفحه لایه نازک، جفت شدگی تبدیلی بین ذرات نانوبلوری رخ می‌دهد که دارای ناهمسانگردی مغناطیسی - بلوری هستند، بنابراین یک میدان ناهمسانگردی مؤثر نسبتاً کمتر از H_{a2} (در صفحه) ایجاد می‌شود [40-43]. مطابق با بررسی‌های جامع انجام شده، پژوهش فعلی با مطالعات قبلی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که وقتی

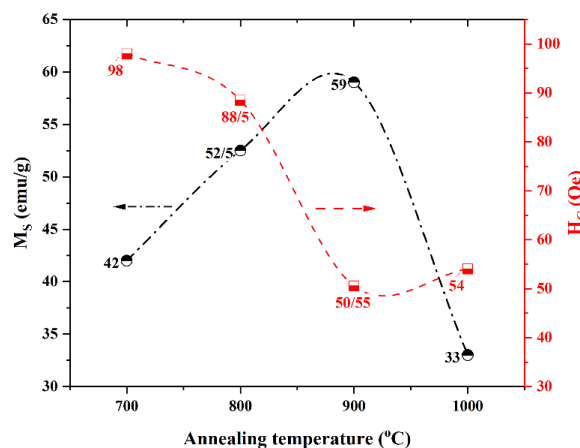
تا 1000°C توسط VSM انجام پذیرفت و حلقه‌های پسماند مغناطیسی (در داخل و خارج از صفحه) در شکل (۱۲) آمده است. حلقه‌های پسماند مغناطیسی نشان از رفتار فرومغناطیسی برای تمامی نمونه‌های لایه نازک دارد. لایه نازک‌های فریت نیکل، نیکل - روی و نیکل - منگنز که در صفحه بلوری (۱۱۱) زیرلایه رشد کرده‌اند، کمترین تأثیر را بر بافت نهایی لایه خواهند داشت [33]. محققان ثابت کرده‌اند که NZF/Si(111) در مقایسه با NZF/Si(100) فازهای ناخالصی کمتر، مغناطش اشباع (M_s) بالاتر و میدان وادرندگی (H_c) پایین‌تری دارد [20,34]. در گزارش حاضر افزایش دمای بازپخت از 700°C تا 900°C منجر به افزایش محسوس مغناطش اشباع و کاهش همزمان مقادیر میدان وادرندگی در نمونه‌های لایه نازک NZF/Si(111) شده است که به دلیل افزایش بلورینگی نمونه در کنار انبساط اندازه دانه است. این عوامل منجر به افزایش تکانه اسپینی مغناطیسی می‌شود که بر مقادیر M_s تأثیر می‌گذارد. تشکیل دیواره دامنه پیش‌رونده فراتر از آستانه بحرانی دانه رخ می‌دهد و منجر به کاهش نیروی وادرندگی می‌شود. دانه‌های مغناطیسی با گذشت زمان بزرگ‌تر می‌شوند و منجر به بهبود مغناطش اشباع (M_s) و مغناطش پسماند (M_r) می‌شوند. نمونه بازپخت شده در دمای 1000°C با کاهش نسبی در مقدار M_s و افزایش در مقدار H_c همراه است که نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ‌های FE-SEM و AFM نیز افت کیفیت در این لایه را تأیید می‌کنند. نمونه لایه نازک NZF-900 بهترین ترکیب از نسبت مغناطش اشباع بالا با حلقه پسماند مغناطیسی باریک را نشان می‌دهد که برتری آن را برای کاربردهای مغناطیسی نرم با بسامد بالا تأیید می‌کند. می‌توان از این نتایج بهره برد و افزود که از منظر اپتو - مغناطیسی نیز، این نمونه به دلیل بلورینگی بالا، ترکیب شیمیایی و ساختار یکنواخت، پتانسیل مناسبی برای نمایش پاسخ‌های اپتیکی پایدار و قابل کنترل در حضور میدان مغناطیسی دارد [35]. نیروی وادرندگی درون صفحه‌ای H_c در نمونه‌های لایه نازک بازپخت شده نسبت به وادرندگی عمودی $H_c \perp$ دارای مقادیر بزرگ‌تری است. با توجه به نتایج حاصل از حلقه‌های پسماند، مقدار H_c با افزایش دمای بازپخت و افزایش ابعاد متوسط دانه‌ها، کاهش می‌یابد که نشان از رابطه قوی میان این عوامل دارد. حداکثر مقدار وادرندگی ۹۸ برای دانه‌هایی با اندازه $32/57$ نانومتر، اندازه‌گیری شد. مقدار وادرندگی اندازه‌گیری شده در این گزارش، تطابق نزدیکی با داده‌های ثبت شده توسط نی و همکارانش [36] دارد که محدوده H_c را بین ۲۰ تا ۲۱۰ Oe گزارش کردند. کاهش

