

## شبیه‌سازی اثرات نوع آرایش و چگالی جریان در رشد سیلیکان متخلخل به روش اصلاح شده انبوهش پخش محدود

سکینه مینائی فرد و رضا ثابت داریانی

گروه فیزیک، دانشگاه الزهراء(س)

(دریافت مقاله: ۸۶/۸/۱۷ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۱۰/۳۰)

### چکیده

هدف از این مقاله وارد کردن اصلاحاتی به مدل انبوهش پخش محدود می‌باشد که بتواند اثرات نوع آرایش و چگالی جریان را در شکل ساختارهای به‌دست آمده طی رشد سیلیکان متخلخل شبیه‌سازی کند. برای تأثیر نوع آرایش، ضریب چسبندگی و برای تأثیر چگالی جریان، پارامتر میدان متوسط را به مدل انبوهش پخش محدود اعمال کردیم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پارامتر ضریب چسبندگی در کنترل ضخامت خلل مؤثر است در حالی که پارامتر میدان متوسط ویژگی درختی یا میله‌ای بودن خلل را کنترل می‌کند. نتایج آن بر روی شبیه‌سازی رشد سیلیکان متخلخل، نشان داد اصلاحات اعمال شده با تأثیر این دو پارامتر در شکل ساختارهای شبیه‌سازی شده با نتایج نمونه‌های تجربی به‌دست آمده توافق و سازگاری دارند.

واژه‌های کلیدی: سیلیکان متخلخل، انبوهش پخش محدود، شبیه‌سازی، ضریب چسبندگی، میدان متوسط

### ۱. مقدمه

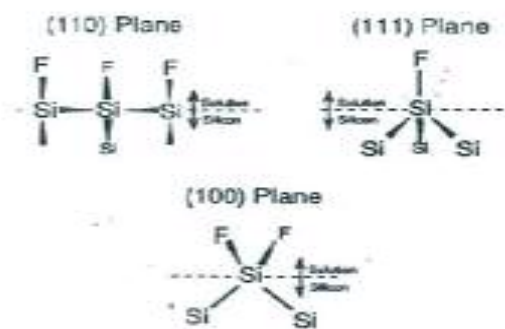
سیلیکان با عدد اتمی ۱۴ که در گروه چهارم جدول تناوبی قرار دارد و دارای انرژی گاف کوچک  $1/12\text{eV}$  در دمای اتاق و غیر مستقیم است؛ یکی از اصلی‌ترین مواد در کاربردهای الکترونیکی می‌باشد و نیمه رسانای دیگری وجود ندارد که بتواند با این شرایط جایگزین آن شود. با این وجود، این عنصر به دلیل غیر مستقیم بودن گاف انرژی دارای خواص ضعیف اپتیکی است و جایگاهی در کاربردهای اپتیکی ندارد. اما روشهایی برای رسیدن به بازترکیب بین نواری همراه تابش مرئی در سیلیکان وجود دارد که یکی از این روشها آندیزاسیون الکتروشیمیایی ویفر سیلیکان و ایجاد تخلخلهای نانومتری در آن است. به این ترتیب ساختار سیلیکان به‌حدی کوچک می‌گردد که اثرات کوانتومی در ساختار نواری آن به‌دست می‌آید.

به این ساختار متخلخل به‌وجود آمده، سیلیکان متخلخل<sup>۱</sup> گویند [۱].

به این ترتیب طی یک فرایند خوردگی، حفره‌هایی استوانه‌ای در ویفر سیلیکان به‌وجود آمده و ستونهایی از سیلیکان با قطر در حد نانومتر برجای می‌مانند. این ساختار دارای خواص متفاوت از توده سیلیکان است [۲]. خواص الکترونی و ساختاری سیلیکان متخلخل ارتباط مستقیم با شرایط آندیزاسیون دارد. این شرایط عبارتند از: چگالی جریان، غلظت الکترولیت، زمان خوردگی، حضور یا عدم حضور نور در حین خوردگی، نوع آرایش و مقاومت ویژه سیلیکان [۳].

نکته قابل توجه در مورد این خلل به‌وجود آمده در ویفر سیلیکان عبارت از این است که شکل این خلل با جهت‌های

## Surface Bond Orientations



شکل ۱. جهت پیوند برای ۳ تا از صفحات بلوری که عبارتند از: (۱۰۰) و (۱۱۰) و (۱۱۱) [۲]

در توجیه مکانیزم شکل‌گیری سیلیکان متخلخل پیشنهادات و مدل‌های متفاوتی مطرح شده است. یکی از این مدل‌ها که توسط اسمیت و همکارانش [۲] در توجیه این مطلب ارائه شد، مدل پخش محدود است. در این مدل که شکل‌گیری خلل براساس پخش گونه‌های فعال الکتریکی مثل الکترون و حفره در سطح سیلیکان توجیه شده از ولگشت در توجیه شکل‌گیری سیلیکان متخلخل استفاده شده است.

