



Effect of Gas Type on the Morphology and Shape of Nanoparticles Synthesized Using Atmospheric-Pressure Plasma

Z. Dehghani*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Received: 2026-02-21

Revised: 2026-04-12

Accepted: 2026-04-30

Abstract: In this study, the synthesis of nanoparticles in a plasma system was investigated with a particular focus on the role of methane in the secondary plasma and its influence on the structural characteristics and temporal stability of the nanoparticles. Nanoparticles were synthesized under two different conditions, namely with and without methane injection, and their structural evolution was analyzed immediately after synthesis and 20 minutes later using Raman spectroscopy (532 nm excitation) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Raman results revealed that nanoparticles synthesized under both conditions exhibit a nanocrystalline structure at the initial stage, as evidenced by the red-shift and broadening of the silicon optical phonon peak relative to bulk crystalline silicon, indicating pronounced phonon confinement effects. However, in the absence of methane, the Raman signature of silicon was significantly weakened after 20 minutes, whereas it was well preserved in the methane-assisted samples. These results indicate that methane plays a key role in surface chemistry engineering and significantly enhances the temporal stability of plasma-synthesized silicon nanoparticles, providing an efficient strategy for producing stable silicon nanomaterials for advanced applications.

Keywords: nanoparticles, Secondary plasma, Methane Gas, Raman spectroscopy, Surface chemistry

Corresponding Author. Email: dehghanyz93@gmail.com

How to Cite This Article:

Dehghani Z. Effect of Gas Type on the Morphology and Shape of Nanoparticles Synthesized Using Atmospheric-Pressure Plasma. Nanomeghyas. 2026;():e738271 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2086245.1424



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

اثر نوع گاز بر روی مورفولوژی و شکل نانوذرات سیلیکونی ساخته شده با استفاده از پلاسمای فشار اتمسفر

زهره دهقانی*

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران-ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

چکیده: در این مقاله، تاثیر گاز متان و استفاده از پلاسمای ثانویه روی ساخت نانوذرات سیلیکونی با استفاده از پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات ساخته شده در دو حالت شامل حضور و عدم حضور متان تولید شدند و تغییرات ساختاری آن‌ها بلافاصله پس از تولید و ۲۰ دقیقه پس از آن با استفاده از طیف‌سنجی رامان و طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نانوذرات تولیدی در هر دو حالت در لحظه تولید دارای ساختار نانوبلورین بوده و اثر محبوس‌شدگی فونونی موجب جابجایی و پهن شدن پیک فونونی سیلیکون نسبت به مرجع بلوری می‌شود. با این حال، در نمونه‌های بدون متان، طیف رامان برای سیلیکون پس از گذشت ۲۰ دقیقه به‌طور قابل توجهی تضعیف شد، در حالی که در نمونه‌های تولیدی در حضور متان، پاسخ رامانی سیلیکون حفظ می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که متان در پلاسمای ثانویه نقش کلیدی در مهندسی شیمی سطح و افزایش پایداری زمانی نانوذرات سیلیکونی ایفا می‌کند و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای تولید نانوذرات سیلیکونی پایدار و قابل کاربرد مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: نانوذرات سیلیکونی، پلاسمای ثانویه، متان، طیف‌سنجی رامان، شیمی سطح

نویسنده مسئول: dehghanyz93@gmail.com

نحوه استناد به این مقاله: دهقانی زهره. اثر نوع گاز بر روی مورفولوژی و شکل نانوذرات سیلیکونی ساخته شده با استفاده از پلاسمای فشار اتمسفر.

Nanomeghyas. 1405();e738271. doi: 10.22034/ns.2026.2086245.1424

این مقاله تحت مجوز دسترسی آزاد CC-BY منتشر شده است (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



۱- مقدمه

فرآیند یکی از روش‌های قابل کنترل برای تولید نانوذرات سیلیکونی با ویژگی‌های مطلوب است [۱۲].

گاز آرگون به‌عنوان گاز حامل در این فرآیندها نقش مهمی در پایداری پلاسما و انتقال انرژی به گونه‌های فعال دارد [۱۳، ۱۴]. همچنین، گاز متان می‌تواند به‌طور مؤثری در تشکیل گروه‌های شیمیایی مختلف مانند Si-H و Si-CH₂ در ساختار نانوذرات تأثیر بگذارد [۱۵]. این گروه‌ها می‌توانند ویژگی‌های سطحی و شیمیایی نانوذرات را تغییر دهند و آن‌ها را برای کاربردهای مختلف مناسب‌تر سازند [۱۶].

گاز متان به‌عنوان یکی از گازهای واکنشی در فرآیندهای پلاسما-شیمیایی استفاده می‌شود. این گاز می‌تواند به‌طور مستقیم بر فرآیندهای شیمیایی در پلاسما تأثیر بگذارد و ویژگی‌های نانوذرات سیلیکونی تولیدی را تغییر دهد. متان می‌تواند به تولید گروه‌های آلکیل‌دار مانند Si-CH₂ و Si-C در ساختار نانوذرات کمک کند که این امر می‌تواند ویژگی‌های سطحی و پایداری نانوذرات را بهبود بخشد [۱۷]. این تغییرات به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به سطح فعال بالایی دارند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. این گروه‌های شیمیایی می‌توانند بر ویژگی‌های سطحی نانوذرات تأثیر گذاشته و به‌طور مستقیم بر کارایی آن‌ها در کاربردهای مختلف مانند ذخیره‌سازی انرژی، حسگرها و الکترونیک نانو تأثیرگذار باشند [۱۸]. از سوی دیگر، متان می‌تواند بر فرآیندهای اکسیداسیون در پلاسما نیز تأثیر بگذارد و به‌طور غیرمستقیم بر ویژگی‌های نانوذرات سیلیکونی تأثیر بگذارد [۱۹].

از آنجا که نانوذرات سیلیکونی دارای نسبت سطح به حجم بسیار بالایی هستند، سریع‌ترین تغییرات شیمی سطح و اکسیداسیون آنها معمولاً در دقایق ابتدایی پس از سنتز رخ می‌دهد. بنابراین بررسی رفتار نانوذرات در بازه زمانی کوتاه پس از تولید می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره پایداری اولیه، مقاومت در برابر اکسیداسیون سریع و قابلیت استفاده آنها در مراحل جمع‌آوری، انتقال و فرآیندهای پسابستز فراهم کند. از این رو در پژوهش حاضر تمرکز ویژه‌ای بر ارزیابی تحول ساختاری نانوذرات در بازه ۲۰ دقیقه نخست پس از تولید قرار گرفته است.

