



بررسی فنی و اقتصادی فناوری‌های نوین تولید ویفرهای سیلیسیمی با ضخامت پایین جهت استفاده در پنل‌های خورشیدی

آرش خاکزاد شاهاندشتی^{۱*}، محسن پیرمحمدی^۲

۱- دکتری تخصصی، مهندسی مواد، معاونت پژوهش و فناوری مپنا، تهران، ایران

۲- دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، معاونت پژوهش و فناوری مپنا، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۳۹۵/۶۴۴۸، khakzad_a@mapnagroup.com

چکیده

ویفرهای سیلیسیمی پلی کریستال امروزه از طریق احیا کربوترمیک اکسید سیلیسیم در کوره قوس الکتریکی تولید می‌شود. در تلاش برای کاهش هزینه‌های تولید ویفر سیلیسیمی، شرکت‌های پیشرو در این عرصه با ارائه فناوری‌های نوظهور هزینه تولید ویفرهای سیلیسیم را به یک سوم هزینه‌های مرسوم کاهش داده‌اند. این مقاله به ارائه روش‌هایی اختصاص دارد که ویفر سیلیسیم بدون برش با اره و با حداقل مواد ضایعات را تولید می‌کند. این روش بسیار کم‌هزینه تر از روش مرسوم با ضایعات بالا در تولید شمش سیلیسیم و برش با اره در صنعت فوتولتائیک است. تولید این ویفرها با اندازه استاندارد به کار رفته در سلول خورشیدی با سرعت بالاتر و هزینه کمتر پیشرفت‌های زیادی در زنجیره ارزش پنل‌های خورشیدی سیلیسیمی ایجاد کرده است. در روش‌های مرسوم تولید ویفر که به وسیله برش شمش انجام می‌شود، مواد زیادی در اثر برخورد با تیغه‌های برنده به عنوان ضایعات تولید می‌شود. مشخصات ویفرهای تولید شده با فناوری‌های نوین از لحاظ ضخامت، تغییرات کل ضخامت (TTV)، زبری و خواص مکانیکی بالاتر و بهتر از ویفرهای تولید شده با فناوری‌های مرسوم است. این ویژگی‌های منحصر به فرد از عوامل فعال‌کننده این فناوری در آینده خواهد بود.

کلیدواژگان: ویفر سیلیسیم با ضخامت بسیار پایین، تولید ویفر سیلیسیمی با روش کاشتنی و برش، تولید ویفر سیلیسیمی با برداشتن به وسیله تنش، تغییرات ضخامت ویفرهای سیلیسیمی



Technical and economical analysis of emerging technologies for production of low thickness solar cell silicon wafers

Arash Khakzadshahandashti^{1*}, Mohsen Pirmohammadi²

1- PhD, Research and technology department, Mapna group, Tehran, Iran

2- PhD, Research and technology department, Mapna group, Tehran, Iran

* P.O.B. 19395/6448, Tehran, Iran, khakzad_a@mapnagroup.com

Received: 27 June 2020 Accepted: 6 September 2020

Abstract

Polycrystalline silicon wafers are produced by carbothermic reduction of silicon oxides in electric arc furnaces. Leader silicon wafer producer companies use emerging production technologies to reduce the production cost of silicon wafers. These efforts lead to reduce the production cost of silicon wafers by 66%. Emerging technologies for production of kerfless silicon wafers with the low thickness are studied in this paper. Using of these technologies in comparison with the conventional production methods lead to reduce the production cost remarkably. These emerging technologies improved the value chain of silicon wafers of solar cell panels. Conventional methods of silicon wafers manufacturing produce high amount of kerf. Wafers produced with these emerging methods have good technical specifications such as thickness, total thickness variation and mechanical properties. These are drivers of the future of this technology.