تأیید می‌کند، بلکه پتانسیل آن‌ها را برای سامانه‌های اپتو - مغناطیسی نیز تقویت می‌کند، جایی که پاسخ نوری به طور حساسی به جهت‌گیری مغناطیسی وابسته است [4,7,36,38].

زیرلایه سیلیسم تک‌بلور Si(111) یا Si(100) است و ضخامت تا ۴۰۰ نانومتر است، M_s و H_c اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر، مناسب‌تر از موارد گزارش شده قبلی هستند. این نتایج بهترین ترکیب را با نسبت اشباع بالا با حلقه پسماند باریک نشان می‌دهد که برتری آن را برای کاربردهای مغناطیسی نرم با بسامدهای بالا



شکل ۱۲ حلقه‌های پسماند مغناطیسی داخل و خارج از صفحه، برای لایه نازک NZF/Si با ضخامت ۱۹۵ نانومتر، در دماهای بازپخت ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ به ترتیب در شکل (الف) تا (د)، در میدان اعمالی ۱۰ هزار اورستد



شکل ۱۳ تغییرات مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی لایه نازک NZF/Si در دماهای بازپخت متفاوت ۷۰۰ تا ۱۰۰۰

نتیجه‌گیری

لایه‌های نازک فریت نیکل - روی ($\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$) با استفاده از روش کندوپاش مگنترون RF و بدون گرمایش زیرلایه، بر روی بسترهای تک‌بلور Si و شیشه موفقیت‌آمیز رسوب داده شدند. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای حرارتی بر ویژگی‌های لایه، بازپخت تحت اتمسفر اکسیژن برای لایه‌های NZF/Si در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰°C و همچنین برای لایه‌های NZF بر روی شیشه در دماهای ۲۰۰ و ۲۵۰°C انجام گرفت. نتایج پراش پرتو ایکس، تشکیل فاز اسپینلی خالص را تأیید کرد و اندازه بلورک‌ها را در محدوده ۱۵ تا ۳۱ نانومتر گزارش کرد. ضخامت لایه‌ها با استفاده از تصویربرداری مقطع عرضی در FE-SEM و پروفیلومتری در AFM تقریباً ۱۹۵ نانومتر تعیین شد. اندازه‌گیری زبری سطح لایه نازک پس از پوشش‌دهی بر روی لایه نازک و زیرلایه به ترتیب یک و پنج نانومتر بود. سنجش ریخت‌شناسی سطح توسط AFM نشان دهنده بهبود اندازه دانه‌ها و پیوستگی آن‌ها است. آزمون توپوگرافی توسط FE-SEM با نتایج AFM و XRD مطابقت دارد و تأیید می‌کند که اندازه دانه‌ها با افزایش دمای بازپخت از ۷۰۰ به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد از ۳۲ نانومتر به ۴۲ نانومتر افزایش یافته است. تحلیل طیف‌های UV-Vis نشان داد که با افزایش دمای بازپخت، جذب نور در محدوده مرئی و

