

توصیف نظم نانوحفره‌ها در اکسید آلومینیم آندی با تکنیک پردازش تصویر

غلامحسین صدیقیان^{۱*}، محمدجواد عبدالمهی فرد^۱، مجتبی عبدالمهی^۱

۱- کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی برق، گروه الکترونیک

پیام‌نگار: Sodeifian@kashanu.ac.ir

چکیده

روشهای پردازش تصویر در سالهای اخیر در مسائل مختلف مهندسی شیمی برای ارزیابی و کمی‌سازی نتایج آزمایش‌های گوناگون به کار گرفته شده‌اند. از مهمترین کاربردهای پردازش تصویر می‌توان به پردازش اطلاعات در زمینه ساخت نانوسیم‌ها، غشاءها، کاتالیزورها اشاره کرد. در مقاله حاضر، پردازش تصویر در توصیف ترتیب نانوحفره‌ها و یافتن نواحی منظم در اکسید آلومینیم آندی ارائه شده است. این روش با گرفتن عکس الکترونی از حفره‌ها و یافتن مرکزهای آنها شروع می‌شود، سپس شش ضلعی‌هایی متشکل از هر حفره و شش همسایه آن را تعریف می‌کنیم. در مرحله بعد با توجه به ترتیب قرار گرفتن همسایه‌های هر نقطه، زاویه‌ای را به هر حفره تخصیص می‌دهیم و بر مبنای زاویه همسایه‌ها، حفره‌ها را به گونه‌ای به یک ناحیه اختصاص می‌دهیم که انحراف استاندارد زاویه‌های ناحیه از یک مقدار آستانه بیشتر نشود. از اندازه دامنه‌های به دست آمده در تصویر به عنوان معیاری برای کمی‌سازی میزان نظم در تصویر استفاده می‌کنیم. با استفاده از این تکنیک می‌توان زمان آندیزاسیون (آندی کردن) را برای ساخت نانوحفره‌های اکسید آلومینیم آندی بهینه نمود تا نواحی با حداکثر سطح منظم به دست آید. این روش در تشخیص دامنه‌های تصویر، نسبت به روش‌های قبلی، به مراتب نتایج بهتری به دست می‌دهد و از کارایی و بازدهی بالاتر و بهتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: اکسید آلومینیم آندی، درجه منظم، نانوساختار، پردازش تصویر

۱- مقدمه

فیلم آندی اکسید آلومینیم AAO^۱ که از اکسایش الکتروشیمیایی ورقه‌های آلومینیمی تولید می‌شود سال‌هاست که در جهان شناخته شده است [۱ و ۲]. آلومین دارای کاربردهای صنعتی متداولی خصوصاً در زمینه نانو تکنولوژی می‌باشد [۳ و ۴]. حفره‌های

آلومین به صورت خودمنظم^۲ در اسیدهایی مانند $H_2C_2O_4$ ، H_2SO_4 و H_3PO_4 به عنوان الکترولیت تشکیل می‌شوند [۵ و ۶]. محدوده پایداری زیاد، قابلیت کنترل توزیع حفره‌ها، ابعاد و نیز خصوصیات مثل چگالی در محدوده 10^9 تا 10^{11} حفره در سانتیمتر مربع و با قطری در حدود $(250-50)$ nm و ضخامت فیلمی بیشتر از $100 \mu m$ باعث گردیده تا در صنعت کاربردهای متنوع و زیادی پیدا

1. Anodic Aluminum Oxide

2. Self-Ordered

کند، آنها با استفاده از الگوریتم شش ضلعی به صورت تصادفی یک حفره را انتخاب کردند و تمام همسایه‌هایی که از فیلتر (صافی) تولرانس (میزان حساسیت و دقت) نظم، عبور می‌کرد را عضو آن ناحیه به شمار آوردند و هر جا که حفره‌های منظم تمام می‌شد ناحیه را خاتمه یافته تلقی کرده و ناحیه بعدی را شروع می‌کردند، اما این الگوریتم در عمل گاهی باعث اتصال دو ناحیه کاملاً مجزا به دلیل وجود یک حفره منظم در بین آنها می‌شود. با این همه، در این مقاله سعی می‌شود تکنیکی ارائه گردد که از کارایی و بازده بالاتر و بهتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار است.