## ۲.۲. ساختارهای فراکتالی و مدل‌های رشد آماری (انبوهشی)

به‌طور کلی پروسه‌های پخش محدود به دلیل طبیعت غیر تعادلی باعث به‌وجود آمدن اشیاء مرکب و شاخه‌ای می‌شوند که به این ساختارها انبوه<sup>۵</sup> با خواص فراکتالی گفته می‌شود [۵]. فراکتالها اشکال پیچیده هندسی هستند که از به‌هم پیوستن بی‌نهایت ذره کوچک و یکسان تشکیل شده‌اند و به‌شدت پاره‌پاره و بی‌قاعده بوده و نمی‌توان آنها را در قالب هندسه اقلیدسی بررسی کرد. این ساختارها به‌وسیله خواصشان از جمله بعد، تعریف می‌شوند. لازم به تذکر است این ساختارها دارای ابعاد کسری و غیر صحیح هستند.

یک کلاس مهم از پدیده‌ها که طی آن این ساختارهای فراکتالی تولید می‌شوند، انبوهش ذرات مشابه یا فرایندهای

بلورشناسی رابطه دارد. چانگ در سال ۱۹۸۸ به‌وسیله عکس‌برداری عرضی<sup>۱</sup> و همچنین پراش الکترون نشان داد که هم در سیلیکان نوع n و هم در سیلیکان نوع p شکل‌گیری خلل فقط در جهت صفحات <۱۰۰> به شکل درختی و شاخه شاخه دارد. یعنی کانالهایی که در اثر خوردگی به‌وجود می‌آیند در جهت این صفحات شکل درختی و شاخه شاخه به‌خود می‌گیرند و این ساختار را در جهات دیگر بلورشناسی نمی‌توانیم ببینیم [۴].

مهمترین دلیل رشد شاخه‌ها در جهت صفحات <۱۰۰> جهت‌گیری پیوندهای سطحی در این صفحات است. به‌عبارتی تنها در صفحه (۱۰۰) سیلیکان با دو پیوند متقارن در سطحی که در معرض خوردگی است، ظاهر می‌شود و هر دو پیوند در خوردگی شرکت می‌کنند و این موضوع باعث پیشرفت خوردگی در طول صفحه (۱۰۰) می‌شود (شکل ۱) [۲].

در این تحقیق سعی شده توسط یکی از مدل‌های رشد آماری به نام انبوهش پخش محدود<sup>۲</sup> (DLA) نحوه رشد ساختار درختی سیلیکان متخلخل را شبیه‌سازی نموده و با تغییر در پارامتر طول پخش و اعمال اصلاحاتی در مدل رشد از جمله وارد کردن پارامتر ضریب چسبندگی<sup>۳</sup> و پارامتر میدان متوسط<sup>۴</sup>، تغییر شکل ساختار درختی در اثر تغییر نوع آرایش و تغییر چگالی جریان را مدل سازی کنیم.

## ۲. نظریه

### ۱.۲. پدیده پخش

چنانچه سیستمی چند ذره‌ای در اثر اعمال اختلالهایی از حالت تعادل خارج شود ولی این انحرافها با اختلال وارده رابطه خطی داشته باشد، گفته می‌شود سیستم نزدیک به تعادل است. پدیده پخش یکی از پدیده‌های نزدیک به تعادل است که در توجیه بسیاری از پدیده‌هایی که در سیستمهای چند ذره‌ای رخ می‌دهد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

۱. TEM

۲. Diffusion Limited Aggregation

۳. Sticking coefficient

۴. Mean-field parameter

۵. Aggregate

ذرات یکسان ساختار شاخه‌ای به دست می‌دهد و از آنجایی که هدف ما در این تحقیق شبیه‌سازی ساختار درختی به وجود آمده در سیلیکان متخلخل است، از این مدل استفاده کرده‌ایم. مدل رشد DLA جزء مدل‌های غیر جایگزیده است و کمیات کنترل کننده این مدل در هر نقطه از فضا از تمام نقاط سیستم (دور و نزدیک) اثر می‌پذیرد [۷].

مراحل رشد در این مدل به این شکل است: ابتدا ذره اولیه در یک نقطه از شبکه گذارده می‌شود. ذره دیگری از دور رها می‌شود که اجازه دارد به صورت تصادفی روی نقاط شبکه گام زده تا به یکی از اولین همسایه‌های ذره اولیه برسد. این ذره در این نقطه متوقف شده و دیگر از این نقطه جدا نمی‌شود و در ضمن ذره دیگری هم نمی‌تواند به این نقطه وارد شود. به همین ترتیب ذرات بعدی از دور رها می‌شوند و همین سیر را طی می‌کنند، تا بالاخره خوشه‌های بزرگی به این روش ساخته می‌شوند. اما باید توجه کرد در ولگشت ذره متحرک تا متصل شدن آن به خوشه در حال رشد نقش اصلی را توزیع احتمال، که کمیتی غیر جایگزیده است، ایفا می‌کند [۸].