مراجع

فرابنفش به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. این رفتار همراه با کاهش گاف انرژی نواری (E_g) از ۳/۱eV در نمونه بازپخت شده در ۲۰۰°C به ۲/۹eV در نمونه ۲۵۰°C است. این کاهش گاف می‌تواند ناشی از رشد اندازه دانه‌ها، کاهش چگالی نقص‌های سطحی و تضعیف اثرات محدودیت کوانتومی در مرزدانه‌ها باشد. همچنین، بهبود بلورینگی و افزایش چگالی لایه با افزایش دما، منجر به کاهش پراکندگی نور و تقویت تعامل فوتون - الکترون در ساختار بلوری شده است. اگر چه خواص مغناطیسی نیز با بهبود ریز ساختار، روند مطلوبی از خود نشان دادند (افزایش مغناطش اشباع و کاهش میدان وادارندگی)، اما یافته‌های اپتیکی این پژوهش به وضوح برجسته می‌سازد که دمای بازپخت یک پارامتر کلیدی در هدایت همزمان خواص ساختاری و اپتیکی لایه‌های نازک NZF است. این نتایج، امکان طراحی بهینه لایه‌های فریتی با ویژگی‌های اپتیکی قابل تنظیم را برای کاربردهای آینده در افزارهای مغناطیسی - اپتیکی، فیلترهای نوری فرانکس بالا و سیستم‌های یکپارچه فوتونیک فراهم می‌آورد.

تقدیر و تشکر

- [1] R. Kumar, M. Singh, D. Gupta, and S. Yadav, "Application of Nanomaterials for Smart Devices," in *Nanotechnology: A Quick Guide to Materials and Technologies*: Bentham Science Publishers, 2024, pp. 1-25. <https://doi.org/10.2174/97898152567721240101>
- [2] V. Veeraraghavan and A. Vickram, "Revolutionizing Material Science: Unravelling novel insights and innovations in nanomaterials," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 10, pp. 38-46, 2023. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V10I10P104>
- [3] T. Long, X. Song, B. Han, Y. Suo, and L. Jia, "In Situ Magnetic Field Compensation Method for Optically Pumped Magnetometers Under Three-Axis Nonorthogonality," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3331425>
- [4] L. Guzman, L. Sánchez, J. G. Monsalve, C. Ostos, and O. Arnache, "Growth, magnetic, and electronic properties of Ni-Zn ferrites thin films," *Materials Research Express*, vol. 11, no. 9, p. 096403, 2024. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad78ae>