۲- آندی کردن

آندی کردن روی ورقه‌های آلومینیم ($1/2\text{mm} \times 60\text{mm} \times 20\text{mm}$) با خلوص ۹۹/۹۹ درصد در اسیدهای مختلفی مانند اسید اگزالیک و اسید سولفوریک انجام می‌شود. کثیفی سطح و ناخالصی‌ها تأثیرات نامناسبی بر روی آلومین تولیدی خواهند داشت. ابتدا ورقه آلومینیم را در استون به مدت شش ساعت قرار می‌دهند، سپس به مدت ۱۸۰S تحت شرایط فراصوتی قرار می‌دهند تا رسوبات کاملاً جدا شوند. بعد از آن صیقل‌زنی الکترونی^۵ تحت شرایط ثابت (100mA/cm^2) به مدت ۳ دقیقه در مخلوط اسید پرکلریک ۶۰٪ و اتانول به نسبت ۱ به ۴ در دمایی حدود 3°C تا کمتر از 20°C انجام می‌شود، در شکل (۱) طرح اجمالی دستگاه آندی کردن آلومینیم نشان داده شده است. تغییر و تحول سطح آلومینیم به وسیله تصاویر^۶ SEM نشان داده می‌شود.

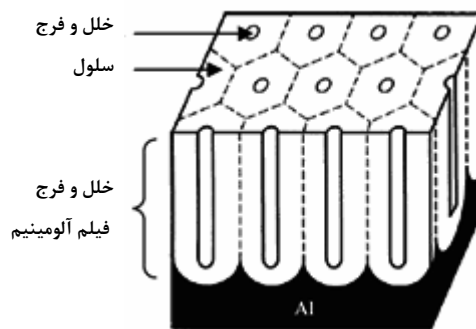
بعد از عملیات صیقل‌زنی، ورقه آلومینیم تحت ولتاژ DC با اختلاف پتانسیل‌های مختلف از ۲۰۷ تا ۸۰۷ تحت عملیات آندی کردن در الکترولیت اسیدسولفوریک با غلظت ۰/۳M انجام می‌شود، فاصله دو الکتروود ۱۰mm است. در مدت آندی کردن حفره‌ها بر روی سطح آلومینیم تشکیل می‌شوند. با ادامه فرایند، حفره‌ها به فرم منظمی درمی‌آیند اما با گذر از زمان بهینه چینش حفره‌ها و قطر آنها دوباره به فرم نامنظمی درمی‌آید بنابراین باید معیاری برای یافتن میزان نظم و ناحیه‌های منظم داشته باشیم تا در زمان مناسب عملیات را قطع کنیم.

کند [۷و۸]. توزیع قطر حفره‌ها تابعی از آرایش فیلم آندی اکسید آلومینیم است، به نحوی که فیلم AAO در اسید الکترولیتی رشد و نمو می‌کند و حفره‌هایی با ساختار شش ضلعی ایجاد می‌شود [۹و۱۰]. این خواص ساختاری و بی‌همتا و همچنین پایداری حرارتی و شیمیایی فیلم AAO باعث می‌شود که قالب مناسبی برای ساخت ترکیبات منظم در مقیاس نانو باشد. بنابراین با پرکردن حفره‌های قالب AAO می‌توانیم نانولوله‌ها و نانوسیم‌های یکنواختی تولید کنیم که دارای قطر و طول یکسانی باشند [۱۳-۱۱]. در سال‌های اخیر با هدف به دست آوردن قالب‌های AAO با ساختارهای شبکه‌ای منظم، تحقیقات منسجم و دقیقی صورت گرفته است، تا به حال روش‌های مختلفی در این زمینه توسعه داده شده است که از آن جمله می‌توان به کنگره‌بندی^۱ سطح آلومینیم [۱۴]، فناوری یونی متمرکز^۲ [۱۵] و فرایند دو مرحله‌ای آندی کردن [۱۶] اشاره کرد. هدف فرایندهای فوق، منقوش کردن سطح آلومینیم با الگوی اولیه مناسب برای رشد حفره‌های ایجاد شده در آلومینیم است. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی ریخت (فرم) سطح آلومینیم فاکتور اساسی برای به دست آوردن لایه‌های منظم AAO می‌باشد [۱۷-۱۸]. قبلاً تنها با استفاده از آنالیز چشمی، تصاویر مورد ارزیابی قرار می‌گرفتند، بعدها با استفاده از سری فوریه تخمینی از متوسط اندازه نواحی به دست می‌آمد اما در واقع در این روش‌ها به ساختار و موقعیت نواحی اهمیتی داده نمی‌شد که باعث ایجاد خطای زیادی در نتایج می‌شد و حتی گاهی به نتایج متناقض منجر می‌گردید. در سالهای اخیر الگوریتم‌های نسبتاً بهتری برای توصیف نظم حفره‌ها ارائه شده است. ماتفی تمفیل^۳ و همکارانش [۱۹] از الگوریتم نسبتاً ساده‌ای برای توصیف نظم بهره بردند آنها تمام حفره‌های سطح را گوشه‌های مثلث در نظر گرفتند و به این طریق تمام سطح را با مثلث‌هایی پوشاندند، سپس متوسط زاویه‌های مثلث‌ها و متوسط اضلاع را به دست آوردند و در نهایت با توجه به انحراف از حالت ایده‌آل (60°) تصویر را به دو قسمت منظم و نامنظم ناحیه‌بندی کردند. هیلبراند^۴ و همکارانش [۲۰] از الگوریتم بهتری استفاده کردند و هر حفره را با ۶ همسایه اطرافش در نظر گرفتند و توانستند کل تصویر را با کد رنگی ناحیه‌بندی

