

APLICAÇÃO DE TEXTURIZAÇÃO A LASER PARA REDUÇÃO DE DANOS DA SUPERFÍCIE USINADA DO SILÍCIO POLICRISTALINO

Vinicius Almeida Carvalho¹

Erick Cardoso Costa²

Fabio Antonio Xavier³

Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, Brasil

¹vinicius.alm.carvalho@gmail.com

²erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br

³f.xavier@ufsc.br

Resumo. A indústria fotovoltaica tem buscado reduzir os custos de fabricação de células solares. Atualmente, as células solares policristalinas apresentam eficiência menor do que as fabricadas com monocristais, o que incentiva estudos voltados ao processamento de wafer de silício policristalino, substrato da célula solar. Esse trabalho objetivou avaliar a possibilidade de remoção dos danos da superfície do silício policristalino causados pelo corte com fio diamantado utilizando processamento a laser. A potência do laser foi variada (10, 25 e 40W) e a morfologia da superfície do silício policristalino foi avaliada via microscopia eletrônica de varredura. A rugosidade foi mensurada com um perfilômetro e os parâmetros R_a e R_t foram extraídos e analisados estatisticamente. Os resultados mostraram que a superfície usinada apresenta regiões fraturadas e livres de danos. O processamento a laser levou a fusão de material, gerando irregularidade na superfície. Verificou-se que o aumento da potência do laser levou ao aumento de R_a , quando comparado a superfície usinada, exceto para a potência de 10W. O teste t de student revelou que os valores médios de R_t não foram afetados significativamente. A potência de 10W se mostrou mais adequada, alcançando o preenchimento dos danos da superfície gerados pelo corte com fio diamantado.

Palavras chave: fio diamantado, silício policristalino, texturização a laser, danos na integridade da superfície.

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia se torna cada dia mais importante, visto o aumento da demanda energética, depleção das fontes não renováveis, problemas ambientais ocorrentes e aumento da pressão política em cima de um futuro sustentável. Uma das mais proeminentes fontes renováveis é a solar fotovoltaica, a qual demanda em torno de 90% da produção mundial de silício cristalino, sendo este o material mais empregado na produção das células utilizadas nos painéis solares. Cerca de 80% das células fotovoltaicas utilizam o silício cristalino como substrato (COSTA, 2019), devido a sua alta eficiência na geração de eletricidade (SUZUKI et al., 2017).

Uma das etapas de maior custo na cadeia de produção da célula fotovoltaica é a obtenção dos wafers (lâminas de silício de espessura na ordem micrométrica), a qual corresponde a cerca de 40 a 60% do custo total (MÖLLER, 2005). A principal forma de produção de wafers de silício é o processo de corte realizado por uma serra de múltiplos fios (Multi-Wire Saw - MWS), o qual consiste basicamente em pressionar o lingote de silício contra uma malha de fios paralelos em que a interação entre a movimentação do fio e os abrasivos realizam o corte produzindo centenas de wafers em um único corte (COSTA et al., 2019). A tecnologia empregada majoritariamente nas empresas fotovoltaicas e microeletrônica é a de usinagem com fios de aço inoxidável e uma suspensão de abrasivos (Wire Slurry Saw - WSS), porém esta técnica possui a desvantagem de ter tempo de corte elevado (entre 6 a 9h de processo), o que incentivou a busca de uma nova metodologia.

Com o intuito de melhorar o desempenho do corte com múltiplos fios, foi desenvolvido um fio com grãos de diamante fixados à superfície galvanicamente, chamado de serra de fio diamantado (Diamond-coated wire saw - DWS). O DWS vem tomando espaço na indústria de wafering devido às vantagens produtivas quando comparadas ao processo WSS, sendo estas taxas de remoção de material até três vezes maior, possibilidade de utilização de fluidos lubrificantes a base de água, menor custo de reciclagem do cavaco e melhor qualidade da superfície usinada (COSTA et al., 2020a).

Apesar da produção de wafers de silício cristalino utilizando o processo de corte com fio diamantado possuir muitas vantagens quando comparado a outros processos, ele ainda introduz danos a integridade da superfície do wafer de silício, tais como: marcas de serra, formação de microlascamentos, crateras e pitting, rugosidade relativamente elevada, formação de camadas amorfas e deslocamento, nucleação e propagação de microtrinca na subsuperfície, dentre outros, que

influenciam diretamente nas propriedades mecânicas, ópticas e elétricas das células solares fotovoltaicas como um produto final (COSTA et al., 2020b).