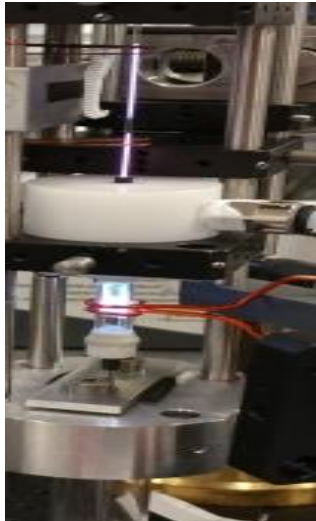
با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه تولید نانوذرات سیلیکونی از طریق پلاسما-شیمیایی، هنوز چالش‌هایی در زمینه کنترل دقیق ویژگی‌های نانوذرات وجود دارد. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، تنظیم دقیق پارامترهای فرآیند مانند فشار، دما و ترکیب گازی است [۲۰]. به همین دلیل، تحقیقات بیشتر در خصوص تأثیر گازهای مختلف و پارامترهای فرآیند بر ویژگی‌های نانوذرات سیلیکونی تولیدی ضروری است. در این مقاله، اثر ولتاژ و نوع گاز بر مورفولوژی نانوذرات سیلیکونی تولیدشده توسط پلاسما فشار اتمسفر بررسی می‌شود. در ابتدا شرایط پلاسما و گونه‌های فعال با طیف‌سنجی نشر نوری (OES) ارزیابی شده و نقش گاز حامل آرگون در تقویت گونه‌های سیلیکونی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس، اثر گاز متان در ساخت نانوذرات سیلیکونی، شرایطی که از پلاسما ثانویه استفاده می‌شود،

نانوذرات سیلیکونی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود نظیر سطح بالا، خواص نوری و شیمیایی، و قابلیت‌های کاربردی در حوزه‌های مختلف از جمله فناوری‌های الکترونیکی، اپتیک، داروسازی، ذخیره‌سازی انرژی و حسگرها، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱]. این نانوذرات در مقایسه با سیلیکون بالکی دارای خواص نوری، الکترونیکی و شیمیایی متفاوتی هستند که آن‌ها را برای استفاده در تکنولوژی‌های جدید بسیار مناسب می‌سازد [۲]. یکی از ویژگی‌های مهم نانوذرات سیلیکونی توانایی ایجاد پوشش‌های نانوکریستالی است که این ویژگی‌ها می‌توانند در زمینه‌های مختلفی مانند حسگرهای گازی، الکترونیک، و انرژی‌های تجدیدپذیر به کار روند [۳]. به همین دلیل، تولید نانوذرات سیلیکونی با اندازه، ساختار و ویژگی‌های خاص بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

تا به امروز ساخت نانوذرات سیلیکونی از طریق روش‌های مختلفی صورت گرفته است که این روش‌ها به‌طور عمده به دو دسته اصلی، روش‌های شیمیایی و فیزیکی تقسیم می‌شوند. روش‌های شیمیایی معمولاً شامل ساخت از طریق رسوب دهی بخار شیمیایی و شیمیایی با مایعات هستند که در آن‌ها پیش‌ماده‌ها مانند سیلان (SiH₄) تحت شرایط خاصی تجزیه می‌شوند [۴]. از سوی دیگر، روش‌های فیزیکی شامل تکنیک‌های لیزری و پلاسمای شیمیایی می‌باشد که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از اهمیت خاصی برخوردارند [۵]. این روش‌ها به تولید نانوذرات با ساختارهایی خاص و کنترل‌شده کمک می‌کنند که برای کاربردهای مختلف مناسب می‌باشند [۶]. در میان این روش‌ها، استفاده از پلاسما به‌عنوان تکنیکی مؤثر برای ساخت نانوذرات سیلیکونی در مقیاس صنعتی و آزمایشگاهی جایگاه ویژه‌ای دارد. [7]

در این بین، پلاسما-شیمیایی به‌عنوان روشی مؤثر در تولید نانوذرات سیلیکونی که در آن، گاز پیش‌ماده مانند سیلان (SiH₄) تحت تأثیر تخلیه پلاسما قرار می‌گیرد و به‌طور مستقیم نانوذرات سیلیکونی تولید می‌شود، شناخته می‌شود. در این فرآیند، پلاسمای غنی از الکترون‌ها و یون‌ها با گاز پیش‌ماده واکنش داده و پیوندهای شیمیایی جدید ایجاد می‌کند که در نهایت به تشکیل نانوذرات با ویژگی‌های خاص می‌انجامد [۸]. مزیت این روش، توانایی کنترل دقیق اندازه، شکل، و ترکیب نانوذرات در طول فرآیند است که به تولید نانوذرات با ویژگی‌های مطلوب در مقیاس بزرگ کمک می‌کند [۹].

در فرآیندهای پلاسما، گازهایی مانند آرگون و نیتروژن معمولاً به‌عنوان گاز حامل استفاده می‌شوند [۱۰] که این گازها به پایداری تخلیه پلاسما کمک کرده و انرژی کافی را به گونه‌های فعال در پلاسما منتقل می‌کنند و از این رو انتخاب گاز مناسب برای تولید نانوذرات با ویژگی‌های خاص حائز اهمیت است [۱۱]. از آنجا که شرایط پلاسما می‌تواند به‌طور دقیق تنظیم شود، این



شکل ۱. تصویر سامانه پلاسمایی

مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله، اثر پلاسمای ثانویه و نوع گاز بر مورفولوژی نانوذرات سیلیکونی تولیدشده توسط پلاسمای فشار اتمسفر بررسی می‌شود. در ابتدا شرایط پلاسمای و گونه‌های فعال با طیف‌سنجی نشر نوری (OES) ارزیابی شده و نقش گاز حامل آرگون در تقویت گونه‌های سیلیکونی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس، اثر گاز متان در ساخت نانو ذرات سیلیکونی، شرایطی که از پلاسمای ثانویه استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- راکتور و سامانه تولید پلاسمای

۲-۱-۱- پلاسمای اولیه

به‌منظور بررسی اثر پلاسمای ثانویه بر مورفولوژی نانوذرات سیلیکونی، از سامانه پلاسمای فشار اتمسفر شامل دو ناحیه پلاسمای استفاده شده است. پلاسمای اولیه وظیفه تولید نانوذرات سیلیکونی را بر عهده دارد و پلاسمای ثانویه به‌عنوان یک مرحله پس‌فرآیندی برای اصلاح ویژگی‌های مورفولوژیکی نانوذرات به کار گرفته شده است. تصویر سامانه پلاسمایی در شکل (۱) نشان داده شده است.

پلاسمای اولیه نوعی پلاسمای خازنی RF بوده که در فشار اتمسفر عمل می‌کند. در این سامانه، الکتروود RF به منبع تغذیه فرکانس رادیویی به همراه مچینگ‌باکس متصل شده و الکتروود دوم به‌صورت الکتریکی به زمین متصل می‌گردد. قرارگیری این دو الکتروود در مقابل یکدیگر باعث تشکیل یک کوپل خازنی می‌شود که با اعمال ولتاژ RF، گازهای واکنش‌گر بین الکتروودها یونیزه شده و پلاسمای تشکیل می‌شود. به دلیل فشار اتمسفری سیستم، فاصله بین الکتروودها به‌منظور تسهیل در روشن‌شدن و پایداری پلاسمای بسیار کم در نظر گرفته شده است. بدین منظور، از یک استوانه کوارتزی با قطر داخلی ۰.۷ mm استفاده شده و فاصله بین دو الکتروود ۱ mm تنظیم شده است. علاوه بر این الکتروودها از ورقه‌های مسی با ضخامت تقریبی ۱ mm ساخته شده‌اند. ولتاژ اعمالی برای ایجاد تخلیه الکتریکی در این سامانه در حدود ۳ kV می‌باشد.