Keywords: low thickness silicon wafers, implant and cleave, stress liftoff, total thickness variation

۱- مقدمه

توانایی افزودن مواد افزودنی در حین تولید ویفر از سیلیسیم مذاب و کنترل دقیق غلظت آن

توانایی کنترل ضخامت ویفرهای سیلیسیم. این ویژگی این امکان را ایجاد می‌کند که ویفرهای باریک‌تر با ابعاد استاندارد و با استحکام مناسب تولید کند [۲ و ۳ و ۶].

در روش‌های مرسوم تولید ویفر که به وسیله برش شمش انجام می‌شود، مواد زیادی در اثر برخورد با تیغه‌های برنده به عنوان ضایعات^۷ تولید می‌شود. روش تولید ویفر بدون برش با اهر توانایی ایجاد ویفرهای سیلیسیم با حداقل مواد ضایعات را داراست. علاوه بر شرکت 1366 technologies شرکت‌های گوناگون دیگری مانند SiGen چینی، Crystal Solar، Solexel، Twin Creeks، Ampulse، Evergreen solar، Solivo A.G، Varian، IMEC و Astrowatt فناوری‌های متفاوت به منظور تولید ویفر با حداقل ضایعات ناشی از برش را ارائه کرده‌اند. تفاوت این فناوری‌ها عمدتاً در جزئیات است. این مقاله به مطالعه فناوری‌های نوین شامل دو روش اصلی به کار گرفته شده خواهد پرداخت. این روش‌ها شامل استفاده از کاشتنی و برش^۸ و برداشتن به وسیله تنش^۹ می‌باشد. در روش کاشتنی و برش، برخورد یون‌های کاشتنی با سیلیسیم بلوری به منظور صفحه‌ای جهت شکاف در سراسر شبکه بلوری انجام می‌شود که یک ویفر باریک از بلور استخراج شود. در روش برداشتن به وسیله برش، ویفر نازک سیلیسیم از طریق تنش ناشی از رسوب‌گذاری یک فیلم نازک^{۱۰} بر سیلیسیم ایجاد خواهد شد.

اساس فرایند کاشتنی و برش، شکاف صفحات کریستالی بلوک سیلیسیم در اثر القای پرتو یونی می‌باشد. از آنجایی که ساختار ویفرهای سیلیسیم به شکل کریستالی است، می‌توان با استفاده از ایجاد صفحات تورق^{۱۱} در ساختار کریستالی فرایند برش بخشی از کریستال در ریزساختار را انجام داد. این فرایند توانایی تولید ویفرهای با کیفیت بالا با ضخامت ۲۰ تا ۱۵۰ میکرومتر را داراست. این روش شامل دو مرحله است که به صورت مداوم ادامه می‌یابد تا بلوک سیلیسیم را تماماً به ویفرهای سیلیسیم تبدیل کند. در مرحله اول یک پرتو پر انرژی شامل یون‌های هیدروژن (پروتون) بر سطح شمش سیلیسیم به منظور تشکیل صفحه شکاف در داخل کریستال تابانده می‌شود که وقتی این مرحله با شکاف صفحه همراه باشد ویفرهای با ابعاد ۱۲۵×۱۲۵ و ۱۵۶×۱۵۶ تولید می‌کند. انرژی پرتو یونی تعیین‌کننده ضخامت ویفر شکافته شده می‌باشد. ضخامت ویفر سیلیسیم از طریق عمق نفوذ پروتون‌های کاشته شده در داخل کریستال و انرژی پرتو یونی کنترل می‌شود [۷]. انرژی ۱ تا ۴ مگا الکترون ولتی برای ساخت ویفرهایی با ضخامت ۲۰ تا ۱۵۰ میکرون نیاز است. به طور مثال یک پرتو ۲ مگا الکترون ولتی یک ویفر ۵۰ میلیمتری و یک پرتو ۳ مگا الکترون ولتی ویفر با ضخامت ۸۵ میکرون را ایجاد می‌کند. پس از جدا شدن ویفر از شمش سیلیسیم از طریق یک مرحله شکافتن کنترل شده، مجدداً سطح جدید شمش مورد اصابت پرتو یونی قرار می‌گیرد تا تمامی شمش به ویفر تبدیل شود. برخلاف استفاده از فرایند مرسوم برش از طریق اهر، استفاده از فرایند فوق‌الذکر سبب کاهش ضایعات مواد ناشی از برش مواد سیلیسیم خواهد