این مدل اولین بار توسط ویتن و ساندر [۷] در سال ۱۹۸۱ ارائه شد و از آن در نشان دادن پدیده‌های گوناگونی مثل شکست دی الکتریک [۹]، انبوهش کلئیدی [۱۰]، مواد متخلخل [۱۱]، بسیاری از پروسه‌هایی که رشد دانه‌ای دارند [۱۲ و ۱۳]، و موارد دیگر استفاده شده است.

#### ۴.۲ معادله حرکت

در این مدل، احتمال اینکه یک نقطه لبه‌ای<sup>۲</sup> واقع در محل  $\vec{x}$  توسط یک ذره که در گام  $n$ م از ولگشت اشغال شود، گرادیان کمیت  $u(\vec{x}, k)$  است. بنابراین  $u(\vec{x}, k)$  احتمال قرارگرفتن ذره متحرک در گام  $k$ م در مکان  $\vec{x}$  است (در هنگردی<sup>۳</sup> از ولگشتهایی با  $n$  گام).

احتمال  $u(\vec{x}, k)$  متناسب با تعداد ولگشتهایی است که بعد از  $k$  گام به مکان  $\vec{x}$  منتهی می‌شوند  $(Zk(x))$ .

انبوهشی هستند. فرایندهای انبوهشی از جمله پدیده‌های دور از تعادل در فیزیک آماری می‌باشند [۶]. انبوهش زمانی رخ می‌دهد که ذره‌های یکسان، مطابق قاعده معینی به هم پیوسته و ساختاری را تشکیل دهند. این فرایندها دارای رفتاری متنوع در فضا و زمان می‌باشند و با نظریه‌های تحلیلی متعارف نمی‌توان آنها را توصیف کرد. انبوهش تقریباً همیشه به ساختارهای شاخه شاخه با هندسه فراکتالی منجر می‌شود.

بررسی این گونه پدیده‌ها و ساختارهای حاصل از آنها به دلیل دارا بودن فاکتورهای زیاد، کار بسیار سخت و گاهی غیر ممکن است. به همین دلیل برای بررسی آنها از روشهای تقریبی با استفاده از کامپیوتر استفاده می‌شود. در روشهای تقریبی با کاهش دادن قابل توجه فاکتورهای شناسایی، کار بررسی این پدیده‌ها و ساختارهای حاصل از آنها به مراتب آسانتر و قابل انجامتر می‌شود. برای این منظور مدل‌های رشد آماری زیادی مطرح شده که چنین ساختارهایی را ساخته و مورد بررسی قرار می‌دهند.

تذکر این نکته در اینجا بجاست که مدل‌های رشد آماری، بر اساس نوع ویژگیهایی که از اضافه شدن یک ذره به انبوهه در حال رشد را مشخص می‌کند، به دو دسته تقسیم می‌شوند [۶].

#### الف. مدل جایگزیده<sup>۱</sup>

در این مدلها پیوستن یک ذره به انبوهه در حال رشد فقط به شرایط محل ذره در لحظه‌ای که در حال اتصال به انبوهه است وابسته می‌باشد.

#### ب. مدل غیر جایگزیده

شرایط و ساختار کل انبوهه در حال پیوستن ذره در یک نقطه به خصوص مؤثر است. یکی از این مدل‌های انبوهشی که در این تحقیق از آن بهره برده‌ایم مدل انبوهش پخش محدود یا DLA است.

#### ۳.۲. مدل رشد DLA

مدل DLA جزء مدل‌های انبوهشی است که از به هم پیوستن

۲. Perimeter site

۳. Ensemble

۱. Local model

$$\frac{1}{4}(u_{i,j+1} + u_{i,j-1} + u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - 4u_{i,j}) = 0, \quad (8)$$

به عبارتی احتمال حضور ذره در هر نقطه برحسب احتمال همسایه‌هایش به صورت زیر بیان می‌شود.

$$u_{i,j} = \frac{1}{4}(u_{i,j+1} + u_{i,j-1} + u_{i+1,j} + u_{i-1,j}). \quad (9)$$

## ۵.۲ شرایط مرزی

مدل DLA یک مدل برگشت‌ناپذیر است، یعنی وقتی ذره در نقطه‌ای ساکن شد از آن جدا نشده و ذره دیگری هم نمی‌تواند به آن نقطه وارد شود. پس احتمال این که ذره متحرک بتواند به نقاطی که قبلاً ذره‌ای در آن ساکن شده (نقاط روی خوشه) برود صفر است. پس در نقاط مرزی خوشه  $u = 0$  است.