گازهای مورد استفاده در پلاسمای اولیه شامل آرگون به‌عنوان گاز حامل و سیلان به‌عنوان پیش‌ماده سیلیکون می‌باشند. دبی کل جریان گاز برابر SCCM ۱۲۰۰ در نظر گرفته شده است که از این مقدار، SCCM ۸۰ مربوط به گاز سیلان و مابقی مربوط به آرگون می‌باشد. انتخاب آرگون به دلیل پایداری تخلیه، کاهش دمای مؤثر پلاسمای و فراهم‌کردن محیط مناسب برای تجزیه سیلان انجام شده است.

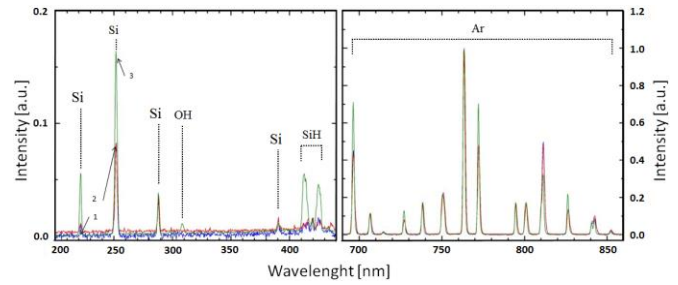
۲-۱-۲- پلاسمای ثانویه

پلاسمای ثانویه که در پایین سامانه و پس از ناحیه تولید نانوذرات قرار گرفته است، نیز از نوع پلاسمای RF فشار اتمسفر می‌باشد. هدف از به‌کارگیری این پلاسمای، اعمال یک تیمار پلاسمایی بر نانوذرات سیلیکونی تولیدشده و بررسی تأثیر آن بر مورفولوژی، اندازه و یکنواختی ذرات است. در این بخش، از تیوپ شیشه‌ای با قطر ۱ cm استفاده شده و گاز آرگون با دبی SCCM ۳۰۰ به‌عنوان گاز کاری وارد راکتور می‌شود. توان منبع تغذیه RF اعمال‌شده به این پلاسمای برابر ۴۴ W می‌باشد. در این ناحیه، به غیر از گاز آرگون با دبی SCCM ۳۰۰، گاز متان با دبی SCCM ۱ برای تشکیل پلاسمای ثانویه تزریق می‌شود.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای اولیه در شرایط مختلف شارش گاز آرگون

برای بررسی اثر دبی گاز آرگون بر ویژگی‌های پلاسمای و گونه‌های فعال آن، آزمایش‌های طیف‌سنجی نشر نوری (OES) بر پلاسمای اولیه در شرایط مختلف دبی آرگون SCCM ۴۰۰، ۷۲۰ و ۱۲۰۰ انجام شد. در این آزمایش‌ها، سایر پارامترها شامل ولتاژ اعمالی، توان منبع تغذیه RF و دبی گاز سیلان ثابت نگه داشتند تا تأثیر تغییر دبی آرگون به‌طور مستقل مورد بررسی قرار گیرد. نتایج طیف‌سنجی برای هر یک از مقادیر دبی آرگون به ترتیب با رنگ‌های آبی، قرمز و سبز در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای Ar/SiH_4 در فشار اتمسفر در شرایط مختلف دبی آرگون ۴۰۰، ۷۲۰ و ۱۲۰۰ sccm

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دبی آرگون، شدت خطوط نشری سیلیکون و باندهای مربوط به رادیکال SiH افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. این تغییرات، نشان‌دهنده تقویت فرآیند برانگیزش گونه‌های فعال سیلیکونی و بهبود انتقال انرژی در پلازما است. در حالی که خطوط نشری مرتبط با آرگون تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهند.

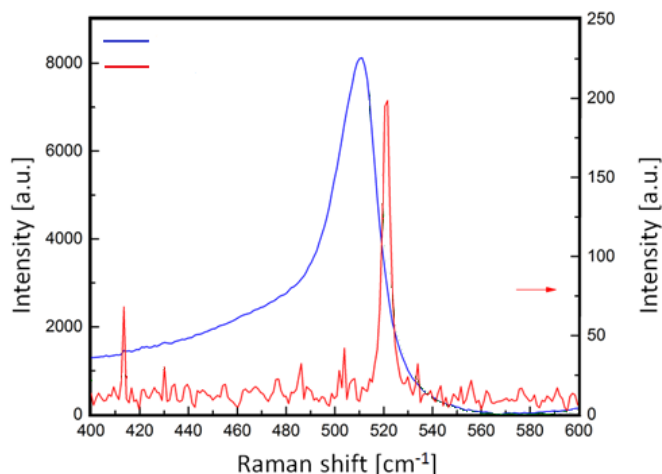
در ناحیه طیفی ۲۰۰ تا ۴۵۰ nm، خطوط نشری متعددی از گونه‌های سیلیکونی مشاهده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها شامل خطوط اتمی سیلیکون و باندهای مربوط به رادیکال SiH هستند. این خطوط نشری، تجزیه مؤثر گاز سیلان در پلازما و تشکیل گونه‌های فعال لازم برای فرایندهای هسته‌زایی و رشد نانوذرات سیلیکونی را تأیید می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش دبی آرگون از ۴۰۰ به ۱۲۰۰ sccm، شدت خطوط نشری سیلیکون به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. این افزایش شدت به‌ویژه در ناحیه ۲۵۰ nm برای خط قوی سیلیکون به‌طور واضح مشاهده می‌شود. بیشترین شدت مربوط به دبی ۱۲۰۰ sccm و کمترین آن مربوط به دبی ۴۰۰ sccm است. این افزایش شدت خطوط نشری سیلیکون به‌طور مستقیم به بهبود فرایندهای برانگیزش و انتقال انرژی در پلازما نسبت داده می‌شود. در شرایط فشار اتمسفر، برخوردی بین ذرات در پلازما نقش تعیین‌کننده‌ای دارند و افزایش دبی آرگون می‌تواند موجب پایداری بیشتر تخلیه و افزایش چگالی گونه‌های برانگیخته آرگون شود. گونه‌های شبه‌پایدار آرگون (Ar^*) می‌توانند انرژی خود را به گونه‌های حاصل از تجزیه سیلان منتقل کرده و بدین‌سان، تولید و برانگیزش اتم‌های سیلیکون را تقویت کنند. این پدیده به‌طور مستقیم با افزایش شدت خطوط سیلیکون در طیف OES در ارتباط است.