ویفرهای سیلیسیم پلی کریستال امروزه از طریق احیا کربوترمیک اکسید سیلیسیم در کوره قوس الکتریکی تولید می‌شود. به طور خلاصه فرایند تولید سلول‌های خورشیدی شامل تولید گرید سیلیسیم متال^۱ با فرایند احیا کربوترمیک^۲، تصفیه سیلیسیم متال با روش‌های شیمیایی و یا روش‌های متالورژیکی به سیلیسیم پلی کریستال گرید خورشیدی^۳، تولید ویفر و در نهایت ساخت سلول خورشیدی می‌باشد. این پروسه میزان زیادی سرباره و دیگر ضایعات تولید می‌کند و همچنین برای برش به میزان زیادی سیم نیاز دارد [۱]. شرکت 1366 technologies سایت خود با مساحت تقریباً ۴۰۰۰ مترمربع و ظرفیت ۲۵ مگاوات در بدفورد^۴ را آغاز به کار کرد. ظرفیت ۲۵ مگاواتی در این نیروگاه خورشیدی به ۶ میلیون ویفر سیلیسیم در سال نیازمند می‌باشد. شرکت 1366 technologies از یک محفظه برای ذوب سیلیسیم استفاده می‌کند که یک ویفر سیلیسیم در بالای آن تولید می‌شود. سپس از طریق لیزر زوائد آن بریده می‌شود تا به اندازه استاندارد ۱۵۶×۱۵۶ میلیمتر برسد. تکنولوژی تولید این ویفرها به روش تولید مستقیم ویفر^۵ مرسوم است [۲ و ۳].

طبق ادعای مطرح شده توسط این شرکت قیمت ویفرهای سیلیسیم تولید شده با این روش به یک سوم هزینه تولید شده با روش مرسوم کاهش خواهد یافت. این شرکت عنوان کرد که بازده سلول‌های خورشیدی ساخته شده از این ویفرها ۱۷ درصد می‌باشد که با میانگین بازده در این صنعت قابل قیاس است. هم‌اکنون شرکت 1366 بر روی ارتقای تجهیزاتش از نسل صفر به نسل ۱ کار می‌کند. این تغییرات تکنولوژی در نسل ۱، به ارتقای اتوماسیون تجهیزات تولید ویفر سیلیسیم اختصاص دارد. نسل ۲ تجهیزات هم به ارتقای طراحی و اتوماسیون تجهیزات اختصاص دارد که شش برابر سرعت تولید را افزایش خواهد داد. هم‌اکنون هزینه تولید ویفرهای سیلیسیم به روش‌های مرسوم به ۰.۲۹ دلار در هر وات رسیده است که شرکت 1366 این هزینه را به ۰.۱ دلار در هر وات کاهش داده است که تقریباً یک سوم هزینه مرسوم است [۴].

۲- فناوری‌های نوین تولید ویفر سیلیسیم

در فرایند تولید مستقیم، ویفرهای سیلیسیم با کارایی بالا و بدون برش^۶ به طور مستقیم از مذاب سیلیسیم تولید می‌شود. که این روش بسیار کم‌هزینه تر از روش با ضایعات بالای تولید شمش سیلیسیم و برش با اهر مرسوم در صنعت فوتولتائیک است. تولید این ویفرها با اندازه استاندارد به کار رفته در سلول خورشیدی با سرعت بالاتر و هزینه کمتر پیشرفت‌های زیادی در زنجیره ارزش پنل‌های خورشیدی سیلیسیم ایجاد کرده است. فناوری تولید مستقیم ویفر ویژگی‌های جدیدی در ویفرهای تولیدی از جمله افزایش کارایی و کاهش هزینه ویفر پلی کریستال ایجاد می‌شود. این ویژگی‌ها شامل موارد ذیل می‌باشد:

¹ Metallurgical - grade silicon

² Carbothermic reduction

³ Solar - grade silicon

⁴ Bedford

⁵ Direct Wafer®

⁶ kerfless

⁷ kerf

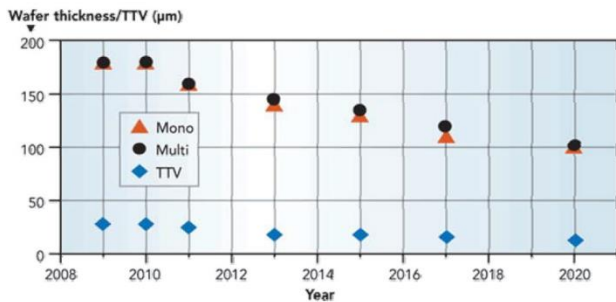
⁸ Implant and cleave

⁹ Stress liftoff

¹⁰ Thin film

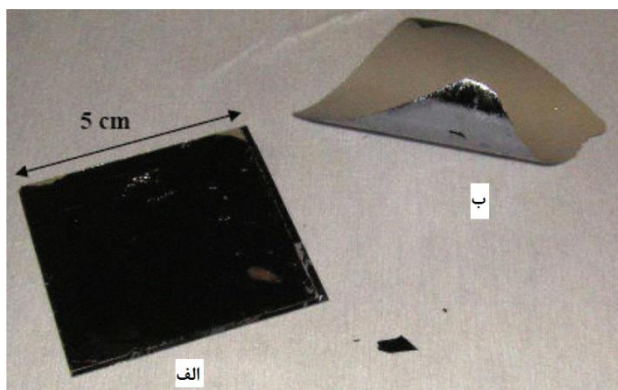
¹¹ Cleavage





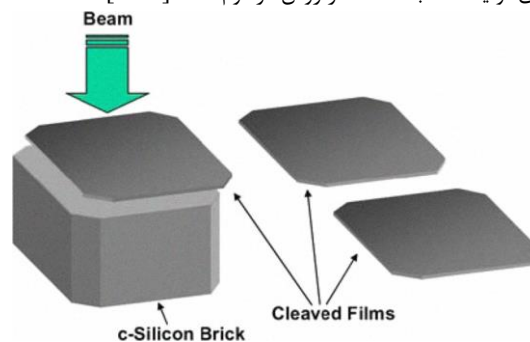
شکل ۲ ضخامت و تغییرات کل ضخامت ویفرهای تولید شده با استفاده از فناوری برش مرسوم [۱۱].

در فناوری برداشتن به وسیله تنش ماده اولیه یک زیرلایه^۲ سیلیسیمی (به شکل شمش و یا بلوک) می باشد. یک لایه فلزی بر سطح بالایی زیرلایه پرینت می شود و سپس مجموعه در دمای بالا تحت عملیات حرارتی آنیلینگ قرار می گیرد. در حین خنک شدن، لایه فلزی به همراه زیرلایه سیلیسیمی تحت تنش های حرارتی ناشی از انقباض قرار می گیرد. عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی بین فلز و سیلیسیم میدان تنش بالایی را در زیرلایه ایجاد می کند. به منظور آزادسازی تنش در سیستم، لایه فلزی به طور ناگهانی نیرویی را به زیرلایه وارد می کند و به طور همزمان لایه های سیلیسیمی به ضخامت ۴۰ تا ۵۰ میکرون از زیرلایه جدا می شود (شکل ۳ و ۴). این زیرلایه همچنان که به لایه فلزی متصل است از کل سطح جدا می شود. تعداد بالایی از این لایه های نازک سیلیسیمی از شمش اولیه با استفاده از این روش تولید خواهد شد. سپس لایه فلزی به وسیله محلول اچ از سطح ویفر زدوده می شود [۱۲]. شکل ۵ مربوط به تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه جدا شده با ضخامت ۴۰ تا ۵۰ میکرون از شمش زیرلایه می باشد. البته فناوری های دیگری مشابه این روش با استفاده از زیرلایه سیلیسیمی با تخلخل بالا^۳ [۱۳] ارائه شده که در کلیات مشابه این روش می باشد [۱۲].