اما در نقاط دور از خوشه هیچ ذره‌ای در نقاط شبکه نیست پس احتمال رفتن ذره متحرک به آن نقاط  $u = 1$  است. توجه به این نکته نیز ضروری است که در مدل DLA احتمال  $u$  در نقاط دور از خوشه در حال رشد یکنواخت است و فقط وقتی به سطح کلاستر نزدیک می‌شویم این احتمال تغییر می‌کند بنابراین کافی است احتمالها را در نزدیکی سطح، یعنی درون دایره محیط بر انبوهه و سطح آن محاسبه کنیم [۸].

## ۳. الگوریتم رشد در مدل DLA

قسمت اول: مرحله تولد ذره متحرک تصادفی

از آنجایی که رشد روی شبکه انجام می‌گیرد، در شروع شبکه‌ای تعریف می‌کنیم که ذرات متحرک تصادفی روی این نقاط شبکه گام می‌زنند و در نهایت روی این نقاط ساکن می‌شوند. در این تحقیق شبکه دو بعدی و مربعی در نظر گرفته شد. ضمناً مدل DLA دارای خاصیت عام<sup>۱</sup> بوده یعنی نسبت به نوع شبکه ناورداست [۸]. پس چنانچه شبکه از نوعی غیر از مربعی هم انتخاب شود همین نتیجه به دست خواهد آمد.

بعد از تعریف شبکه نوبت به مشخص کردن نقاط شروع رشد می‌رسد. تعدادی از نقاط را به صورت تصادفی با ذره پر می‌کنیم. این نقاط، نقاط شروع رشد شاخه‌ها در ساختار درختی خواهد بود. در این مرحله ذره متحرک تصادفی را در

$$u(x, k) = \frac{1}{C^k} Z_k(x). \quad (1)$$

$Z_k(x)$  در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$Z_{k+1}(\bar{x}) = \sum_{l=1}^C Z_k(\bar{x} + \bar{l}), \quad (2)$$

که  $C$  تعداد نزدیکترین همسایه‌های نقطه  $\bar{x}$  و  $\bar{l}$  بردارهایی است که  $\bar{x}$  را به همسایه‌های اول خود منتقل می‌کند.

معادله (۲) معادله پخش گسسته‌ای برای  $u(\bar{x}, k)$

به صورت زیر به دست می‌دهد.

$$u(\bar{x}, k+1) - u(\bar{x}, k) = \frac{1}{C} \sum_{l=1}^C [u(\bar{x} + \bar{l}, k) - u(\bar{x}, k)], \quad (3)$$

به راحتی می‌توان دید که معادله (۳) شکل گسسته معادله پخش (معادله ۴) است.

$$\eta \nabla^2 u = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (4)$$

در این معادله  $\eta$  ثابت پخش است.

از لحظه‌ای که ذره متحرک به یکی از نقاط لبه‌ای وارد شد و در آنجا ساکن شد باید برای آن نقطه  $u = 0$  قرار دهیم (سمت راست معادله ۲). احتمال آنکه یک نقطه لبه‌ای ذره متحرکی را در گام  $k+1$  جذب کند، همان‌طور که در بالا گفته شد برابر است با

$$v(\bar{x}, k+1) = \frac{1}{C} \sum_l \bar{u}(\bar{x} + \bar{l}, k). \quad (5)$$

از آنجایی که ذره از لحظه رها شدن تا رسیدن به نقطه لبه‌ای که در آن ساکن خواهد شد، به علت داشتن حرکت تصادفی مسافت زیادی را می‌پیماید، پس رشد به اندازه‌ای کند است که می‌توان از وابستگی زمانی در معادله حرکت چشمپوشی کرد. به این ترتیب معادله (۴) به معادله لاپلاس تبدیل می‌شود [۶]:

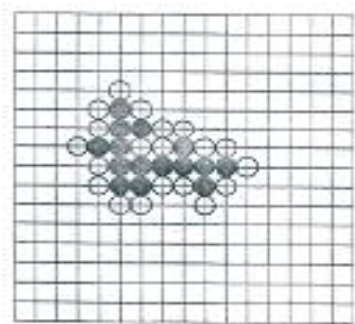
$$\nabla^2 u = 0. \quad (6)$$

به عبارت دیگر، چشمپوشی از  $\frac{\partial u}{\partial t}$  یعنی طرف چپ معادله گسسته پخش (معادله ۳) صفر شود. به این ترتیب معادله حرکت در مدل فوق به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{1}{C} \sum_{l=1}^C [u(\bar{x} + \bar{l}, k) - u(\bar{x}, k)] = 0. \quad (7)$$

در این تحقیق، شبیه‌سازی در شبکه مربعی انجام گرفته است،

پس  $C = 4$  خواهد بود.