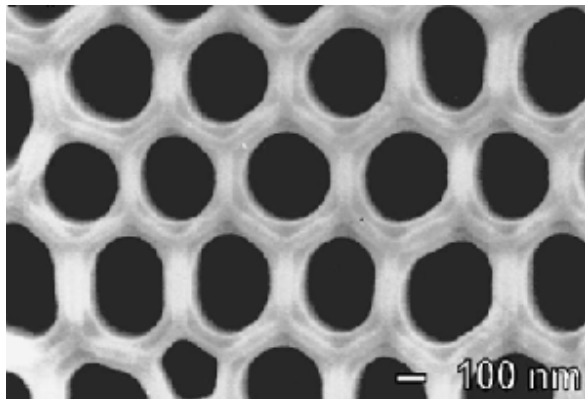
1. Nano-Indentation
2. Focused Ion Beam
3. Matefi-Tempfli
4. Hillebrand

5. Electropolishing
6. Scanning Electron Microscopy

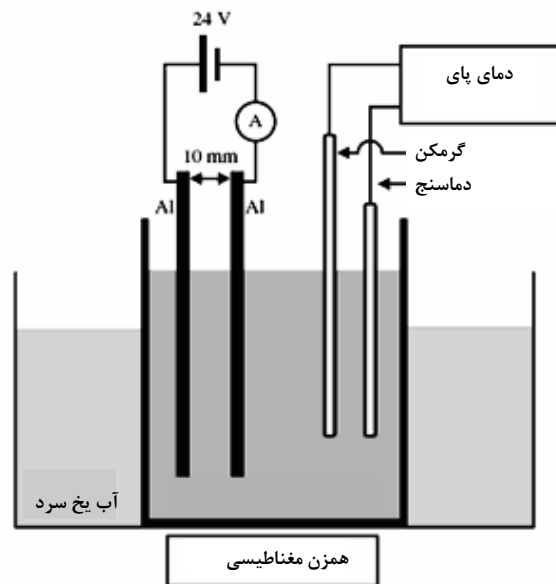
کامل ۰ تا ۲۵۵ رنگ توسعه دهیم تا تمام تصاویر دارای وضوح و هیستوگرام یکنواختی باشند. این عمل را با استفاده از الگوریتم هموارسازی هیستوگرام^۴ انجام می‌دهیم. شکل ((۲))-(الف)) نمایشی از SEM آلومینا آندی شده در الکترولیت اسیدسولفوریک ۰.۳M در دمای ۲۵ °C بعد از ۱ ساعت و شکل ((۲))-(ب)) نتیجه اعمال الگوریتم هموارسازی بر روی همان SEM آلومین می‌باشد.



(الف)

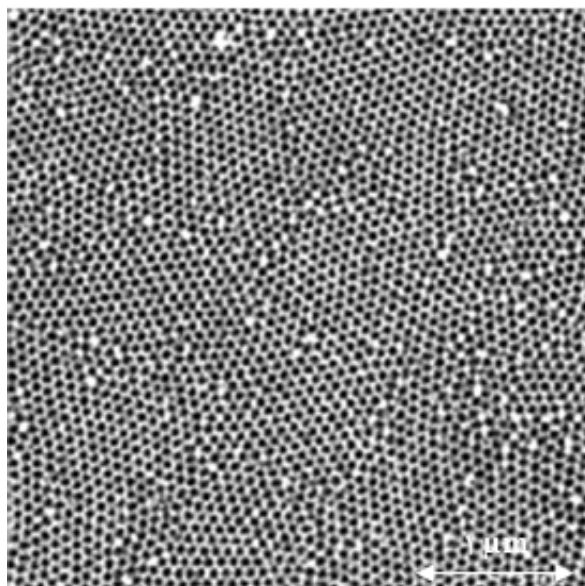


(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) طرح اجمالی حفره‌های آلومین، (ب) طرح اجمالی دستگاه آندی کردن [۹]



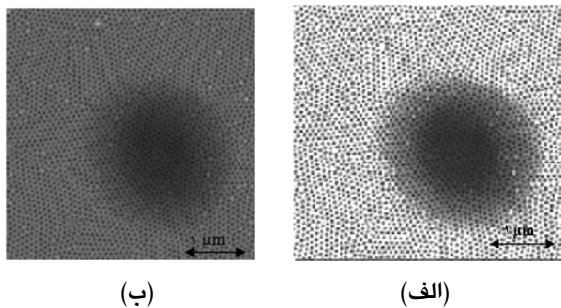
(ب)