علاوه بر خطوط اتمی سیلیکون، باندهای مربوط به رادیکال SiH در ناحیه ۴۱۰ تا ۴۲۰ nm نیز مشاهده می‌شود. شدت این باند با افزایش دبی آرگون افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده فعال‌تر شدن مسیرهای تجزیه سیلان در دبی‌های بالاتر آرگون است. رادیکال‌های SiH یکی از مهم‌ترین گونه‌های واسطه در فرایند رشد نانوذرات سیلیکونی محسوب می‌شوند و افزایش حضور آن‌ها بیانگر تأثیر مستقیم دبی آرگون بر مسیرهای رادیکالی تجزیه سیلان است.

در ناحیه طیفی ۳۰۹ nm، باند نشری OH مشاهده می‌شود که معمولاً به حضور رطوبت یا ناخالصی‌های اکسیژنی در سیستم‌های پلاسمای فشار اتمسفر مربوط می‌شود. شدت این باند در تمامی مقادیر دبی آرگون مشابه است و تغییرات آن نسبت به تغییرات شدت خطوط نشری سیلیکونی قابل توجه نیست. این باند به‌طور عمده نقش کم‌تری در فرایند سنتز نانوذرات ایفا می‌کند. در ناحیه طیفی ۶۹۰ تا ۸۶۰ nm، خطوط نشری مختلفی از اتم‌های برانگیخته آرگون مشاهده می‌شود. بررسی این خطوط در مقادیر مختلف دبی آرگون نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجهی در شکل کلی طیف و شدت نسبی خطوط آرگون مشاهده نمی‌شود. این نشان می‌دهد که علی‌رغم افزایش دبی آرگون، شرایط کلی تخلیه و مکانیزم‌های برانگیزش آرگون در پلازما تقریباً ثابت مانده‌اند و تغییرات مشاهده‌شده در خطوط سیلیکون بیشتر به تعامل آرگون با گونه‌های حاصل از تجزیه سیلان نسبت داده می‌شود. نتایج کلی طیف‌سنجی نشر نوری نشان‌دهنده آن است که افزایش دبی آرگون در پلاسمای اولیه، در شرایط ثابت ولتاژ و توان، موجب افزایش چشمگیر غلظت و برانگیزش گونه‌های فعال سیلیکونی مانند Si و SiH می‌شود. از آن‌جا که این گونه‌ها نقشی کلیدی در فرایندهای هسته‌زایی و رشد نانوذرات سیلیکونی دارند، تغییرات دبی آرگون تأثیر مستقیمی بر مورفولوژی، اندازه و یکنواختی نانوذرات تولیدی خواهد داشت. این نتایج مبنای فیزیکی مناسبی برای تفسیر تغییرات مورفولوژیکی مشاهده‌شده در بررسی‌های ساختاری نانوذرات در بخش‌های بعدی مقاله فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که در این مطالعه اندازه‌گیری مستقیمی از پارامترهای پلاسمایی نظیر دمای الکترونی (Te) و چگالی الکترونی (ne) انجام نشده است. بنابراین تفکیک کمی سهم افزایش غلظت گونه‌های فعال از تغییرات احتمالی شرایط برانگیزش امکان‌پذیر نیست. با این حال، ثابت ماندن نسبی شدت خطوط آرگون در مقایسه با افزایش محسوس خطوط Si و باندهای SiH نشان می‌دهد که افزایش دبی آرگون علاوه بر تغییر شرایط برانگیزش، احتمالاً موجب افزایش نرخ تجزیه سیلان و افزایش غلظت گونه‌های فعال سیلیکونی نیز شده است.

۳-۲- تحلیل طیف‌سنجی رامان نانوذرات سیلیکونی تحت برانگیزش ۵۳۲ نانومتر

طیف‌سنجی رامان به‌عنوان یکی از حساس‌ترین روش‌های غیرمخرب برای بررسی ساختار بلوری و بی‌نظمی‌های مقیاس نانو، نقش مهمی در ارزیابی نانوذرات سیلیکونی تولید شده به روش‌های مبتنی بر پلازما ایفا می‌کند. در این بررسی، با استفاده از لیزر برانگیزش ۵۳۲ nm، تغییرات ساختاری نانوذرات سیلیکونی تولید شده در دو شرایط متفاوت شامل حضور و عدم حضور متان در پلاسمای ثانویه و همچنین اثر گذشت زمان پس از تولید مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب طول موج ۵۳۲ نانومتر به دلیل برهم‌کنش قوی با مدهای فونونی سیلیکون بلوری، امکان آشکارسازی دقیق تغییرات ناشی از محبوس‌شدگی فونونی، بی‌نظمی ساختاری و تغییرات سطحی را فراهم می‌سازد.



شکل ۴: طیف رامان نانوذرات سیلیکونی تولیدشده در حضور متان در پلاسمای ثانویه، ثبت شده ۲۰ دقیقه پس از تولید، تحت برانگیزش لیزر ۵۳۲ نانومتر.

نکته مهم در این مجموعه داده‌ها، بررسی تغییرات طیفی پس از گذشت ۲۰ دقیقه از تولید نانوذرات است. در نمونه‌های حاوی متان، باند رامانی مربوط به سیلیکون حتی پس از این بازه زمانی همچنان قابل تشخیص باقی می‌ماند و افت شدیدی در شدت یا حذف کامل امضای فونونی مشاهده نمی‌شود. این پایداری نسبی طیف رامان نشان می‌دهد که ساختار نانوبلورین نانوذرات در برابر تغییرات سریع پس از تولید مقاوم شده است. چنین رفتاری را می‌توان به نقش متان در غیر فعال سازی شیمی سطح نانوذرات نسبت داد.

در محیط پلاسمای ثانویه، متان به راحتی دچار تفکیک شده و گونه‌های فعال هیدروکربنی نظیر CH_x و H تولید می‌کند. این گونه‌ها قادرند پیوندهای آویزان سطح سیلیکون را اشباع کرده و از تشکیل سریع پیوندهای Si-O در تماس با محیط جلوگیری نمایند. در نتیجه، لایه‌های سطحی نانوذرات از نظر شیمیایی پایدارتر شده و نرخ اکسیداسیون و بازآرایی ساختاری به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. از دیدگاه رامانی، این پسیوسازی سطحی منجر به حفظ نسبی پاسخ فونونی سیلیکون و جلوگیری از افزایش سهم نواحی آمورف می‌شود. بنابراین، حضور متان نه تنها بر فرآیند شکل‌گیری اولیه نانوذرات تأثیرگذار است، بلکه نقش مهمی در تثبیت ساختار آن‌ها در بازه زمانی پس از تولید ایفا می‌کند.