**شکل ۲.** در این شکل خوشه در حال رشدی را می‌بینید. دایره‌های توپر نشان‌دهنده نقاط خوشه و دایره‌های توخالی نشان‌دهنده نقاط لبه‌ای هستند.

می‌دهند که شکل و ابعاد ساختار شاخه‌ای این نمونه‌ها یکسان نیستند. به عبارتی تغییر در شرایط آندیزاسیون باعث تغییر در شکل و ابعاد ساختار درختی نمونه‌ها می‌گردد [۱۶].

#### ۴.۱. اثر نوع آرایش

چنانچه ویفر از سیلیکان نوع n انتخاب شود شاخه‌های این ساختار درختی نازکتر و با تراکم کمتری رشد می‌کنند (شکل ۳-الف). اما اگر ویفر از سیلیکان نوع p باشد، شاخه‌ها کلفت‌تر و درهم تنیده‌تر رشد می‌کنند (شکل ۴-الف). برای نشان دادن این تغییرات در ساختارهای کامپیوتری مجبور به وارد کردن تغییراتی در مدل هستیم. اولین اصلاحی که به مدل DLA وارد کردیم در نظر گرفتن ضریب چسبندگی برای نقاط لبه‌ای است. به این ترتیب که به هر نقطه لبه‌ای که قابلیت جذب یک ذره متحرک را دارد یک ضریب  $P_i$ ، که تابعی از نزدیکترین همسایه‌های اشغال شده آن نقطه است، نسبت می‌دهیم [۱۴ و ۱۵].

$$P_i = S^{3-n_i} \quad (10)$$

در این رابطه S ضریب چسبندگی است که عددی مثبت و کوچکتر از یک است.  $n_i$  نیز تعداد اولین همسایه‌های اشغال شده نقطه مذکور است.

به این ترتیب هر نقطه لبه‌ای با یک احتمال می‌تواند ذره متحرک تصادفی را جذب کند. کوچکتر شدن ضریب چسبندگی (S) باعث کلفت‌تر شدن شاخه‌های در حال رشد می‌شود.

فاصله طول پخش از سطر اول نقاط شبکه رها می‌کنیم.

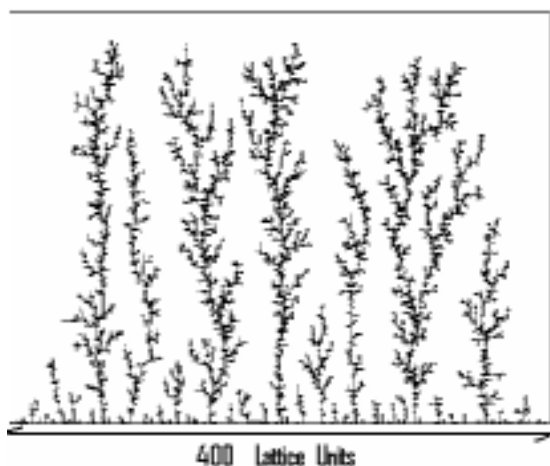
#### قسمت دوم: مرحله حرکت تصادفی

در این مرحله احتمال حضور ذره  $U_{i,j}$  را برای تمام نقاط شبکه محاسبه می‌کنیم. به این ترتیب که در حین ولگشت ذره متحرک، قبل از هر گام، احتمال  $U_{i,j}$  را برای ۴ همسایه اول نقطه‌ای که ذره در آن واقع شده، از معادله (۹) به دست می‌آوریم. ذره در مقایسه این ۴ احتمال به نقطه‌ای گام می‌زند که احتمال بزرگتری داشته باشد. در واقع ذره با این کار به سمت نوک شاخه‌های در حال رشد سوق داده می‌شود و این امر باعث می‌شود که رشد در نوک شاخه‌های پیش‌رونده انجام شود و ذرات به بیرونی‌ترین نقاط لبه‌ای بچسبند و به نقاط درونی‌تر هرچند در دسترس باشند متمایل نشوند. به این پدیده خاصیت استتار (screening) گفته می‌شود [۸].