شکل ۲- (الف) تصویر SEM اکسید آندی آلومینیم آندی شده در اسید سولفوریک ۰.۳M در ۲۵ °C بعد از ۱ ساعت [۲۱].
(ب) نتیجه اعمال الگوریتم هموارسازی

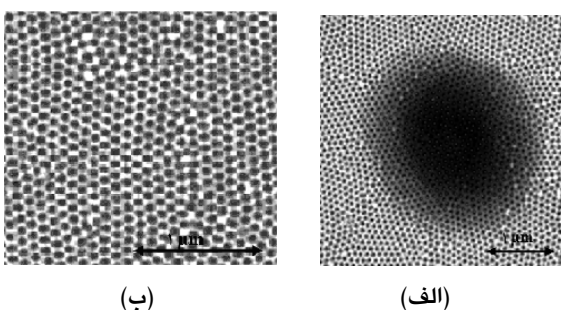
گاهی ممکن است تصاویری داشته باشیم که به دلیل وجود خطای

4. Histogram Equalization

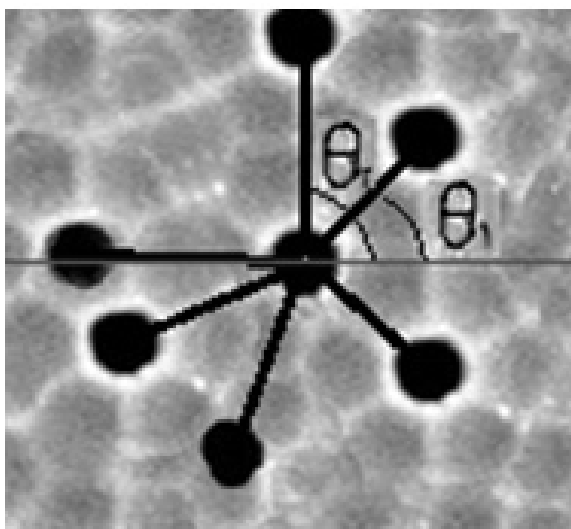
1. Gray Scale
2. Binary
3. Threshold



شکل ۳- تصویر SEM آلومین: (الف) تصویر اولیه حفره‌های آلومین که سایه دارد، (ب) تصویر فیلتر شده



شکل ۴- (الف) سطح انتخاب شده حفره‌های آلومین در تصویر بزرگنمایی شده، (ب) مرکز پرزهای آلومین که با رنگ قرمز مش زده شده است



شکل ۵- حفره مرکزی با شش همسایه آن در حالت ایده آل $\theta_{ik} = 60^\circ$

عکس برداری کیفیت مطلوبی نداشته باشند و یا ممکن است مانند تصویر (۲- الف) روی قسمتی از تصویر سایه‌ای افتاده باشد در این موارد ما از تکنیک آستانه‌گذاری^۱ تطبیقی استفاده کردیم تا با الگوریتمی که در زیر پیشنهاد کردیم کیفیت تصویر را به حد مطلوب برسانیم.

$$BW(x, y) = \begin{cases} 1 & I(x, y) > 0.8J(x, y) \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

J- تصویر فیلتر شده با یک پنجره تمام یک (Y×Y) و I تصویر اولیه است. نقاط دارای مقدار یک متعلق به حفره‌ها و نقاط دارای مقدار صفر جزء پس‌زمینه‌ها هستند.

در گام بعدی باید مرکز حفره‌ها را به دست آوریم. شکل (۴- الف)) بزرگنمایی قسمتی از سطح است. حفره‌هایی که با استفاده از الگوریتم فوق مشخص شده‌اند با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند و سپس مرکز ثقل تمامی حفره‌ها را مشخص می‌کنیم که در شکل (۴- ب)) با نقاط قرمز مشخص شده‌اند.

۴- نقاط منظم و نامنظم

تفکیک میان نقاط منظم و نامنظم بر مبنای آرایش همسایه‌های هر نقطه صورت می‌گیرد. برای تعریف همسایگی میان پیکسل‌ها از روش سه گوشه‌سازی دیلانی^۲ استفاده کردیم. حفره‌هایی که در این روش با یک خط به هم متصل می‌شوند همسایه هستند. انتظار می‌رود بر این مبنا ۶ نقطه حول هر نقطه قرار گیرد، بنابراین نقاطی را که دارای همسایه کمتر یا بیشتر هستند را نامنظم تعریف کردیم. ما V_{ik} را به عنوان برداری که از مرکز P_i تا هر همسایه n_{ik} رسم شود تعریف کردیم که n_{ik} به عنوان همسایه K ام P_i و θ_{ik} به عنوان زاویه میان V_{ik} و افق می‌باشد. بنابراین برای ۶ همسایه مقدار θ_{ik} محاسبه می‌شود سپس زوایا از کم به زیاد مرتب می‌شوند بنابراین مقدار $d\theta_{ik}$ تغییرات هر زاویه تا زاویه بعدی است. در حالت ایده آل، منظم بودن به شکلی اطلاق می‌شود که $d\theta_{ik} = 60^\circ$ باشد (شکل (۵))، اما در اینجا ما $\max\{d\theta_{ik}\} < 85^\circ$ و $\min\{d\theta_{ik}\} > 30^\circ$ را هم به عنوان منظم شناختیم.