- [5] R. Paul, S. Kotru, and J. A. Abu Qahouq, "Structural and magnetic properties of NiCuZn ferrite films deposited using sputtering," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 34, no. 5, p. 391, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09803-4>
- [6] V. Y. Popova, V. V. Petrov, A. P. Ivanishcheva, and E. M. Bayan, "Effect of Zn addition on electrophysical properties of nickel ferrite thin films," *Functional Materials Letters*, vol. 17, no. 02, p. 2440005, 2024. <https://doi.org/10.1142/S1793604724400058>
- [7] Z. Zhou and J. He, "Study on Crystallinity and Magnetic Properties of NiCuZn Ferrite Films Deposited by RF Sputtering," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2706, no. 1: IOP Publishing, p. 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2706/1/012070>
- [8] R. Basumatary, H. Basumatary, M. M. Raja, R. Brahma, and S. Srivastava, "Influence of surface roughness on magnetic property of magnetron sputter deposited FePtCo films," *Materials Research Innovations*, vol. 28, no. 6, pp. 421-432, 2024. <https://doi.org/10.1080/14328917.2024.2304944>
- [9] R. Garg *et al.*, "Sputtering thin films: Materials, applications, challenges and future directions," *Advances in Colloid and Interface Science*, p. 103203, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103203>
- [10] A. Behera, S. Aich, and T. Theivasanthi, "Magnetron sputtering for development of nanostructured materials," in *Design, Fabrication, and Characterization of Multifunctional Nanomaterials*: Elsevier, 2022, pp. 177-199. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820558-7.00002-9>
- [11] P. J. Kelly and R. D. Arnell, "Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications," *Vacuum*, vol. 56, no. 3, pp. 159-172, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00189-X](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00189-X)
- [12] K. Wasa, M. Kitabatake, and H. Adachi, *Thin film materials technology: sputtering of control compound materials*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [13] G. Bräuer, B. Szyszka, M. Vergöhl, and R. Bandorf, "Magnetron sputtering—Milestones of 30 years," *Vacuum*, vol. 84, no. 12, pp. 1354-1359, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.12.014>
- [14] M. Kumar, S. Nandy, S. Rani, and K. H. Chae, "Radio frequency sputtering of ferrite thin films," in *Ferrite Nanostructured Magnetic Materials*: Elsevier, 2023, pp. 241-250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823717-5.00053-X>
- [15] Y. Yusuf, R. a. S. Azis, S. Kanagesan, and G. Bahmanrokh, "Microstructure and magnetic properties of Ni-Zn ferrite thin film synthesized using sol-gel and spin-coating technique," *Journal of the Australian Ceramic Society*, vol. 53, pp. 767-774, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0090-2>
- [16] M. Abdollahi, M. H. Shams, and M. H. Hosseini, "Enhanced magnetic properties of Ni-Zn ferrite thin films grown on single-crystal silicon substrate using magnetron sputtering," *Indian Journal of Physics*, pp. 1-10, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12648-025-03774-y>
- [17] P. Thakur, S. Taneja, D. Chahar, B. Ravelo, and A. Thakur, "Recent advances on synthesis, characterization and high frequency applications of Ni-Zn ferrite nanoparticles," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 530, p. 167925, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167925>
- [18] H. Liu *et al.*, "Effects of Substrates on Thin-Film Growth of Nickel Zinc Ferrite by Spin-Spray Deposition," *Coatings*,

- vol. 13, no. 4, p. 690, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13040690>
- [19] D. Peng, G. Yue, and L. Wang, "The Structure and Magnetic Properties of NiZn-Ferrite Films Deposited by Magnetron Sputtering at Room Temperature [J]," *Advanced Materials Research*, vol. 690, pp. 1702-1706, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.1702>
- [20] R. Xu *et al.*, "Influence of substrate temperature on high-frequency soft magnetic properties of [Fe₈₀Ni₂₀-O/NiZn-ferrite] n multilayer thin films," *Journal of alloys and compounds*, vol. 604, pp. 43-49, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.099>
- [21] D. Guo *et al.*, "High-frequency magnetic properties of Zn ferrite films deposited by magnetron sputtering," *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 4, p. 4, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3304837>
- [22] O. Caltun, "Pulsed laser deposition of Ni-Zn ferrite thin films," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 7, no. 2, pp. 739-744, 2005.
- [23] S. Kothapally, S. Kotru, R. Paul, and J. A. Abu Qahouq, "Optical studies of pure and (Cu, Co) doped nickel zinc ferrite films deposited on quartz substrate ", *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 41, no. 2, p. 10, 2023. <https://doi.org/10.1116/6.0002262>
- [24] F. Li *et al.*, "Fatigue fracture mechanism and life prediction of nickel-based single crystal superalloy with film cooling holes considering initial manufacturing damage," *International Journal of Fatigue*, vol. 197, p. 108902, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.108902>
- [25] A. Al-Qawasmeh, M. H. Badarneh, A. Obeidat, and S. Abedrabbo, "Surface roughness effects on magnetic properties of thin films: A computational Monte Carlo study," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 562, p. 169734, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169734>
- [26] Y. Cao and C. Zhou, "Thickness dependence of surface roughness and magnetic properties of FeNiCr thin films," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 333, pp. 1-7, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.12.042>
- [27] B. Lim, J. Chen, and J. Wang, "Thickness dependence of structural and magnetic properties of FePt films," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 271, no. 2-3, pp. 159-164, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.09.023>
- [28] N. Bakr, S. Salman, and H. Khudhair, "Structural and optical properties of zinc doped nickel ferrite Ni (1-x) Zn (x) Fe₂O₄ thin films prepared by chemical spray pyrolysis method," *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 280-293, 2016.
- [29] A. Sutka *et al.*, "Properties of Ni-Zn ferrite thin films deposited using spray pyrolysis," *Thin Solid Films*, vol. 526, pp. 65-69, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.11.017>
- [30] A. Faramawy and H. El-Sayed, "Optimization of visible photoluminescence emission from Ni-Zn ferrite thin films," *Nano Express*, vol. 4, no. 4, p. 045007, 2023. <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ad0ee9>
- [31] C. Pawar, M. Gujar, and V. Mathe, "Optical properties of spin-deposited nanocrystalline Ni-Zn ferrite thin films processed by sol-gel," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 30, no. 3, pp. 615-625, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3720-y>