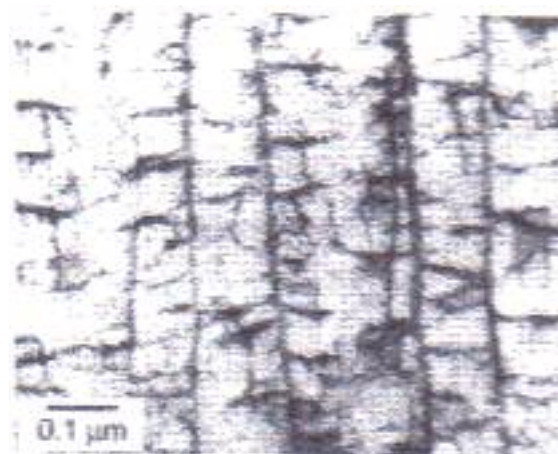
**قسمت سوم:** مرحله تشخیص نقاط لبه‌ای و چسبیدن به خوشه بعد از هر گام که ذره برمی‌دارد یک بار کنترل می‌شود که نقطه‌ای که در آن هست نقطه لبه‌ای است یا خیر. نقاط لبه‌ای اولین همسایه‌های خالی سطح بیرونی خوشه در حال رشد هستند که به آنها نقاط فعال نیز گفته می‌شود. چنانچه نقطه لبه‌ای بود به آن نقطه متصل می‌شود. در غیر این صورت به ولگشت خود ادامه می‌دهد تا بالاخره به یک نقطه لبه‌ای رسیده و به آن متصل شود (شکل ۲). بعد از قرار گرفتن ذره متحرک در نقطه لبه‌ای دوباره ذره جدیدی رها شده و کار ادامه پیدا می‌کند. چنانچه ذره متحرک حین ولگشت به جای نزدیک شدن به خوشه از آن دور شود و از منطقه فعالی که قبلاً در برنامه معلوم کرده‌ایم خارج شود، ذره را نابود فرض می‌کنیم و ذره دیگری را از فاصله‌ای که قبلاً توضیح داده شده رها می‌کنیم. این کار برای کوتاه شدن مدت اجرای برنامه انجام می‌شود.

#### ۴. نتایج

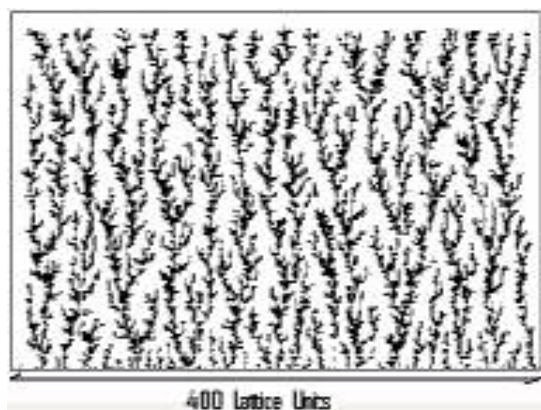
تصویرهای SEM مربوط به ساختار نمونه‌های سیلیکان متخلخل که تحت شرایط آندیزاسیون متفاوتی ساخته شده‌اند، نشان



شکل (۳-ب). ساختار کامپیوتری شبیه‌سازی شده PS به روش DLA حاصل از ویفر سیلیکان نوع n متشکل از ۱۲۹۳۶ ذره، طول پخش برابر  $L=11$ ، پارامتر ضریب چسبندگی  $S=0.25$ .



شکل (۳-الف). سیلیکان متخلخل ساخته شده از سیلیکان نوع n. شدت جریان  $10 \text{ mA/cm}^2$ ، غلظت الکترولیت ۴۹٪ (HE)، جهت جریان از پایین صفحه به سمت بالاست [۳].



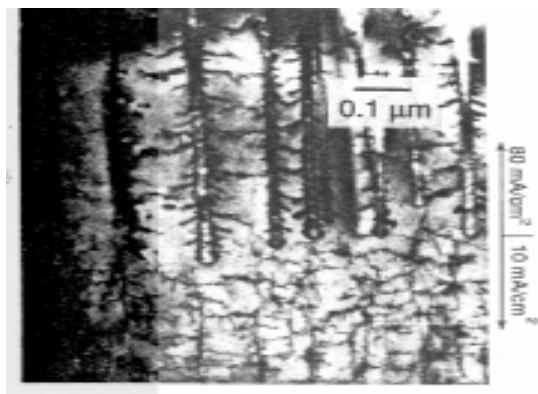
شکل (۴-ب). ساختار کامپیوتری شبیه‌سازی شده PS به روش DLA حاصل از سیلیکان نوع p، متشکل از ۳۳۰۵۷ ذره، طول پخش برابر  $L=2$ ، ضریب چسبندگی  $S=0.3$  است.