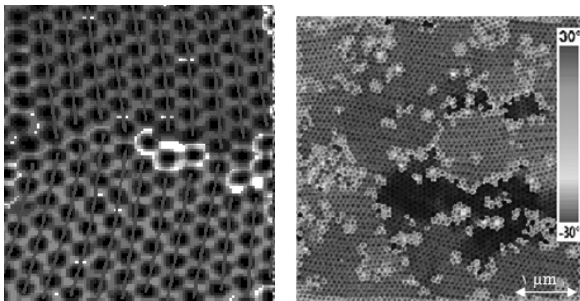
1. Adaptive Thresholding
2. Delaunay Triangulation

برای مثال:

$$\begin{cases} \text{mean}(\{\phi_i^l, \phi_i^u - 60\}) = \text{mean}(\{1, 3, 5, -2, -8, -5\}) = -1 \\ \text{mean}(\{\phi_i^l + 60, \phi_i^u\}) = \text{mean}(\{61, 63, 65, 58, 52, 55\}) = 59 \end{cases}$$

۶- ناحیه‌بندی

با توجه به روش فوق برای هر حفره p_i ، زاویه φ_i را محاسبه کردیم. حال تمام حفره‌ها را از 0° تا 60° یا به دلیل چرخشی بودن اشکال از -30° تا $+30^\circ$ کدبندی کردیم. اما نکته مهم در ناحیه‌بندی، یافتن مرز ناحیه‌هاست. در شکل (۷) تفاوت در زاویه‌ها و جهت‌گیری حفره‌ها نسبت به هم کاملاً روشن است. رنگ آبی، شش ضلعی‌هایی را نمایش می‌دهد که زاویه $+30^\circ$ و یا -30° دارند. پیوستگی رنگ‌ها به معنای چرخشی بودن شش ضلعی‌هاست. رنگ سفید حفره‌های نامنظم را مشخص می‌کند.



(ب)

(الف)

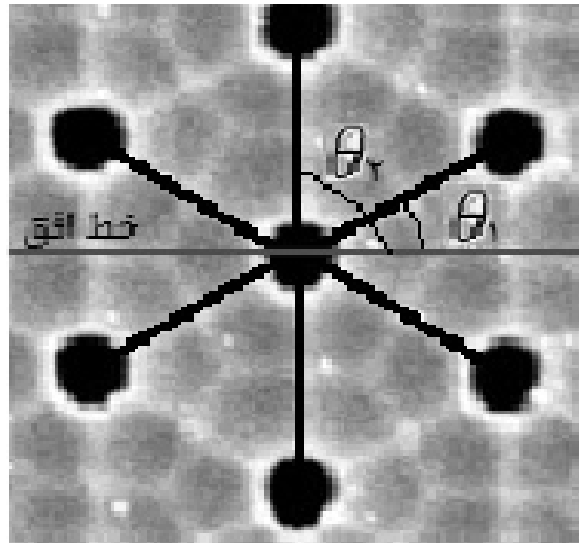
شکل ۷- (الف) ناحیه سفیدرنگ به‌عنوان ناحیه نامنظم و

رنگ‌های آبی و خاکستری هرکدام یک ناحیه به‌شمار می‌آیند،

(ب) کد رنگی از آبی تا قرمز و بازگشت به آبی که نمایانگر

چرخشی بودن جهت‌گیری حفره‌هاست.

ما ابتدا ناحیه نامنظم را از نامنظم جدا می‌کنیم و سپس در ناحیه نامنظم یک حفره انتخاب نموده و به آن و تمام شش ضلعی‌های منظم اطراف آن که معیار انحراف استاندارد زاویه آنها کمتر از 10° است یک رنگ اختصاص داده، سپس حفره دیگری انتخاب می‌کنیم و به این ترتیب، تمام همسایه‌هایی را که از صافی انحراف استاندارد عبور کردند با یک ناحیه مش می‌زنیم، سپس یکی دیگر از پرزهای باقیمانده را انتخاب کرده، عملیات فوق را تکرار