شکل ۳ الف- تصویر لایه فلزی ایجاد شده بر زیر لایه سیلیسیمی و ب- لایه سیلیسیم جدا شده به وسیله تنش به همراه لایه فلزی [۱۲].

شد. این امر سبب جذابیت های اقتصادی فرایند خواهد شد که علاوه بر موارد ذکر شده در این مقاله، وزن سیلیسیم مورد نیاز در این روش با ضخامت ۱۵۰ میکرون به ۲.۵ g/W کاهش می یابد. این امر سبب کاهش هزینه تولید ویفر سیلیسیم پلی کریستال به ۵۰ دلار در هر کیلوگرم خواهد شد. این امر کاهش ۶۰ درصدی در هزینه مواد سیلیسیمی را در پی دارد. کاهش بیشتر در هزینه مواد از طریق تولید ویفرهای سیلیسیمی با ضخامت کم تر میسر خواهد بود [۸]. به علاوه نتایج تست های خواص مکانیکی در جدول ۱ نشان داده که تنش شکست ویفرهای تولید شده با این روش تقریباً برابر و یا بیشتر از ویفرهای تولید شده با استفاده از روش مرسوم است [۸-۱۰].



شکل ۱ فناوری تولید ویفر سیلیسیمی کریستال با استفاده از روش برش با پرتو [۷].

جدول ۱ مقایسه نتایج نیروی شکست بر سطح مقطعی با قطر ۴ میلیمتر از ویفرهای تولید شده با فناوری برش مرسوم و فناوری برش از طریق پرتو یونی [۸].

نیروی شکست (نیوتن)	ضخامت (میکرون)	برش
۲۸۶	۲۳۰	اره سیمی
۴۳	۸۵	شکاف با پرتو
۵۹.۷	۱۰۰	شکاف با پرتو

همچنین قابل ذکر است که تغییرات کل ضخامت^۱ در ویفر تولید شده یا فناوری فوق الذکر با ضخامت ۱۵۰ میکرون $\pm 2 \mu m$ و ویفر تولید شده با ضخامت ۲۰ میکرون $\pm 0.2 \mu m$ می باشد. این ویژگی منحصر به فرد از عوامل فعال کننده این فناوری در آینده خواهد بود [۸]. ضخامت ویفرهای تولیدی با استفاده از فناوری برش مرسوم در نقشه راه فناوری منتشر شده به وسیله شرکت فوتولتایک SEMI در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۱]. مشخصات ویفرهای تولید شده با فناوری فوق الذکر از لحاظ ضخامت، تغییرات کل ضخامت (TTV)، زبری و خواص مکانیکی بالاتر و بهتر از ویفرهای تولید شده در نقشه راه با فناوری مرسوم است.

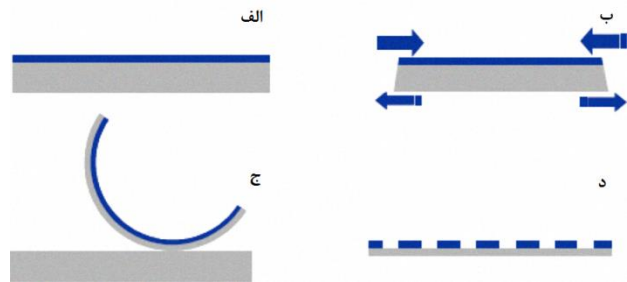


² substrate
³ Porous

¹ Total thickness variation (TTV)

جدول ۲ مقایسه روش‌های ساخت ویفرهای سیلیسیم پلی کریستال با ضخامت پایین.