Atualmente, esses danos causados à integridade da superfície do *wafer* de silício são removidos na sua maioria por meio de ataques alcalinos com KOH ou NaOH (MCDONALD, 2004). Este ataque serve, principalmente, para dois propósitos principais que são: a remoção dos danos introduzidos pelo processo de usinagem e a texturização do *wafer* que tem propósito de melhorar as propriedades óptica e elétrica. No entanto, este processo ainda não é capaz de atingir a melhor performance do *wafer* especialmente se este for de silício policristalino, visto que sua texturização é afetada pela presença das diferentes orientações cristalográficas randômicas no *wafer* (DOBRZANSKI, 2008). De acordo com Chen et al. (2014), o processo de corte com fio diamantado introduz marcas de serras sobre a superfície do *wafer* de silício e estas são de difícil remoção quando aplicados processos de texturização química convencionalmente utilizados na indústria. Niu et al. (2016) complementam que a presença de fase amorfa e fraturas frágeis formadas na superfície usinada do silício policristalino reduzem significativamente a eficiência do processo de texturização química e a eficiência da conversão fotoelétrica, que é um dos principais fenômenos que proporcionam a produção de energia elétrica via tecnologia fotovoltaica.

Buscando tornar a células fotovoltaicas de silício policristalino mais eficientes, fazendo proveito dos avanços constantes da tecnologia LASER, que é amplamente utilizada em processos de usinagem, soldagem, e texturizações de diferentes materiais, passou a ser estudado e desenvolvido processos para efetuar a texturização de wafers de silício policristalino de forma controlada, previsível e precisa, utilizando a incidência do laser sobre a superfície do silício policristalino. Mesmo utilizando o laser para texturizar a superfície, nos processos estudados pela literatura científica ainda se faz necessário a utilização do ataque alcalino para remover os danos gerados pelo serramento via fio diamantado ao *wafer* antes da realização da texturização laser e logo após para remover os danos causados por esta.

Considerando as informações supracitadas, este trabalho objetivou desenvolver e entender a redução ou eliminação dos danos gerados durante a usinagem com fio diamantado sobre a superfície do silício policristalino empregando processamento a LASER como uma etapa antecessora ao processo de ataque químico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Corpos de prova

Para a realização dos ensaios foram utilizados paralelepípedos de um mesmo lingote de silício policristalino com dimensões de 60,4 mm x 9,6 mm x 29,2 mm, conforme mostrado na Figura 1a. Os lingotes foram fornecidos pelo Instituto de Pesquisas de São Paulo (IPT-SP), sendo obtidos a partir de uma rota metalúrgica de refinamento, purificação e solidificação desenvolvida pelo IPT-SP com objetivo de produzir silício policristalino com pureza de grau solar (tipicamente de 99,9999999% de pureza para aplicação como *wafer* de células solares). As amostras foram obtidas pelo processo de corte com fio diamantado, cujos corpos de prova foram usinados com uma espessura padrão de $1 \pm 0,05$ mm. A Figura 1b mostra uma amostra de silício policristalino após o processo de corte com fio diamantado.

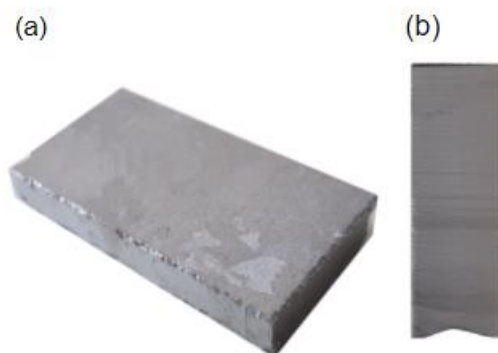


Figura 1. Silício policristalino: a) bloco com geometria de paralelepípedo; b) corpo de prova.

2.2. Etapa de corte com fio diamantado

Para esta etapa foi utilizada a bancada experimental de corte com fio diamantado contínuo desenvolvida por Knoblauch et al. (2017). Como ferramenta de corte foi utilizado fio diamantado cujos abrasivos foram eletrodepositados sobre a superfície de um fio de aço produzido pela empresa *Norton Saint-Gobain Abrasives*. O diâmetro externo nominal do fio diamantado é de $\varnothing_{\text{ext}} = 350$ μm com grãos de diamante com granulometria na ordem de 30 a 45 μm . Para o presente trabalho, as extremidades de um segmento de fio diamantado de 1 metro foram unidas utilizando um equipamento de

soldagem a topo por resistência desenvolvido por Souza (2019) para este propósito. A condição de corte empregada nessa etapa foi uma velocidade de corte de $v_c = 20$ m/s, velocidade de avanço de $v_f = 2$ mm/min e uma tensão do fio diamantado de 20 N. Para todos os ensaios de corte foi utilizado um fluido lubrificador refrigerante mineral solúvel em água com uma concentração de 5%.