شکل ۶- حفره مرکزی با شش همسایه آن در حالت نامنظم

۵- جهت‌گیری

درگام بعدی برای ناحیه‌بندی کل تصویر به هر حفره نسبت به حفره‌های همسایه، زاویه φ_i را اختصاص می‌دهیم، در نتیجه تمام حفره‌های منظم را با الگوریتم خاص وارد ناحیه‌بندی می‌کنیم.

$$\varphi_i = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 \varphi_{ik}$$

$$\varphi_{ik} = \text{mod}(\theta_{ik}, 60^\circ)$$

φ_{ik} باقیمانده تقسیم مقدار هر زاویه به 60° به ازای $k=1,2,\dots,6$ می‌باشد. اما این نوع تقسیم‌بندی یک مشکل خاص نیز دارد برای مثال اگر $\varphi_{ik} = \{1,3,5,58,52,55\}$ باشد، φ_i مساوی ۲۹ می‌شود اما به روشنی مشخص است که φ_i باید صفر درجه شود زیرا 58° همان 2° درجه است، برای حل این مشکل φ_i را به دو قسمت تقسیم می‌کنیم $\{\varphi_{ik}, \varphi_{ik} < 60^\circ\}$ و $\{\varphi_{ik}, \varphi_{ik} \geq 30^\circ\}$ اگر متوسط $\varphi_i^u = \{\varphi_{ik}, \varphi_{ik} \geq 30^\circ\}$ منهای متوسط $\varphi_i^l = \{\varphi_{ik}, \varphi_{ik} < 60^\circ\}$ بزرگتر از 30° باشد این وضعیت را به‌عنوان حالت مشکل‌دار شناخته و وارد الگوریتم زیر می‌کنیم:

$$\varphi_i = \begin{cases} \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 \varphi_{ik} & \text{برای وضعیت غیر مشکل‌دار} \\ \begin{cases} \text{mean}(\{\phi_i^l, \phi_i^u - 60\}) & \text{if } 0 \leq \text{mean}(\{\phi_i^l, \phi_i^u - 60\}) < 60 \\ \text{mean}(\{\phi_i^l + 60, \phi_i^u\}) & \text{if } 0 \leq \text{mean}(\{\phi_i^l + 60, \phi_i^u\}) < 60 \end{cases} & \text{برای وضعیت مشکل‌دار} \end{cases}$$

$$\alpha_{i\text{ mean}} = \frac{\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3}}{3}$$

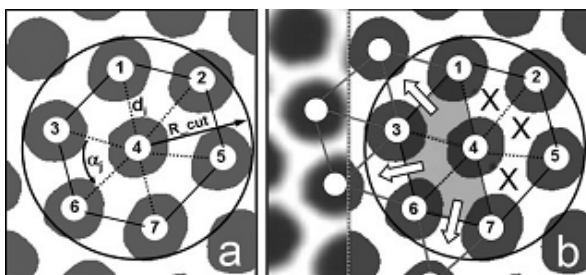
با توجه به اینکه در شش ضلعی ایده‌آل متوسط زاویه‌ها برابر 60° است، آنها انحراف معیار را به صورت زیر محاسبه کردند:

انحراف استاندارد

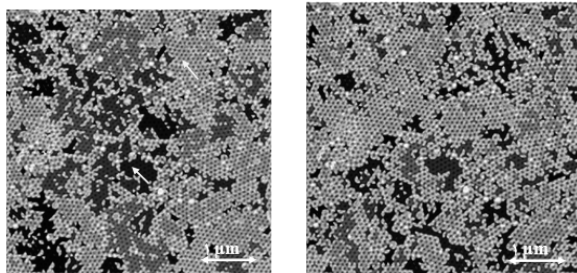
$$= 100 \times \frac{\sqrt{[(\alpha_{\text{mean}} - \alpha_{i1})^2 + (\alpha_{\text{mean}} - \alpha_{i2})^2 + (\alpha_{\text{mean}} - \alpha_{i3})^2] / 3}}{\alpha_{\text{mean}}}$$

به این ترتیب هر مثلثی را که انحراف آن از مقدار مشخص تولرانس کمتر باشد به عنوان منظم در نظر می‌گیرند.

هیلبرانند فرض کرد که تمام مثلث‌های یک ناحیه باید منظم باشند. به عبارتی ناحیه را یک مجموعه مثلث منظم به هم پیوسته، تعریف کردند. با شروع از یک مثلث منظم، مثلث‌های منظم مجاور را به آن چسبانده و ناحیه را گسترش دادند تا جایی که دیگر مثلث منظمی در همسایگی مرزهای ناحیه پیدا نشود. سپس ناحیه بعدی را از یک مثلث منظم دیگر خارج از مجموعه مثلث‌های قبلی شروع کردند و به همین ترتیب ادامه دادند. در واقع فرض کردند که حفره‌های نامنظم یک مرز ایجاد می‌کنند.