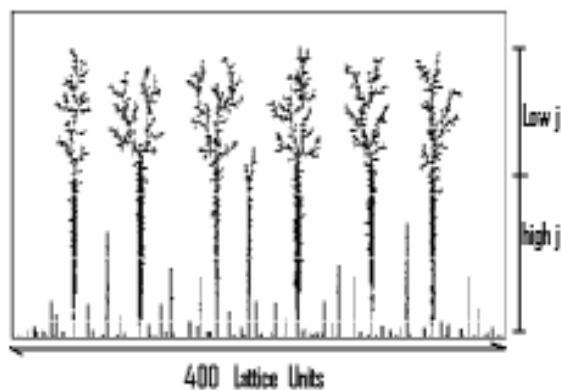
شکل (۴-الف). سیلیکان متخلخل ساخته شده از سیلیکان نوع p+ کانالهایی کوچک در حد ۵ تا ۱۰ نانومتر، شدت جریان  $10 \text{ mA/cm}^2$ ، غلظت الکترولیت ۴۹٪ (HE)، جهت جریان از پایین صفحه به سمت بالاست [۳].

در شکل ۳-ب ساختار حاصل از سیلیکان نوع n متشکل از ۱۲۹۳۶ ذره را ملاحظه می‌کنید که با استفاده از مدل DLA استاندارد و بدون اعمال اصلاحات به مدل، شبیه‌سازی کرده‌ایم و مشخصات نمونه تجربی مشابه آن نیز در شکل ۳-الف ارائه شده است. در شکل ۴-ب با اعمال تغییرات و اصلاحاتی به مدل که در بالا ذکر شد، این پدیده را برای سیلیکان نوع p متشکل از ۳۳۰۵۷ ذره شبیه‌سازی کرده‌ایم و مشخصات نمونه

تغییر بعدی که در این راستا به مدل اعمال شد تغییر دادن پارامتر طول پخش ( $L$ ) است.  $L$  فاصله مکانی که ذره متحرک تصادفی در آن متولد شده تا دورترین ذره متصل شده به ساختار در حال رشد است. با کوچکتر کردن این پارامتر شاخه‌های در حال رشد به هم نزدیکتر و فاصله بین تخلخل‌های پیش‌رونده کمتر می‌شود. یعنی اتفاقی که در آندزاسیون ویفر سیلیکان نوع p رخ می‌دهد.



شکل (۵-الف). عکس از سطح مقطع (TEM) سیلیکان متخلخل نوع n که شکل خلل را بصورت تابعی از جریان نشان می‌دهد. نوع آرایش زیرلایه فسفر و غلظت آرایش ۱/۱۷ در سانتی‌متر مکعب است. غلظت الکترولیت (HF) ۴۹٪ است [۳].



شکل (۵-ب). ساختار کامپیوتری شبیه‌سازی شده از سیلیکان متخلخل به روش DLA، متشکل از ۸۱۵ ذره، پارامتر میدان متوسط در ناحیه j high و  $M=50$  و ضریب چسبندگی  $S=0.25$  در ناحیه j low و  $M=0$  و  $S=1$ ، این شکل کامپیوتری تغییر شکل در اثر تغییر جریان طی آندیزاسیون را شبیه‌سازی کرده است.

تذکر این نکته در اینجا بجاست که اعداد مربوط به ضریب چسبندگی (S)، پارامتر میدان متوسط (M) و پارامتر طول پخش (L) با آزمون و خطا و با استفاده از روش تکرار به دست آمده است.

### ۵. نتیجه‌گیری

اصلاحات اعمال شده به مدل پخش محدود، شامل وارد کردن ضریب چسبندگی برای نشان دادن تأثیر نوع آرایش در شکل ساختارهای به دست آمده طی رشد سیلیکان متخلخل و همچنین

تجربی آن نیز در شکل ۴-الف ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این پارامتر با نمونه واقعی به دست آمده توافق قابل قبولی دارد.

### ۲.۴. اثر چگالی جریان

یکی دیگر از شرایط آندیزاسیون که اثر عمده‌ای روی شکل‌گیری خلل طی فرایند متخلخل‌سازی دارد، چگالی جریان است. با توجه به این‌که شکل‌گیری شاخه‌ها و پیشروی آنها در تمام شرایط در جهت جریان است ولی افزایش چگالی جریان باعث می‌شود خلل شکل میله‌ای به خود گرفته و کمتر شاخه شاخه شوند ولی با کاهش شدت جریان یک‌باره قطر خلل کم شده و ساختار شاخه شاخه می‌شود [۲].

برای وارد کردن این تغییر در ساختارهای شبیه‌سازی شده، اصلاح دیگری به مدل DLA اعمال کردیم و آن وارد کردن اثر میدان متوسط است. به این مفهوم که وقتی ذره متحرک به یک نقطه لبه‌ای رسید و تمام شرایط برای چسبیدن مهیا شد، ذره در آن نقطه ساکن نشود بلکه آن نقطه به عنوان نقطه‌ای که یک‌بار ملاقات شده ثبت می‌شود. وقتی یک نقطه لبه‌ای تعداد ملاقات‌هایش با ذره متحرک تصادفی به تعداد M (پارامتر میدان متوسط) رسید توسط ذره متحرک اشغال می‌شود [۱۴].