2.3. Etapa de processamento a LASER

A texturização foi realizada utilizando uma bancada experimental laser SL-2 desenvolvida por Silveira (2019). A fonte laser é do tipo de fibra pulsado, possuindo um comprimento de onda de $\lambda = 1064$ nm, potência máxima de 50 W e um diâmetro do ponto focal de 58 μ m. Os corpos de prova foram divididos em quatro regiões de 7 mm x 8 mm com 0,1 mm entre elas. Uma das seções foi mantida no estado usinado para efeito de comparação com as outras três regiões. Já as demais seções foram processadas utilizando os parâmetros de frequência de 100 kHz, tempo de pulso de 120 ns e velocidade de varredura de 310 mm/s, sendo estes mantidos constantes sob variação da potência do laser. Os parâmetros de potência do laser selecionados foram de 10, 25 e 40 W, cada um sendo aplicado a uma seção corpo de prova. A Figura 2 mostra a amostra de silício policristalino após o processo de corte com fio diamantado e aplicação da texturização a laser para redução dos danos causado pelo processo de usinagem.

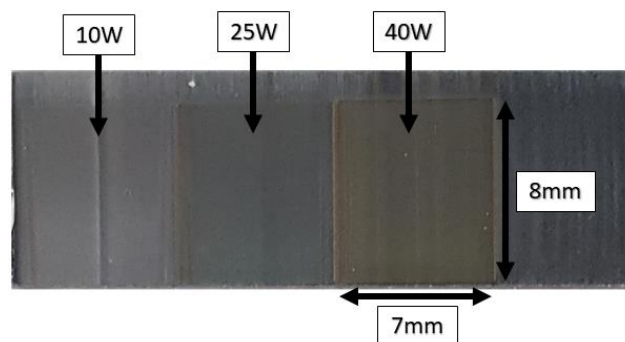


Figura 2. Corpo de prova de silício policristalino após o processamento a laser.

2.4. Morfologia da superfície

Uma análise qualitativa da superfície das amostras de silício policristalino foi efetuada utilizando a técnica de microscopia de eletrônica de varredura (MEV). Essa etapa foi realizada com intuito de identificar as alterações causadas pelas diferentes potências de texturização a laser, tendo como base de comparação a superfície usinada. Para tanto foi empregado um microscópio eletrônico de mesa da fabricante HITACHI, modelo TM-3030 para a realização das avaliações morfológicas da superfície. As micrografias foram adquiridas sob uma ampliação de 1000x e 600x, ambas utilizando uma tensão de aceleração de 15 kV.

2.5. Medição da rugosidade

Com intuito de avaliar o efeito da redução/eliminação dos defeitos da superfície do silício policristalino, a rugosidade da superfície do corpo de prova foi mensurada. Esta etapa foi empregada a fim de complementar as observações morfológicas. A topografia da rugosidade usinada foi quantificada utilizando um perfilômetro da marca Taylor Hobson, modelo FTS i-120 equipado com um apalpador de diamante com raio de 2 μ m e ângulo de conicidade de 90°. Foram empregados comprimento de amostragem (l_n) de 4 mm e *cut-off* de 0,8 mm conforme a norma ISO 4288. Os perfis foram analisados seguindo a norma ISO 4287 utilizando o *software MountainsMap® Universal 7.4* para extração dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo do processamento da superfície com incidência do laser foi realizado com intenção de verificar a possibilidade de remoção dos danos presente na superfície causados pelo processo de corte com fio diamantado, buscando aliar este com a texturização da superfície. Isso pode ser aplicado como uma alternativa ao procedimento de remoção de danos via soluções alcalinas, normalmente realizada antes do processamento laser, tendo em vista que este processo normalmente é repetido após a texturização a laser para remover os danos causados por este processo, como proposto por Dobrzański et al. (2009).