شکل ۹- تقسیم‌بندی شش ضلعی به شش مثلث بر مبنای کار هیلبرانند و همکاران [۲۰]



(ب)

(الف)

شکل ۱۰- ناحیه‌بندی SEM شکل شش بر مبنای کار هیلبرانند و همکارانش، (الف) با انحراف استاندارد کمتر از ۸، (ب) با انحراف استاندارد کمتر از ۱۰

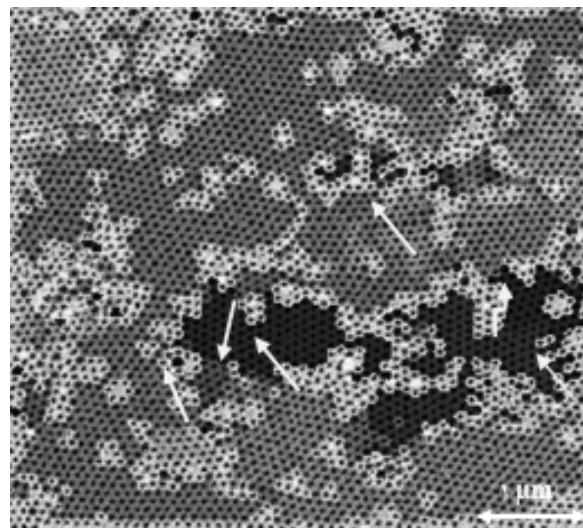
$$\text{انحراف استاندارد} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \eta)^2}$$

N: تعداد کل حفره‌های منظم

θ_i : زاویه حفره

η : متوسط زاویه کل ناحیه

در شکل (۸) الگوریتم فوق اعمال شده است و کل سطح منظم را به این ترتیب ناحیه‌بندی کردیم. به این ترتیب حتی اگر نرخ چرخش کم هم باشد باز الگوریتم ما قادر به تشخیص گذر از یک ناحیه به ناحیه بعدی خواهد بود. همان‌طور که مشخص است الگوریتم ما به هیچ پارامتری وابستگی مستقیم ندارد.



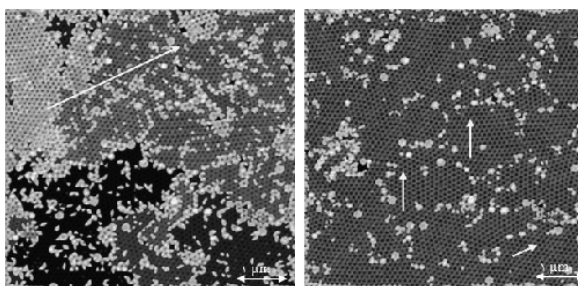
شکل ۸- ناحیه‌بندی روی SEM آلومین تولید شده در اسید اگزالیک ۰/۳M در دمای 25°C با ولتاژ ۶۰V

۷- مقایسه با مدل‌های مشابه

ماتفی و همکارانش [۱۹] شبکه‌بندی را بر مبنای فاصله و زاویه‌های مراکز هر حفره از حفره‌های اطرافش انجام دادند اما هیلبرانند و همکارانش [۲۰] ناحیه‌بندی را بر مبنای مرزهایی که با معیار بی‌نظمی تعیین می‌شوند انجام دادند. تصویر SEM ابتدا به یک سری مثلث تقسیم شده و متوسط فاصله زاویه‌های هر مثلث را محاسبه کردند:

مراجع

- [1] Wehrspohn R.B "Ordered Porous Nanostructures and Applications Structural features of oxide coatings on aluminum", 1st ed., New York, USA, p. 218 (2005). J. Electrochem. Soc. 100, 411-415, (1953).
- [2] O'Sullivan J.P, Wood G.C, Contain A., Pap. Math. Phys. Character, "The Morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminum", 317, 511, (1970).
- [3] Lohrengel M.M., "Thin anodic oxide layers on aluminum and other valve metals: High field regime", Materials Science and Engineering 11,243-294, (1993).
- [4] Schmid G., Mater J., "Materials in nanopores alumina", Materials Chemistry 12,1231-1238, (2002)
- [5] Zhang Li.F., Metzger L., "On the growth of highly ordered pores in anodized aluminum oxide", Chem. Mater 10, 2470-2480, (1998)
- [6] Masuda H., Hasegawa F., Ono S., "Self-Ordering of cell Arrangement of anodic porous alumina formed in sulfuric acid solution". J. Electrochem. Soc. 144, L127-L130, (1997)
- [7] Li J., Papadopoulos C., Xu M.J., Moskovits M., "Highly-ordered carbon nanotube arrays for electronics applications", Applied Physics Letters 75, 367-369, (1999)
- [8] Mallet J., Yu-Zhang K., Matefi-Tempfli S., Matefi-Tempfli M., Piraux L., "Electrodeposited L10 CoxPt1-x nanowires", Applied Physics 38, 909-914, (2005).
- [9] Wang Z., Chen M., Li H.L. Mater., "Preparation and characterization of uniform polyaniline nano-fibrils using the anodic aluminum oxide template", Materials Science and Engineering 328,33-38, (2002).
- [10] Zhao Y.C., Chen M., Liu W.M., Liu X., Xue Q.J., "Preparation and self-lubrication treatment of ordered porous anodic alumina film", Materials Chemistry and Physics 82,370-374, (2003).
- [11] Martin C.R., "A membrane-based synthetic approach", Science 266,1961-1966, (1994).
- [12] Xu J., Zhang X., Chen F., Li T., Yu L., Tao X., Wang Y., Wu X., "Preparation and modification of well-aligned CNTs grown on AAO template", Applied Surface Science 239, 320-326, (2005).
- [13] Wang C.W., Wang Z., Li M.K., Li H.L., "Well-aligned polyanilineno-fibril array membrane and its field emission property", Chemical Physics Letters 341:431-434, (2001).
- [14] Masuda H., Yamada H., Satoh M., Asoh H., "Highly ordered nanochannel-array architecture in anodic alumina", Applied Physics Letters 71, 2770-2772, (1997).
- [15] Liu N.W., Datta A., Liu C.Y., Wang L., "High-speed focused-ion-beam patterning for guiding the growth of anodic alumina nanochannel arrays", Applied Physics Letters 82:1281-1283, (2003).