روش	فاز	منبع سیلیسیم	قابلیت صنعتی شدن
کاشتنی و برش	جامد	کریستال سیلیسیم	بالا
برداشتن به وسیله تنش	جامد	زیرلایه سیلیسیم	متوسط
رسوب دهی شیمیایی با بخار	گاز	راکتور CVD	پایین
برش تسمه ویفر با سیم	مایع	مذاب سیلیسیم	متوسط



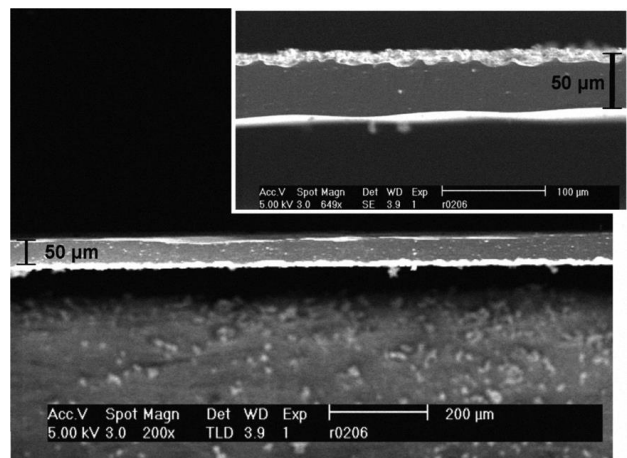
شکل ۴ شماتیک روش تولید ویفر سیلیسیم با ضخامت پایین با استفاده از روش برداشتن به وسیله تنش الف- رسوب دهی لایه فلزی، ب- کاهش دما و اعمال تنش، ج- جدا شدن لایه بالایی و د- تمیزکاری به وسیله محلول اچ شیمیایی [۱۲].

۳- جمع بندی

ویژگی‌های فنی فناوری‌های نوین مربوط به تولید ویفر سیلیسیم بلوری با ضخامت پایین ارائه شد. ویفرهای سیلیسیم بلوری تولید شده با فناوری‌های نوین از لحاظ مشخصات فنی مانند ضخامت، وزن، تنش شکست، تغییرات ضخامت و همچنین مشخصات اقتصادی از قبیل کاهش هزینه به ازای تولید مشخص، میزان وزن به ازای تولید ۱ وات و سایر مشخصات با سیلیسیم تولید شده با روش‌های مرسوم مقایسه شد. روش‌های نوین ارائه شده توانایی تولید ویفرهای سیلیسیم بلوری با ضخامت ۲۰ تا ۱۵۰ میکرون بدون ضایعات و با خواص مدنظر را داراست. لذا فناوری‌های نوظهور ارائه شده به عنوان رویکردی اقتصادی در جهت کاهش هزینه‌ها در زنجیره تأمین تولید ویفرهای سیلیسیم جهت کاربرد در صنعت فوتوولتائیک در آینده مطرح خواهد شد.

۴- مراجع

- [1] Kakalash, B.S. and Tangstad, M., Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells, *Chem Technol*, (March), pp.6-9, 2012.
- [2] Van Mierlo, F., Jonczyk, R. and Qian, V., Next generation Direct Wafer® technology delivers low cost, high performance to silicon wafer industry. *Energy Procedia*, Vol. 130, pp.2-6, 2017.
- [3] Lorenz, A., Kerfless Silicon Precursor Wafer Formed by Rapid Solidification: *October 2009-March 2010* (No. NREL/SR-5200-51934). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2011.
- [4] Montgomery, J., 1366 Technologies Opens New Factory. *Paves Road to Cheaper Solar PV*, *RenewableEnergyWorld*, 1, 2013.
- [5] Brailove, A., Kang, S., Fujisaka, A. and Henley, F., First demonstration of high volume manufacturing of kerf-free polymax wafers. In *Proc. of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conf* (p. 1613), 2010.
- [6] Fujisaka, A., Keeping Pace with Cost Reduction as Module Prices Continue to Decline. *Photovoltaics World*, pp.38-41, 2010.
- [7] Henley, F., Kang, S., Liu, Z., Tian, L., Wang, J. and Chow, Y.L., June. Beam-induced wafering technology for kerf-free thin PV manufacturing. In *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 001718-001723). IEEE, 2009.
- [8] Fujisaka, A., Kang, S., Tian, L., Chow, Y.L. and Belyaev, A., Implant-cleave process enables ultra-thin wafers without kerf loss. *Photovoltaics World*, pp.21-24, 2011.
- [9] Standard, A.S.T.M., Standard test method for monotonic equibiaxial flexural strength of advanced ceramics at ambient