3.1. Morfologia da superfície

A Figura 3 mostra os aspectos morfológicos com ampliação de 1000x das superfícies usinada e texturizadas a laser. Essa etapa permitiu comparar qualitativamente o efeito do processamento a laser com relação a amostra no estado usinado. A Figura 3a ilustra a superfície após o processo de corte com fio diamantado, sendo possível observar que a superfície é formada por uma composição de remoção de material em ambos os modos frágil e dúctil. Como um típico material frágil e duro, a formação da superfície do silício policristalino é regida por um limite crítico de espessura de cavaco não-deformado ($h_{cu,crit}$), no qual a extrapolação do mesmo devido a uma elevada penetração dos gumes cinemáticos leva a formação do cavaco via nucleação e propagação de trinca. Isso causa a formação de crateras e *pittings* sobre a superfície usinada, bem como a presença de microtrincas na região da subsuperfície (COSTA et al., 2020b). Por outro lado, houve também a formação de regiões livres de danos sendo estas observadas quando o silício policristalino apresenta um comportamento similar a um material dúctil. Para esse caso, uma redução significativa da profundidade de penetração dos abrasivos sobre o material, sendo esta $\leq h_{cu,crit}$, induz a formação de um fluxo visco-elástico do material sobre a face de saída do grão, facilitado pela transformação de fase do cristal e que forma cavacos alongados. Devido a este comportamento, a superfície usinada apresenta-se livre de danos em forma de microrranhuras e microsulcamento. Ressalta-se que este aspecto morfológico com regiões fraturadas e livres de danos é um resultado da natureza estocástica dos processos abrasivos e das diferentes protrusões dos abrasivos de diamante que efetivamente assumem o corte.

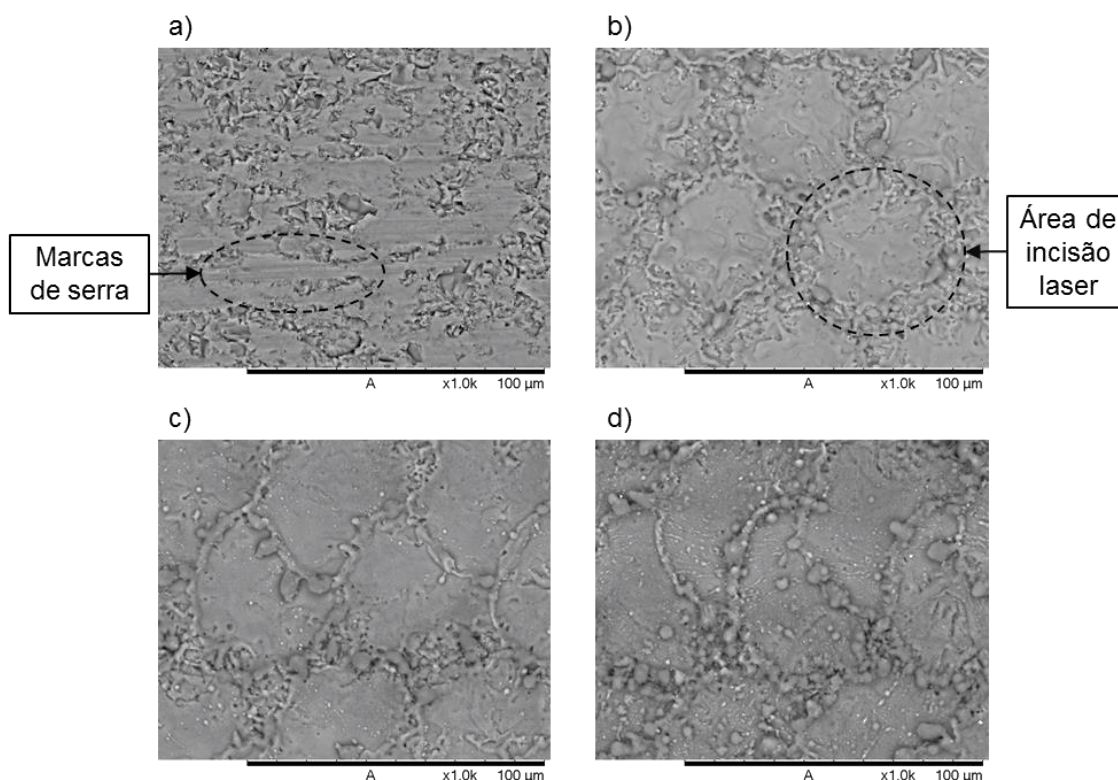


Figura 3. Morfologia da superfície do silício: a) estado usinado; b) 10W; c) 25W; d) 40W.

Considerando a formação de fraturas frágeis sobre a superfície usinada, o processamento a laser foi aplicado e os resultados são mostrados nas micrografias das Figuras 3b, 3c e 3d. É possível notar que em todas as potências do laser investigadas houve fusão do material base. Isso é ocasionado devido à natureza do processo aplicado, no qual o feixe laser pulsa sobre a superfície, levando a fusão de forma rápida na região de irradiação do pulso. Devido a tensão superficial, parte da camada de silício em estado líquido é deslocada para a região periférica da área de ação do feixe laser onde se solidifica novamente, como observado por Dobrzański e Drygała (2012). É perceptível que com o aumento da potência incidida, mantendo constante os demais parâmetros, tanto a quantidade quanto a dimensão do deslocamento de material em estado líquido são maiores. Esse comportamento gera uma superfície com maior irregularidade devido a maior quantidade e sobreposição de material refundido, como pode ser observado nas micrografias com ampliação de 600x mostrado pela Figura 4.