- [32] S. Chavan, M. Babrekar, S. More, and K. Jadhav, "Structural and optical properties of nanocrystalline Ni-Zn ferrite thin films," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 507, no. 1, pp. 21-25, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.07.171>
- [33] H. S. Cho, M. H. Kim, and H. J. Kim, "Preferred orientation and microstructure of Ni-Zn-Cu ferrite thin films deposited by rf magnetron sputtering," *Journal of materials research*, vol. 9, no. 9, pp. 2425-2433, 1994. <https://doi.org/10.1557/JMR.1994.2425>
- [34] R. Xu *et al.*, "Soft magnetic properties of [Fe₈₀Ni₂₀-O/NiZn-ferrite] n multilayer thin films for high frequency application," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 488, pp. 174-177, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.488-489.174>
- [35] Q. Yu, Y. Su, R. Tursun, and J. Zhang, "Synthesis and characterization of low density porous nickel zinc ferrites," *RSC advances*, vol. 9, no. 23, pp. 13173-13181, 2019. <https://doi.org/10.1039/C9RA01076A>
- [36] S. J. Nie *et al.*, "The structure and magnetic properties of NiZn-ferrite films deposited by magnetron sputtering at room temperature," *Advanced Materials Research*, vol. 690, pp. 1702-1706, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.1702>
- [37] F. J. G. Landgraf, J. R. F. Da Silveira, and D. Rodrigues-Jr, "Determining the effect of grain size and maximum induction upon coercive field of electrical steels," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, no. 18-19, pp. 2335-2339, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.03.034>
- [38] T. Tanaka *et al.*, "Fabrication of ultrathin Ni-Zn ferrite films using electron cyclotron resonance sputtering method," *Journal of applied physics*, vol. 99, no. 8, p. 3, 2006.
- [39] L. Wang *et al.*, "Effects of annealing temperature on structural and magnetic properties of Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe₂O₄ thin films," *Ceramics International*, vol. 40, no. 7, pp. 10323-10327, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.03.004>
- [40] D. Guo *et al.*, "Ni-Zn ferrite films with high resonance frequency in the gigahertz range deposited by magnetron sputtering at room temperature," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, no. 12, p. 125006, 2009. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/12/125006>
- [41] Y. Liu, Y. Li, H. Zhang, D. Chen, and C. Mu, "Structural and magnetic properties of NiZn-ferrite thin films prepared by radio frequency magnetron sputtering," *Journal of Applied Physics*, vol. 109, no. 7, p. 3, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3556775>
- [42] R. R. Kahmei, R. Sai, S. Arackal, S. Shivashankar, and N. Bhat, "Nanostructured Zn-substituted nickel ferrite thin films: CMOS-compatible deposition and excellent soft magnetic properties," *IEEE Magnetics Letters*, vol. 10, pp. 1-5, 2019. <https://doi.org/10.1109/LMAG.2019.2941427>
- [43] N. Gupta, A. Verma, S. C. Kashyap, and D. Dube, "Microstructural, dielectric and magnetic behavior of spin-deposited nanocrystalline nickel-zinc ferrite thin films for microwave applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 308, no. 1, pp. 137-142, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.05.015>