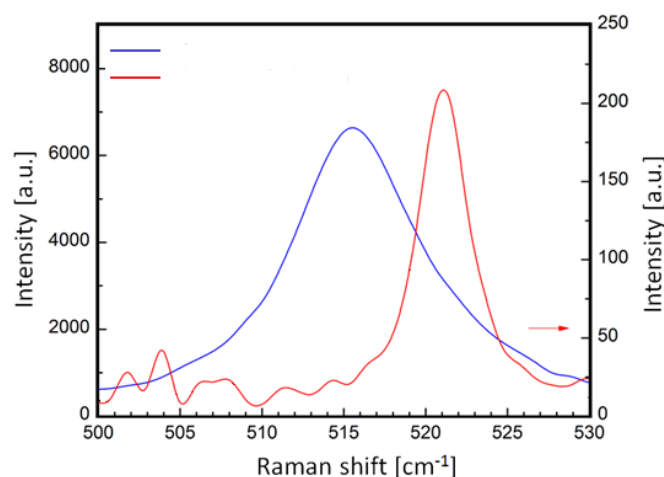
۳-۲-۲- مقایسه رفتار رامانی نانوذرات بدون متان و تحلیل اثر گذشت زمان

در مقابل، طیف‌های رامان مربوط به نانوذرات تولیدشده بدون متان (شکل‌های ۵ و ۶) رفتار متفاوت و از نظر پایداری ساختاری ضعیف‌تری را نشان می‌دهند. بلافاصله پس از تولید (شکل ۵)، همچنان یک باند پهن در حوالی ۵۱۳ تا ۵۱۷ cm^{-1} قابل مشاهده است که بیانگر تشکیل نانوذرات

در سیلیکون بلوری توده‌ای، مد فونونی عرضی-نوری (TO) به‌صورت پیک باریک و پرشدت در حوالی ۵۲۱-۵۲۰ cm^{-1} ظاهر می‌شود که نشان‌دهنده نظم بلوری بلندبرد و فقدان محدودیت فضایی برای ارتعاشات شبکه‌ای است. این رفتار در طیف مرجع سیلیکون به‌وضوح مشاهده می‌شود. در مقابل، در نانوذرات سیلیکونی، کاهش ابعاد بلوری، افزایش سهم سطح نسبت به حجم و وجود تنش‌ها و نقص‌های شبکه‌ای سبب می‌شود که رفتار فونون‌ها از حالت توده‌ای فاصله بگیرد. نتیجه این پدیده، جابجایی پیک رامان به سمت عدد موج‌های کمتر، پهن شدن باند و کاهش شدت نسبی آن است که همگی به‌طور مستقیم با اثر محبوس‌شدگی فونونی و افزایش بی‌نظمی ساختاری مرتبط هستند.

۳-۲-۱- اثر حضور متان در پلاسمای ثانویه بر ساختار و پایداری رامانی نانوذرات

طیف‌های رامان مربوط به نانوذرات تولیدشده در حضور متان در پلاسمای ثانویه (شکل‌های ۳ و ۴) نشان می‌دهند که بلافاصله پس از تولید، باند رامانی پهن با بیشینه‌ای در محدوده تقریباً ۵۱۵ تا ۵۱۷ cm^{-1} ظاهر می‌شود. این جابجایی نسبت به پیک مرجع سیلیکون بلوری بیانگر غالب بودن اثر محبوس‌شدگی فونونی است که معمولاً در نانوذرات با ابعاد چند نانومتر مشاهده می‌شود. پهنای قابل‌توجه این باند همچنین نشان‌دهنده وجود توزیع اندازه بلورک‌ها و حضور نواحی کم‌نظم در ساختار نانوذرات است. چنین رفتاری برای نانوذرات سیلیکونی سنتز شده در محیط پلازما کاملاً قابل انتظار بوده و با گزارش‌های پیشین در ادبیات علمی همخوانی دارد [۲۱، ۲۲].



شکل ۳: طیف رامان نانوذرات سیلیکونی تولیدشده در حضور متان در پلاسمای ثانویه، ثبت شده بلافاصله پس از سنتز، تحت برانگیزش لیزر ۵۳۲ نانومتر.

بدون متان فاقد پوشش غیرفعال کننده است، تماس با محیط منجر به واکنش سریع اکسیژن و رطوبت با سطح سیلیکون می‌شود. تشکیل لایه‌های اکسیدی آمورف و افزایش بی‌نظمی ساختاری باعث می‌شود مدهای فونونی سیلیکون بلوری دیگر به‌طور مؤثر در طیف رامان ظاهر نشوند. علاوه بر این، افزایش ضخامت لایه‌های بی‌نظم سطحی می‌تواند باعث کاهش حجم مؤثر نواحی بلوری قابل آشکارسازی شود و در نتیجه شدت سیگنال رامان به‌شدت افت کند.

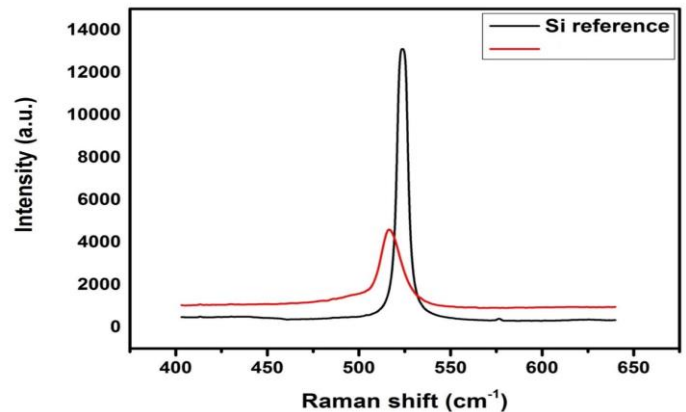
مقایسه جامع چهار طیف رامان نشان می‌دهد که اگرچه در هر دو شرایط تولید، در لحظه تولید نانوذراتی با ساختار نانوبلورین تشکیل می‌شوند، اما پایداری ساختاری و شیمی سطح نانوذرات به‌شدت وابسته به حضور متان در پلاسمای ثانویه است. در نمونه‌های دارای متان، تغییرات طیفی در بازه ۲۰ دقیقه محدود باقی می‌ماند و امضای سیلیکون حفظ می‌شود، در حالی که در نمونه‌های بدون متان، ساختار رامانی نانوذرات به‌سرعت دچار فروپاشی می‌شود. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که مهندسی شیمی پلازما از طریق افزودن متان می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش پایداری نانوذرات سیلیکونی و کنترل بی‌نظمی‌های سطحی مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳- تحلیل طیف FTIR نانوذرات سیلیکونی پس از ۲۰ دقیقه از تولید