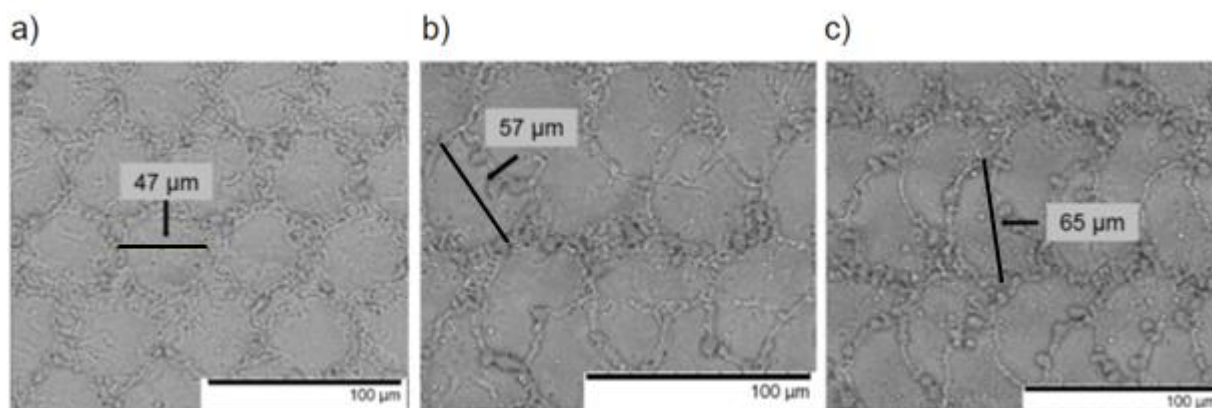


Figura 4. Diâmetro afetado pela incidência do pulso laser com diferentes potências.

O diâmetro médio afetado pela incidência do feixe laser sobre a superfície usinada do silício policristalino é mostrado no gráfico da Figura 5. Os valores médios com respectivo desvio padrão representam a média aritmética de 25 amostragens mensuradas manualmente. Como pode ser observado, é evidente que há um aumento com um comportamento praticamente linear do diâmetro afetado sob aumento da potência do feixe laser, nesse caso nas condições investigadas de 10, 25 e 40 W.

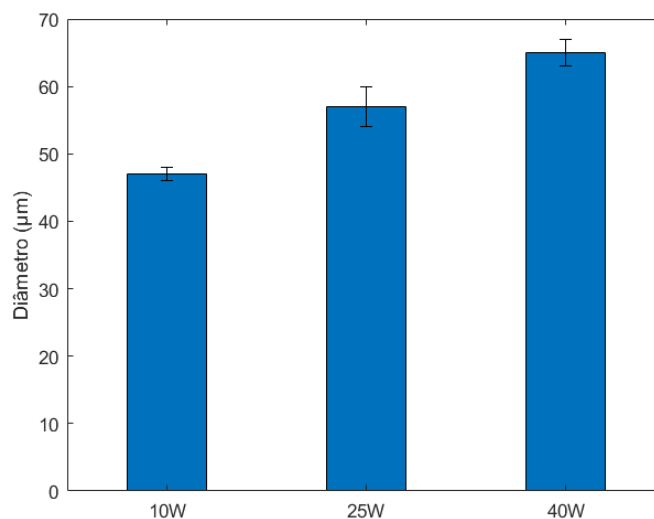


Figura 5. Diâmetro das crateras afetadas pela incidência do pulso laser com diferentes potências.

Devido a fusão do material base foi possível notar que houve um preenchimento das crateras, *pittings* e microlascamentos gerados pelo comportamento frágil do material durante o corte com fio diamantado. Além disso, a alta temperatura que a incidência do feixe laser gera sobre a superfície pode proporcionar a recristalização do silício do estado amorfo para a sua natureza de cúbica de diamante, aliviando a alta tensão de compressão residual que foram observadas no trabalho de Costa et al. (2020). Esse resultado da superfície evidencia que o processamento a laser é capaz de remover as marcas de serra (microsulcamentos e microrranhuras) e fraturas frágeis (crateras e *pittings*), no entanto a qualidade topográfica foi visualmente afetada devido ao material refundido a superfície.