(ب) (الف)

شکل ۱۱- ناحیه بندی SEM شکل شش بر مبنای کار هیلبراند و همکارانش، (الف) با انحراف استاندارد کمتر از ۱۲، (ب) با انحراف استاندارد کمتر از ۲۰

اما اگر به دقت به شکل (۱۰) و (۱۱) توجه کنید درمی یابید که این فرض فقط در شکل هایی درست است که مرز پیوسته (حفره های نامنظم پیوسته) داریم که ممکن است هیچ زمان اینگونه نباشد.

۸- نتیجه گیری

در الگوریتمی که ماتفی و همکارانش ارائه کرده اند اگر تنها یک حفره بین دو ناحیه که کاملاً جهت بندی مختلفی دارند منظم باشد هر دو ناحیه را به هم وصل کرده و خطای زیادی ایجاد می کنند، در نتیجه با این تصور که در حال تولید ناحیه بزرگی هستیم آندی کردن را ادامه می دهیم اما در واقع هزینه اضافی متحمل می شویم و یا گاهی به حداکثر سطح ناحیه بندی نمی رسیم. در واقع روش هیلبراند نسبت به تولرانس بسیار حساس است تغییرات کم تولرانس باعث افزایش نقاط نامنظم می شود که شکل های فوق این موضوع را تأیید می کنند، اما روشی که ما پیشنهاد کردیم صرفاً با استفاده از مرزها ساخته نمی شوند و به جهت گیری خود شش ضلعی ها نیز بستگی دارند همان طور که دیده شد ما صرفاً از مرزهای موجود در سطح که مجموعه ای از حفرات نامنظم هستند استفاده نکردیم بنابراین زمانی را که ناحیه منظم ادامه دارد ولی وارد جهت بندی جدیدی شده ایم، مطابق شکل (۸) الگوریتم ما تشخیص می دهد و در نتیجه ناحیه های منظم با سطح بالایی را به دست می آوریم. در نهایت می توان با پیش بینی زمانی که ناحیه های منظمی در سطح آومین تشکیل شده است میزان انرژی مورد نیاز را بهینه نمود و از تلف شدن انرژی اضافی جلوگیری کرد.

- [16] Masuda H., Fukuda K., "Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina", *Science* 268:1466-1468, (1995).
- [17] Bocchetta P., Sunseri C., Masi R., Piazza S., Di-Quarto F., "Influence of initial treatments of aluminium on the morphological features of electrochemically formed alumina membranes" *Materials Science and Engineering* 23:1021-1026, (2003).
- [18] Wu M T., Leu I C., Hon M.H., Vac J., "Effect of polishing pretreatment on the fabrication of ordered nanopore arrays on aluminum foils by anodization", *Vacuum Science and Technology* 20:776-782,(2002).
- [19] Matefi-Tempfli M., Matefi-Tempfli S., Piraux L., "Characterization of nanopores ordering in Anodic alumina", *Thin Solid Films* 516,3735–3740, (2008).
- [20] Hillebrand R., Muller F., Schwirn K., Lee W., and Steinhart M., "Quantitative Analysis of the Grain Morphology in Self-Assembled Hexagonal", *Lattices ACS NANO* 2:913–920, (2008).
- [21] Muller F., Birner A., Nielsch K., Gosele U., "Hexagonal pore arrays with a 50–420 nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina", *APPLIED PHYSICS* 84:6023–6026, (1998).