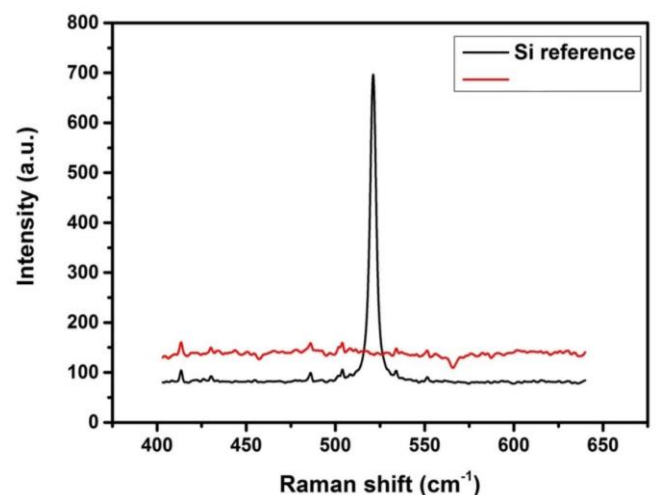
طیف‌سنجی FTIR به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بررسی شیمی سطح و نوع پیوندهای شیمیایی موجود در نانوذرات، نقش تعیین‌کننده‌ای در درک پایداری ساختاری نانوذرات سیلیکونی ایفا می‌کند. در سامانه‌های نانومقیاس، به دلیل نسبت بالای سطح به حجم، خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات بیش از آن‌که توسط هسته بلوری کنترل شوند، به ماهیت گروه‌های عاملی سطح وابسته‌اند. از این‌رو، بررسی طیف FTIR نانوذرات سیلیکونی ۲۰ دقیقه پس از تولید، اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی مسیرهای تحول سطحی، میزان اکسیداسیون، و نقش عوامل غیرفعال کننده در تثبیت ساختار نانوذرات فراهم می‌کند. در این مطالعه، طیف‌های FTIR مربوط به نانوذرات سیلیکونی تولیدی در دو حالت شامل حضور متان در پلاسمای ثانویه (منحنی آبی) و عدم حضور متان (منحنی قرمز) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند (شکل ۷).

در هر دو طیف، حضور باندهای مشخص در ناحیه‌ی حدود ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ cm^{-1} که به کشش نامتقارن پیوندهای Si-O-Si نسبت داده می‌شود، نشان‌دهنده‌ی وقوع اکسیداسیون سطحی در بازه زمانی ۲۰ دقیقه پس از تولید است. چنین رفتاری برای نانوذرات سیلیکونی کاملاً قابل انتظار است، زیرا سطح فعال این نانوذرات بلافاصله پس از تماس با محیط مستعد واکنش با اکسیژن و رطوبت می‌باشد. با این حال، مشاهده‌ی این باند لزوماً به معنی تشکیل یک لایه ضخیم و مخرب اکسیدی نیست، بلکه می‌تواند بیانگر شکل‌گیری یک پوسته نازک SiO_x باشد که بسته به شرایط شیمی سطح، می‌تواند نقش محافظ یا گذار را ایفا کند. در نمونه‌ی حاوی متان، حضور

سیلیکونی با ساختار نانوبلورین است. با این حال، شدت این باند نسبت به نمونه‌های دارای متان کمتر بوده و سطح زمینه طیف افزایش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده سهم بیشتر بی‌نظمی ساختاری و نقص‌های سطحی در نانوذرات تولیدشده بدون متان است.



شکل ۵: طیف رامان نانوذرات سیلیکونی تولیدشده بدون شارش متان، ثبت‌شده بلافاصله پس از سنتز، تحت برانگیزش لیزر ۵۳۲ نانومتر



شکل ۶: طیف رامان نانوذرات سیلیکونی تولیدشده بدون شارش متان، ثبت‌شده ۲۰ دقیقه پس از تولید نانوذرات، تحت برانگیزش لیزر ۵۳۲ نانومتر.

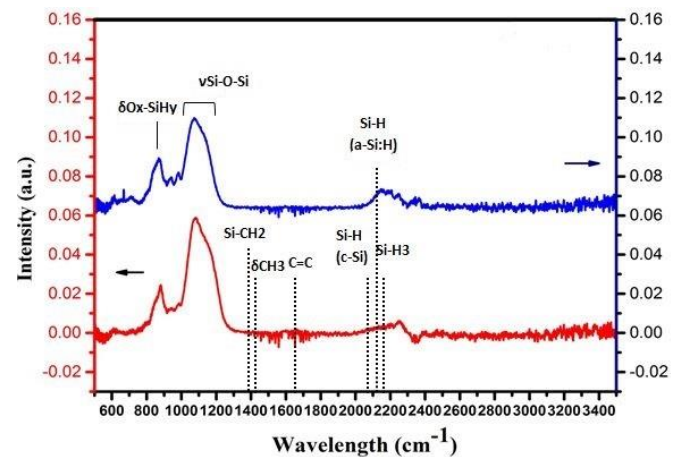
تفاوت اصلی و تعیین‌کننده در بررسی طیف رامان این نمونه‌ها پس از گذشت ۲۰ دقیقه نمایان می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طیف مشخصه سیلیکون در ناحیه ۵۲۰ cm^{-1} در نمونه بدون متان به‌شدت تضعیف شده و تقریباً از بین می‌رود، در حالی که پیک مرجع سیلیکون همچنان باریک و پرشدت باقی مانده است. این رفتار نشان می‌دهد که کاهش سیگنال رامان ناشی از محدودیت دستگاه یا شرایط اندازه‌گیری نیست، بلکه مستقیماً به تغییرات ساختاری نانوذرات مربوط می‌شود. تضعیف شدید پاسخ رامانی سیلیکون را می‌توان به اکسیداسیون سریع سطح نانوذرات و تشکیل لایه‌های آمورف SiO_x نسبت داد. از آنجا که سطح نانوذرات

می‌دهد که نقش غالب متان در این سامانه نه تشکیل یک پوشش ضخیم کربنی، بلکه ایجاد ترمینیشن‌های پایدارکننده (خصوصاً Si-H و ساختارهای گذار $\text{O}_x\text{-SiH}_y$) است. این امر سبب می‌شود که سطح نانوذرات در برابر جذب تصادفی گونه‌های آلی محیط نیز مقاوم‌تر عمل کند. با این وجود، احتمال مشارکت محدود گونه‌های کربنی در فرآیند پسیواسیون سطح را نمی‌توان به طور کامل رد کرد. حضور باندهای منتسب به گروه‌های هیدروکربنی در طیف FTIR نشان می‌دهد که بخشی از گونه‌های حاصل از تجزیه متان ممکن است روی سطح نانوذرات جذب شده باشند. با این حال، شدت غالب باندهای Si-H و SiH_x در مقایسه با باندهای مرتبط با پیوندهای کربنی نشان می‌دهد که مکانیزم اصلی پایداریسازی سطح در شرایط حاضر بیشتر ناشی از هیدروژنه‌شدن سطح و تشکیل ساختارهای اکسی‌هیدریدی سیلیکون است. برای تعیین قطعی سهم پوشش‌های کربنی احتمالی، انجام آزمون‌های تکمیلی نظیر XPS و یا Raman مربوط به باندهای D و G کربن در مطالعات آینده ضروری خواهد بود.