3.2. Análise da rugosidade

Como foi observado nas micrografias mostradas na Figura 3, a superfície do silício policristalino foi alterada, mas a visualização destas micrografias ofereceu apenas uma avaliação qualitativa. Dessa forma, foi efetuado um estudo da topografia das amostras com intuito de estabelecer a magnitude do efeito gerado pelo processamento a laser na amostra usinada com fio diamantado sobre os parâmetros de rugosidade R_a e R_q . Com intuito de avaliar estatisticamente se houve uma variação significativa nos parâmetros de rugosidade foi realizado um teste t de *student* entre as amostras processadas a laser e a amostra testemunha, a qual foi mantida no estado usinado. Para tanto, foi utilizado um nível de significância com valor de $\alpha = 0,1$.

A Figura 6 mostra os resultados do parâmetro de rugosidade R_a com respectivos desvios padrão. A partir do teste t foi possível analisar o parâmetro de rugosidade R_a utilizando os dados adquiridos. Para este parâmetro foi utilizada a avaliação uni-caudal visto que se espera valores médios maiores para as amostras processadas a laser.

Nota-se que não houve diferença significativa entre a amostra após o corte com fio diamantado e a processada com 10 W de potência do laser, visto que o resultado do valor de t foi de 0,27 e o valor de t crítico uni-caudal foi de 1,64, o que indica que as médias são estatisticamente convergentes. Para a comparação entre a amostra processada com 25 W e a usinada os resultados do teste t mostraram que há diferença estatística, visto que o valor de t resultou em 3,15 e o valor de t crítico uni-caudal resultou em 1,89, evidenciando que o parâmetro de rugosidade R_a obtida com uma potência do laser de 25 W foi maior quando comparada a amostra usinada com fio diamantado. Comparando a última amostra processada com 40 W e a amostra testemunha usinada com fio diamantado, foi obtido um valor de t igual a 1,87 o qual é maior que o valor de t crítico uni-caudal de 1,64, confirmando assim o aumento do valor de R_a para esta amostra em relação ao obtido com fio diamantado.

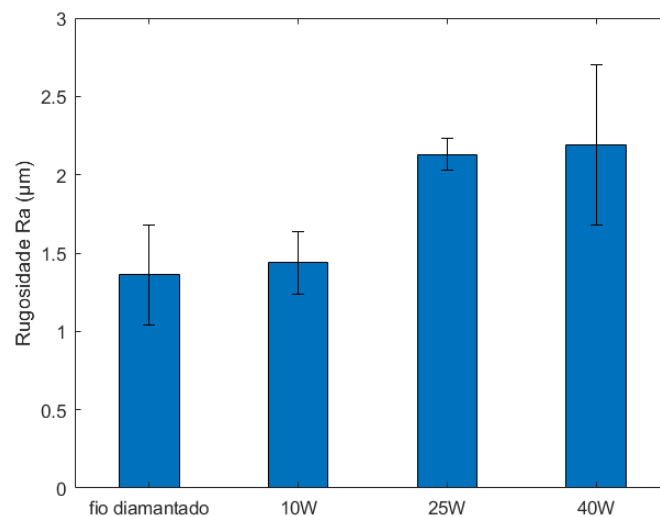


Figura 6. Rugosidade R_a para diferentes potências de processamento laser.

Pode-se notar que os dados estatísticos corroboram com os valores médios apresentados no gráfico da Figura 6, no qual apresenta um aumento na rugosidade com o aumento da potência incidida do feixe laser, com exceção quando aplicada uma potência de 10 W. Um comportamento similar foi relatado por Hsiao (2011), mas para o caso do autor foi observado para o silício monocristalino.

Ainda analisando a topografia das amostras, avaliou-se o parâmetro de rugosidade R_t com intuito de avaliar a qualidade da superfície em sua totalidade. O teste t de *student* foi empregado novamente, todavia o parâmetro bicaudal foi implementado visto que os valores médios se mostraram muito próximas. A Figura 7 mostra o gráfico com os valores médios de R_t com respectivos desvios padrão.