اعمال اثر میدان متوسط باعث میله‌ای شدن شاخه‌های در حال رشد می‌شود. هر چقدر پارامتر M بزرگتر باشد شاخه‌ها به صورت میله‌های مستقیم‌تری رشد می‌کنند و با کم شدن M ساختار درختی شاخه‌ای‌تر می‌شود. در شکل ۵-ب با استفاده از این اصلاح در مدل پدیده میله‌ای شدن شاخه‌ها در اثر زیاد شدن جریان را نشان داده‌ایم. این شکل از دو ناحیه تشکیل شده است. در ناحیه‌ای که با علامت high j مشخص شده است. پارامتر میدان متوسط  $M=50$  و ضریب چسبندگی  $S=0.25$  در نظر گرفته شده است. اما در ناحیه دوم که با علامت low j مشخص شده پارامتر میدان متوسط و ضریب چسبندگی  $M=0$  و  $S=1$  فرض شده است. ساختار مذکور از ۸۱۵ ذره تشکیل شده است. در شکل ۵-الف نمونه تجربی آن ارائه گردیده است.

این ترتیب که بزرگتر شدن  $M$  مانند بالابردن چگالی جریان در طی متخلخل سازی باعث میله‌ای‌تر شدن ستونها می‌گردد و کوچکتر شدن یا حذف این پارامتر ستونها را شاخه‌ای‌تر می‌سازد. مانند وقتی که چگالی جریان را حین متخلخل سازی کمتر کنیم (شکل ۵).

نتایج شبیه‌سازی به دست آمده با شکل ساختار نمونه‌های تجربی ساخته شده توافق خوبی را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان با اعمال این اصلاحات و همچنین اصلاحات دیگری که قابل اعمال به مدل DLA می‌باشد، تأثیر سایر پارامترهای آندیزاسیون رادر رشد سیلیکان متخلخل شبیه‌سازی کرد.

وارد کردن پارامتر میدان متوسط برای نشان دادن تأثیر چگالی جریان در شکل ستونها در این مقاله ارائه گردیده است.

پارامتر ضریب چسبندگی ( $S$ ) که عددی کوچکتر از یک می‌باشد، هرچقدر به یک نزدیکتر باشد شاخه‌ها نازکتر و تراکم آنها کمتر می‌شود. مانند ساختارهایی که از متخلخل سازی ویفر سیلیکان نوع  $n$  به دست می‌آیند. کوچکتر شدن  $S$  شاخه‌ها را کلفتتر و تراکم آنها را بیشتر می‌سازد و اشکال به دست آمده شبیه به ساختارهایی می‌شود که از متخلخل سازی ویفر سیلیکان نوع  $p$  به دست می‌آیند (شکل ۳ و ۴). اما حضور پارامتر میدان متوسط  $M$  در مدل باعث تغییر شکل ستونها می‌شود به

## مراجع

1. L T Canham, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 10 (1990)1046-1048.
2. R L Smith and S D Collins, *J. Appl. Phys.* **71**, 8 (1992)R1-R22.
3. R T Collins, P M Fauchet and M A Tichler, *Physics Today* **50**, (1997)24-30.
4. S F Chuang, S D Collins and R L Smith, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 7 (1989)675-677.
5. B B Mandelbrot, "Fractals, Form, Chance and Dimension", USA (1977).
6. T Vicsek, *Fractal Growth Phenomena*, Budapest, Hungary (1992).
7. T A Witten and L M Sander, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 19 (1981)1400-1403.
8. T A Witten and L M Sander, *Phys. Rev. B* **27**, 9 (1983) 5686-5697.
9. L Niemeyer, L Pietronero, H J Wiesman, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 12 (1984)1033-1036.
10. M Kolb, R Botet, R Jullien, *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 13 (1983)1123-1126.
11. J Nittman, G Daccord, H E Stanley, *Nature* **314**, 6007 (1985)141-145.
12. T Vicsek, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 24 (1984)2281-2284.
13. T Vicsek, *Phys. Rev. A* **32**, 5 (1985)3084-3089.
14. K C Chiu, F S Lee, S J Tu, S M Young, W Y Hsu, C F Chen, C S Ro, *Chinese journal of Physics*, **30**, 1 (1992)143-155.
15. P Meakin, *Phys. Rev. A* **27**, 3 (1983) 1495-1507.
۱۶. سکینه مینائی فرد و رضا ثابت داریانی، سیزدهمین گردهمایی فیزیک ماده چگال، مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه، زنجان (۱۳۸۶) ۳۲۷.