در مجموع، تحلیل طیف FTIR نانوذرات سیلیکونی پس از گذشت ۲۰ دقیقه از تولید نشان می‌دهد که مسیر تحول سطحی نانوذرات به‌شدت به حضور یا عدم حضور متان در پلاسمای ثانویه وابسته است. در نمونه‌ی با متان، سطح نانوذرات به‌واسطه‌ی ترکیبی از هیدروژنه‌شدن و تشکیل لایه‌های اکسیدی نازک و ساختارمند، به‌صورت نسبی پسیو شده و از نظر شیمیایی پایدارتر باقی می‌ماند. در مقابل، در نمونه‌ی بدون متان، کاهش سهم ترمینیشن‌های هیدروژنی و افزایش مسیرهای رقابتی اکسیداسیون و جذب گونه‌های آلی، منجر به سطحی فعال‌تر و ناپایدارتر می‌شود. این تفاوت شیمی سطحی به‌طور مستقیم می‌تواند تبیین‌کننده‌ی افت شدید امضای رامانی سیلیکون در نمونه‌های بدون متان و حفظ نسبی آن در نمونه‌های دارای متان باشد. بنابراین، نتایج FTIR در کنار داده‌های رامان به‌صورت مکمل نشان می‌دهند که تزریق متان در پلاسمای ثانویه نقش تعیین‌کننده‌ی در مهندسی شیمی سطح و افزایش پایداری زمانی نانوذرات سیلیکونی ایفا می‌کند.

به طور کلی، هم‌پوشانی نتایج رامان و FTIR نشان می‌دهد که نقش متان در پلاسمای ثانویه فراتر از یک گاز واکنش‌گر ساده است و به‌عنوان ابزاری برای مهندسی شیمی سطح نانوذرات عمل می‌کند. متان با فراهم کردن شرایط لازم برای هیدروژنه‌شدن و غیر فعال سازی سطح، مسیر تحول پسااستنز نانوذرات سیلیکونی را کنترل کرده و از فروپاشی سریع ساختار نانوبلورین جلوگیری می‌کند. این موضوع نه‌تنها اهمیت انتخاب ترکیب گازهای پلاسم را در فرآیند سنتز نانوذرات برجسته می‌سازد، بلکه نشان می‌دهد که کنترل شیمی سطح در همان مرحله تولید می‌تواند جایگزین یا مکمل مناسبی برای فرآیندهای پس‌فرآیندی پیچیده باشد. چنین رویکردی از دیدگاه کاربردی، برای استفاده از نانوذرات سیلیکونی در سامانه‌های اپتوالکترونیکی، فوتونیکی و انرژی که پایداری زمانی و کنترل سطح اهمیت بالایی دارد، بسیار حائز اهمیت است.

هم‌زمان باندهای Si-O-Si و گونه‌های اکسی‌هیدریدی سیلیکون ($\delta\text{O}_x\text{-SiH}_y$) در ناحیه‌ی حدود 800 تا 900 cm^{-1} نشان می‌دهد که سطح نانوذرات در این حالت به‌صورت یک ساختار گذار شامل اکسید نازک به‌همراه ترمینیشن‌های هیدروژنی شکل گرفته است؛ ساختاری که معمولاً از نظر شیمیایی پایدارتر از یک سطح کاملاً اکسیدشده یا کاملاً فعال محسوب می‌شود.



شکل ۷: طیف FTIR نانوذرات سیلیکونی ثبت شده ۲۰ دقیقه پس از سنتز برای نمونه‌ی بدون متان (منحنی قرمز) و نمونه‌ی سنتز شده در حضور متان در پلاسمای ثانویه (منحنی آبی)

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های دو طیف FTIR در ناحیه‌ی 1900 cm^{-1} تا 2200 cm^{-1} مشاهده می‌شود که به ارتعاشات کششی پیوندهای Si-H و گونه‌های SiH_x اختصاص دارد. در نمونه‌ی تولیدی با متان، حضور باندهای مشخص منتسب به Si-H در سیلیکون بلوری و نیز Si-H در سیلیکون آمورف هیدروژنه، بیانگر آن است که سطح نانوذرات به‌طور مؤثری توسط هیدروژن اشباع شده است. این هیدروژنه‌شدن سطحی، دانگلینگ‌باند‌های سیلیکون را غیرفعال کرده و احتمال واکنش آن‌ها با اکسیژن را کاهش می‌دهد. در مقابل، در نمونه‌ی بدون متان، شدت این باندها به‌مراتب کمتر بوده یا به‌صورت ضعیف ظاهر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی کاهش سهم پایانه‌های هیدروژنی و فعال‌تر باقی ماندن سطح نانوذرات است. این تفاوت شیمی سطحی، نقش کلیدی در رفتار زمانی نانوذرات ایفا می‌کند و به‌طور مستقیم با نتایج طیف‌سنجی رامان هم‌راستا است. در ناحیه‌ی 1200 تا 1700 cm^{-1} ، باندهایی منتسب به پیوندهای Si-CH_2 ، خمشی CH_3 و همچنین ارتعاشات C=C مشاهده می‌شود که به حضور گونه‌های هیدروکربنی سطحی اشاره دارد. در نمونه‌ی بدون متان، ظهور این باندها می‌تواند ناشی از جذب ترکیبات آلی موجود در محیط یا رسوب ناخواسته‌ی گونه‌های کربنی با منشأ باقیمانده‌های گازی یا دیواره‌های سامانه پلاسم باشد. از آنجا که سطح نانوذرات در این حالت فاقد غیرفعال‌سازی سطح مؤثر است، تمایل بیشتری به جذب چنین گونه‌هایی دارد. در مقابل، در نمونه‌ی با متان، اگرچه انتظار حضور گونه‌های مرتبط با هیدروکربن‌ها وجود دارد، اما داده‌ها نشان