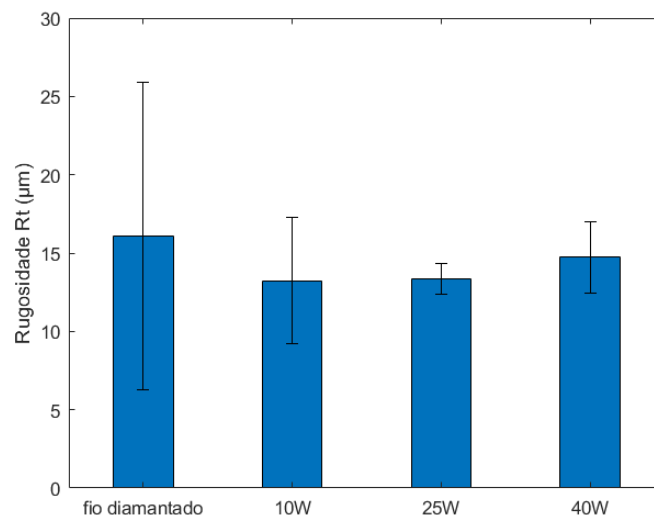


Figura 7. Rugosidade R_t para diferentes potências de processamento laser.

A comparação entre as superfícies processadas com 10 W e a usinada com fio diamantado resultou em um valor t de 0,36, sendo menor que o valor de t crítico bicaudal de 2,35. Isso indica que estatisticamente não há distinção entre as médias analisadas. Comparando as amostras processada com 25 W e a usinada com fio diamantado, a análise retornou um valor de t igual a 0,37 sendo este menor que o valor de t crítico bicaudal de 2,92, evidenciando que as amostras apresentam médias que convergem estatisticamente. Para a amostra processada a laser com 40 W comparada à usinada com fio diamantado o valor de t resultou em 0,18, permanecendo dentro do limite de t crítico bicaudal de 2,92. Dessa forma, a análise evidenciou que estatisticamente não é possível afirmar que há diferença significativa entre as amostras analisadas.

Nota-se que a rugosidade total (R_t) não resultou em valores estatisticamente diferentes quando comparadas entre o processamento a laser e a amostra usinada com fio diamantado. Nesse sentido, é possível afirmar que o processo de redução ou eliminação dos danos da superfície tem efeito de maior significância sobre o parâmetro de rugosidade R_a .

4. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi de aplicar o processamento a laser sobre a superfície do silício policristalino após o corte por fio diamantado buscando reduzir ou remover os danos causados durante o processo de usinagem. Para tanto, a potência nominal do feixe laser foi variada nas magnitudes de 10, 25 e 40W. A superfície resultante foi analisada em termos morfológicos via MEV, buscando entender fatores qualitativos das alterações geradas. A topografia da superfície foi mensurada e avaliada em termos dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t . Os principais resultados experimentais obtidos foram:

- A superfície usinada com fio diamantado apresenta fraturas frágeis, na forma de crateras e *pitting*, e regiões livres de danos, como microrranhuras e microssulcamento.
- A incidência do feixe laser levou a fusão do material, o que resultou na remoção das marcas de serra e preenchimento das fraturas frágeis.
- Devido a tensão superficial, o silício fundido foi acumulado e solidificado na periferia da área de irradiação do laser, gerando irregularidade que aumentaram com a progressão da potência do feixe laser.
- O valor do parâmetro de rugosidade R_a foi estatisticamente diferente quando comparada a superfície usinada com as obtidas com incidência do laser de 25 e 40 W. Não houve significância para a potência do laser de 10 W.
- Não houve efeito estatisticamente significativo para os valores do parâmetro de rugosidade R_t .

A aplicação do processamento a laser da superfície do silício policristalino após o corte com fio diamantado com proposta a fabricação de *wafer* aplicado a células fotovoltaicas foi analisado. De maneira geral, foi possível observar que a potência de 10 W é a mais adequada, uma vez que foi alcançado o preenchimento dos danos da superfície. Trabalhos futuros serão efetuados a fim de aplicar e entender o fenômeno de redução/eliminação dos danos da integridade da superfície empregando potência do laser abaixo de 10 W.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo apoio financeiro, ao IPT-SP pelo fornecimento do silício policristalino e a Norton Saint-Gobain Abrasives Brasil pelo fornecimento do fio diamantado.

6. REFERÊNCIAS

- CHEN, W.; LIU, X.; LI, M.; YIN, C.; ZHOU, L. On the nature and removal of saw marks on diamond wire sawn multicrystalline silicon wafer. *Materials Science and Semiconductor Process*, v. 27, p. 220-227, 2014.
- COSTA, E. C. Corte de silício monocristalino com fio diamantado contínuo. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- COSTA, E. C.; SANTOS, C. P.; XAVIER, F. A.; WEINGAERTNER, W. L. Influence of diamond wire sawing parameters on subsurface microcracks formation in monocrystalline silicon wafer. *Proceeding of 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM, Uberlândia - MG, Brazil, p. 1-8, 2019.
- COSTA, E. C.; SANTOS, C. P.; XAVIER, F. A.; WEINGAERTNER, W. L. Experimental investigation of the sawn surface of monocrystalline silicon cut by endless diamond wire sawing. *Materials Research*, v. 23(4), p. 1-8, 2020a.
- COSTA, E. C.; XAVIER, F. A.; KNOBLAUCH, R.; BINDER, C.; WEINGAERTNER, W. L. Effect of cutting parameters on surface integrity of monocrystalline silicon sawn with an endless diamond wire saw. *Solar Energy*, v. 207, p. 640-650, 2020b.
- DOBRZAŃSKI, L. A.; DRYGAA, A.; PANEK, P. Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization. *Archives of Materials Science*, v. 6, p. 6, 2009.