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لایه جدا شده پس از جدا سازی لایه نازک فلزی [۱۲].

به منظور تولید ویفرهای سیلیسیم پلی کریستال باریک و کاهش ضایعات و حذف مرحله برش، روش‌های دیگری نیز وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار^۱ می‌باشد. در این روش پیش‌ماده‌ها تبخیر شده و وارد راکتوری به منظور جذب سطحی بر روی یک زیرلایه مشخص خواهند شد. سیلیسیم لایه نازک رسوب داده شده با کنترل دما و باقی شرایط فرایندی ایجاد خواهد شد. استفاده از این روش نیاز به تجهیزات گران قیمتی ندارد و همچنین پتانسیل بالایی برای صنعتی شدن وجود دارد. اما کنترل دمای بالا در این فرایند دشوار است و به شدت بر خواص ریزساختاری و خواص فیزیکی فیلم رسوب داده شده تأثیرگذار است. از دیگر معایب این روش مصرف انرژی بالا می‌باشد [۱۴].

روش برش تسمه ویفر سیلیسیم با سیم^۲ از دیگر روش‌های مطرح شده در ساخت ویفرهای نازک است. در این روش تسمه‌های ناک سیلیسیم از بین دو سیم از داخل مذاب سیلیسیم خارج می‌شود. از جمله معایب این روش می‌توان به سرعت پایین تولید و هزینه بالای تولید این روش اشاره کرد [۱۵]. با توجه به مطالب ذکر شده از مزایا و معایب روش‌های ذکر شده، جدول ۲ نشان‌دهنده مقایسه این روش‌ها از منظر شاخص‌های صنعتی می‌باشد.

¹ Chemical vapor deposition (CVD)
² String ribbon



- temperature. *Standard ASTM C1499-04*, West Conshohocken, 2005.
- [10] Coletti, G., Van Der Borg, N.J.C.M., De Iulius, S., Tool, C.J.J. and Geerligs, L.J., Mechanical strength of silicon wafers depending on wafer thickness and surface treatment, Vol. 2000, No.80, p.86, 2006.
- [11] SEMI PV Group, PV Technology Roadmap Forum. *Germany, June, 2010*.
- [12] Dross, F., Milhe, A., Robbelein, J., Gordon, I., Bouchard, P.O., Beaucarne, G. and Poortmans, J., May. Stress-induced lift-off method for kerf-loss-free wafering of ultra-thin ($\sim 50 \mu\text{m}$) crystalline Si wafers. In *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 1-5). IEEE, 2008.
- [13] Kajari-Schröder, S., Käsewieder, J., Hensen, J. and Brendel, R., Lift-off of free-standing layers in the kerfless porous silicon process. *Energy Procedia*, Vol. 38, pp.919-925, 2013.
- [14] Li, N., Habuka, H., Ikeda, S.I. and Hara, S., Silicon chemical vapor deposition process using a half-inch silicon wafer for Minimal Manufacturing System. *Physics Procedia*, Vol. 46, pp.230-238, 2013.
- [15] Nakayashiki, K., Rousaville, B., Yelundur, V., Kim, D.S., Rohatgi, A., Clark-Phelps, R. and Hanoka, J.I., Fabrication and analysis of high-efficiency String Ribbon Si solar cells. *Solid-state electronics*, Vol 50, pp. 1406-1412, 2006.