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ساختار و پایداری زمانی نانوذرات سیلیکونی تولیدشده در یک سامانه پلاسما با تمرکز بر نقش متان در پلاسمای ثانویه، با استفاده از طیف‌سنجی رامان و FTIR بررسی شد. نتایج رامان نشان داد که در هر دو شرایط سنتز، نانوذرات در لحظه تولید دارای ساختار نانوبلورین هستند که از جابجایی پیک فونونی سیلیکون از موقعیت مرجع $520-521 \text{ cm}^{-1}$ و پهن شدن باند رامانی ناشی از اثر محبوس‌شدگی فونونی استنباط می‌شود. با این حال، پایداری این ساختار در گذر زمان به‌طور معناداری به حضور متان وابسته است. در نمونه‌های تولیدشده بدون متان، طیف مرجع رامان برای سیلیکون پس از ۲۰ دقیقه به‌سرعت تضعیف شده یا از بین می‌رود که بیانگر وقوع سریع تغییرات سطحی، افزایش بی‌نظمی ساختاری و رشد فازهای آمورف یا اکسیدی است. در مقابل، در نمونه‌های سنتز شده در حضور متان، پاسخ رامانی سیلیکون در همین بازه زمانی حفظ می‌شود که نشان‌دهنده کاهش نرخ تحول پسا‌سنتز و پایداری بیشتر ساختار نانوبلورین است. تحلیل FTIR این رفتار متفاوت را به‌خوبی تبیین می‌کند؛ به‌طوری‌که حضور متان منجر به شکل‌گیری ترمینیشن‌های هیدروژنی و گونه‌های اکسی‌هیدریدی پایدار روی سطح نانوذرات می‌شود، در حالی‌که در غیاب متان، سطح نانوذرات فعال باقی مانده و مستعد اکسیداسیون سریع است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که متان در پلاسمای ثانویه نقش کلیدی در مهندسی شیمی سطح نانوذرات سیلیکونی ایفا کرده و از طریق پیوسازی سطح، پایداری زمانی و حفظ ساختار نانوبلورین را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر آن است که کنترل ترکیب گازهای پلاسما می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ساده و کارآمد برای تولید نانوذرات سیلیکونی پایدار و قابل‌کاربرد در سامانه‌های اپتوالکترونیکی و انرژی‌محور مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [4] Jariwala BN, Dewey OS, Stradins P, Ciobanu CV, Agarwal S. In situ gas-phase hydrosilylation of plasma-synthesized silicon nanocrystals. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2011;3(8):3033-3041.
- [5] Mandracci P, Rivolo P. Recent advances in the plasma-assisted synthesis of silicon-based thin films and nanostructures. *Coatings*. 2023;13(6):1075.
- [6] Pierson HO. *Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications*. William Andrew; 1999.
- [7] Ohring M. *Materials science of thin films*. 2nd ed. Academic Press; 2002.
- [8] Kortshagen U. Nonthermal plasma synthesis of nanocrystals: fundamentals, applications, and future research needs. *Plasma Chem Plasma Process*. 2016;36(1):73-84.
- [9] Mangolini L. Synthesis, properties, and applications of silicon nanocrystals. *J Vac Sci Technol B*. 2013;31(2).
- [10] Doğan İ, Weeks SL, Agarwal S, van de Sanden M. Nucleation of silicon nanocrystals in a remote plasma without subsequent coagulation. *J Appl Phys*. 2014;115(24).
- [11] Capitelli M, Colonna G, D'Angola A. *Fundamental aspects of plasma chemical physics*. Vol. 66. New York: Springer; 2012.
- [12] Kortshagen U. Nonthermal plasma synthesis of semiconductor nanocrystals. *J Phys D Appl Phys*. 2009;42(11):113001.
- [13] Zhao T, Qin Y, Wang B, Yang JF. Comparative study of hydrogen and argon dilution effects in amorphous SiC thin films

- [1] Cullis AG, Canham LT. Visible light emission due to quantum size effects in highly porous crystalline silicon. *Nature*. 1991;353(6342):335-338.
- [2] Li X, He Y, Swihart MT. Surface functionalization of silicon nanoparticles produced by laser-driven pyrolysis of silane. *Langmuir*. 2004;20(11):4720-4727.
- [3] Pavesi L, Turan R, editors. *Silicon nanocrystals: fundamentals, synthesis and applications*. Wiley; 2010.

- [20] Bettotti P, Cazzanelli M, Dal Negro L, Danese B, Gaburro Z, Oton CJ, et al. Silicon nanostructures for photonics. *J Phys Condens Matter*. 2002;14(35):8253-8281.
- [21] Richter, H., Wang, Z. P., & Ley, L. (1981). The one phonon Raman spectrum in microcrystalline silicon. *Solid State Communications*, 39(5), 625–629.
- [22] Campbell, I. H., & Fauchet, P. M. (1986). The effects of microcrystal size and shape on the one phonon Raman spectra of crystalline semiconductors. *Solid State Communications*, 58(10), 739–741.
- deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. *J Nanosci Nanotechnol*. 2015;15(9):7371-7375.
- [14] Matsui T, Sai H, Bidiville A, Hsu HJ, Matsubara K. Progress and limitations of thin-film silicon solar cells. *Solar Energy*. 2018;170:486-498.
- [15] Mangolini L, Thimsen E, Kortshagen U. High-yield plasma synthesis of luminescent silicon nanocrystals. *Nano Lett*. 2005;5(4):655-659.
- [16] León-Guillén R, Muñoz-Rosas AL, Arenas-Alatorre JA, Alonso-Huitrón JC, Pérez-Martínez AL, Rodríguez-Gómez A. Experimental study of the influence of CH₄ and H₂ on the conformation, chemical composition, and luminescence of silicon quantum dots inlaid in silicon carbide thin films grown by remote plasma-enhanced chemical vapor deposition. *ACS Omega*. 2022;7(23):19640-19647.
- [17] Ali AM, Inokuma T, Kurata Y, Hasegawa S. Effects of addition of SiF₄ during growth of nanocrystalline silicon films deposited at 100 °C by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Jpn J Appl Phys*. 1999;38(10R):6047.
- [18] Mangolini L. Synthesis, properties, and applications of silicon nanocrystals. *J Vac Sci Technol B*. 2013;31(2).
- [19] Ehrenberg SK, Hunter KI, Kortshagen UR. Silicon nanocrystals from plasma synthesis. In: *Silicon nanomaterials sourcebook*. CRC Press; 2017. P. 271-292.



Effect of Gas Type on the Morphology and Shape of Nanoparticles Synthesized Using Atmospheric-Pressure Plasma

Z. Dehghani*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Received: 2026-02-21

Revised: 2026-04-12

Accepted: 2026-04-30

Abstract: In this study, the synthesis of nanoparticles in a plasma system was investigated with a particular focus on the role of methane in the secondary plasma and its influence on the structural characteristics and temporal stability of the nanoparticles. Nanoparticles were synthesized under two different conditions, namely with and without methane injection, and their structural evolution was analyzed immediately after synthesis and 20 minutes later using Raman spectroscopy (532 nm excitation) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Raman results revealed that nanoparticles synthesized under both conditions exhibit a nanocrystalline structure at the initial stage, as evidenced by the red-shift and broadening of the silicon optical phonon peak relative to bulk crystalline silicon, indicating pronounced phonon confinement effects. However, in the absence of methane, the Raman signature of silicon was significantly weakened after 20 minutes, whereas it was well preserved in the methane-assisted samples. These results indicate that methane plays a key role in surface chemistry engineering and significantly enhances the temporal stability of plasma-synthesized silicon nanoparticles, providing an efficient strategy for producing stable silicon nanomaterials for advanced applications.

Keywords: nanoparticles, Secondary plasma, Methane Gas, Raman spectroscopy, Surface chemistry

Corresponding Author. Email: dehghanyz93@gmail.com

How to Cite This Article:

Dehghani Z. Effect of Gas Type on the Morphology and Shape of Nanoparticles Synthesized Using Atmospheric-Pressure Plasma. Nanomeghyas. 2026;():e738271 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2086245.1424



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).