- DOBRZAŃSKI, L. A.; DRYGAŁA, A. Influence of laser processing on polycrystalline silicon surface. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 829-834.
- DOBRZAŃSKI, L. A.; DRYGAŁA, A. Surface texturing of multicrystalline silicon solar cells. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 31, n. 1, p. 77-82, 2008.
- HSIAO, W. T.; TSENG, S. F.; HUANG, K. C.; WANG, Y. H. Pulsed Nd: YAG laser treatment of monocrystalline silicon substrate. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 56, n. 1-4, p. 223-231, 2011.
- ISO: International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedure for the assessment of surface texture (ISO 4288). Geneve: ISO; 2008.
- ISO: International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287). Geneve: ISO; 2008.
- KNOBLAUCH, R.; COSTA, J. V. M. T., WEINGAERTNER, W. L., XAVIER, F.A.; WEGENER, K. Endless diamond wire saw for monocrystalline silicon cutting. *Proceedings of 59th Ilmenau Scientific Colloquium*. Ilmenau, Germany, p. 1-12, 2017.
- MACDONALD, D. H.; CUEVAS, A.; KERR, M. J. Texturing industrial multicrystalline silicon solar cells. Solar Energy, v. 76, n. 1-3, p. 277-283, 2004.
- MÖLLER, H. J.; FUNCKE, C.; RINIO, M.; SCHOLZ, S. Multicrystalline silicon for solar cells. Thin Solid Films, v. 487, n. 1-2, p. 179-187, 2005.
- NIU, Y. C.; LIU H. T.; LIU, X. J.; JIANG, Y. S.; REN, X.K.; CAI, P. Study on nano-pores enlargement during Ag-assisted electroless etching of diamond wire sawn polycrystalline silicon wafer. Materials Science and Semiconductor Process, v. 56, p. 119-126, 2016.
- SILVEIRA, C. A. Análise da movimentação síncrona e simultânea entre scanner galvanométrico e eixos lineares em aplicações laser. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- SOUZA, Ricardo Delgado de. Development of a diamond wire welding device. 2019. 148 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019. Disponível em: <http://www.bu.ufsc.br/teses/PEMC1948-D.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- SUZUKI, T.; NISHINO, Y.; YAN, J. Mechanisms of material removal and subsurface damage in fixed-abrasive diamond wire slicing of single-crystalline silicon. Precision Engineering, v. 50, p. 32-43, 2017.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

APPLICATION OF LASER TEXTURING FOR DAMAGE REDUCTION OF THE SAWN SURFACE OF POLYCRYSTALLINE SILICON

Vinicius Almeida Carvalho¹

Erick Cardoso Costa²

Fabio Antonio Xavier³

Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP, Departamento de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, Brasil

¹vinicius.alm.carvalho@gmail.com

²erick.cardoso.costa@posgrad.ufsc.br

³f.xavier@ufsc.br

Abstract. The photovoltaic industry has looked to reduce the costs of manufacturing solar cells. Currently, polycrystalline solar cells are less efficient than those manufactured with single crystals, which inspire studies focused on the processing of silicon wafer, a substrate of the solar cell. This work aimed to evaluate the possibility of removing the damage to the surface of polycrystalline silicon caused by cutting with diamond wire using laser processing. The laser power was varied (10, 25 and 40W) and the morphology of the polycrystalline silicon surface was evaluated via scanning electron microscopy. The roughness was measured with a profilometer and the parameters R_a and R_t were extracted and analyzed statistically. The results showed that the machined surface has fractured and damage-free regions. Laser processing led to the melting of material, creating irregularities on the surface. It was verified that the increase in laser power led to an increase in R_a , when compared to the machined surface, except for the power of 10W. Student's t test revealed that mean R_t values were not significantly affected. The 10W power proved to be more adequate, filling up the surface damage generated by cutting with diamond wire.

Keywords: Diamond wire sawing, polycrystalline silicon, laser texturing, surface damage.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.