

## A - Lista de Abreviaturas e Símbolos

AIC	Aluminum-induced crystallization
ALICIA	Aluminium Induced Crystallisation, Ion Assisted deposition solar cells
APCVD	Atmospheric pressure CVP
Ar	Árgon
As	Arsénio
a-Si:H	Silício amorfo
a-SiGe:H	Liga amorfa de silício e germânio
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Diborano
CdTe	Cadmium telluride
CH <sub>3</sub> COOH	Ácido acético
CIGS	Copper indium gallium selenide
CIGSS	Copper indium gallium selenide sulfur
CIS	Copper indium selenide
c-Si	Silício Cristalino
c-SiTF	Cristalline silicon thin films
CuIn <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> Se <sub>2</sub>	Compostos de Copper indium gallium selenide
CuInSe <sub>2</sub>	Copper indium gallium diselenide
CVD	Chemical Vapor Deposition
CZ	Czochralski
D-WEB	Dendritic Web
EFG	Edge defined film fed growth
EG-Si	Electronic grade silicon
ESP	Edge Stabilized
FBR	Fluidized Bed Reactor
FZ	Zona Flutuante / Float Zone
GaAs	Galium arsenide
GaInAs	Galium indium arsenide
GaInP	Galium indium phosphate
GaP	Galium phosphate
H <sub>2</sub>	Hidrogénio
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico
HCl	Ácido clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
InP	Indium phosphate
LPCVD	Low pressure CVD
MG-Si	Metallurgical Grade Silicon
Mono-Si	Silício monocristalino
N <sub>2</sub>	Azoto
Nd:YAG	Laser neodymium - YAG
O <sub>2</sub>	Oxigénio
PECVD	Plasma enhanced CVD
PH <sub>3</sub>	Fosfina
PH <sub>3</sub>	Fosfina
PIN	Si tipo-p : Si intrínseco : Si tipo-n
pn	Si tipo-p : Si tipo-n
Poly-Si	Silício policristalino
PV	Photovoltaic

RGS	Ribbon Growth on Substrate
RTCVD	Rapid thermal CVD
RTP	Processamento térmico rápido
SDS	Silicon on Dust Substrate
SEM	Scanning Electron Microscopy
SGS	Solar Grade Silicon
Si	Silício
SiC	Carboneto de silício
Si-CZ	Silício Czochralski
SiH <sub>4</sub>	Silano
SiH <sub>4</sub> -nCl <sub>n</sub>	Familia de silanos
SiHCl <sub>3</sub>	Triclorossilano
SiO <sub>2</sub>	Quartzo ou dióxido de silício
SoG-Si	Solar Grade Silicon
SPC	Solid phase crystallization
SR	String Ribbon
SSP	Silicon Sheet from Powder
TEM	Transmission Electron Microscopy
UMG-Si	Upgrade Metallurgical Grade Silicon
VEST	Process Via hole etching for the separation of thin films
Wp	Watt pico
ZMR	Zone Melting Recrystallization
μc-Si	Silício microcristalino
μc-Si:H	Silício microcristalino hidrogenado

## B - Lista de Publicações

- J M Serra, C R Pinto, J A Silva, M C Brito, J Maia Alves and A M Vallêra, “*The SDS path to make solar cells directly from a gaseous feedstock*”, (2008) submetido
- Pinto, C.R., J.M.Serra, M.C.Brito, R.Gamboa, J.Maia Alves, A.M.Vallera, “*First Solar Cells on Silicon Ribbons Obtained by Fast CVD from Silane*”, Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2007) Milão
- Pinto, C.R., Serra, J.M., Brito, M.C., Gamboa, R., Alves, J.Maia, Vallera, A.M. “*Zone Melting Recrystallization of Self Supported Silicon Ribbons Obtained by Fast CVD From Silane*”, Proceedings of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (2006) 1099-1100
- C.R.Pinto, J.M.Serra, M.C.Brito, R.Gamboa, J.Maia Alves, A.M.Vallera, “*First Solar Cells on Silicon Ribbons Obtained by Fast CVD from Silane*”, Proceedings of 22nd EPSEC (2007)
- C.R.Pinto, J.M.Serra, M.C.Brito, R.Gamboa, J.Maia Alves, A.M.Vallera, “*Zone Melting Recrystallization of Self Supported Silicon Ribbons Obtained by Fast CVD From Silane*”, Proceedings of 21st EPSEC (2006) 1099-1100
- Brito, M.C., J.M. Alves, J.M. Serra, R.M. Gamboa, C.R Pinto and A. M. Vallera “*Measurement of residual stress in EFG ribbons using a* 1-316
- C.Rodrigues Pinto, J.M. Serra, J.Maia Alves, A. M. Vallera, “*Silicon Sheet from Silane: First Results*”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 72 (2002) 209-217
- Brito, M.C., Rodrigues Pinto, C., Gambôa, R., Maia Alves, J., Serra, J., Vallera, A., “*Investigação e Desenvolvimento de Fitas de Silício para Aplicação Fotovoltaica*” Sol, Energia e Vida, Resumos XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, Portugal, (2002)



## C - Lista de Figuras

Figura 1.1 – Distribuição dos materiais semicondutores das células fotovoltaicas por tecnologia, em 2007, adaptado de [Photon Int., 3/2008]	4
Figura 2.1 - Reactor Siemens e Reactor de Leito Fluidizado (FBR) para produção de silício policristalino a partir de precursores gasosos: $\text{SiHCl}_3$ e $\text{SiH}_4$	15
Figura 2.2 – Produção de lingotes de silício monocristalino por Czochralski (Cz) e Fusão de Zona (FZ), adaptado de [Sze, 1985] e [Goetzberger <i>et al.</i> , 1998], respectivamente.	17
Figura 2.3 – Produção de blocos de silício multicristalino por solidificação direccional.	18
Figura 2.4 – Distribuição dos custos das várias etapas de processamento de módulos e de bolachas silício.	18
Figura 2.5 – Produção de fitas de silício por EFG: crescimento em geometria linear e em geometria fechada (octógonos), adaptado de [Mackintosh <i>et al.</i> , 2006].	20
Figura 2.6 – Produção de fitas de silício por String-Ribbon, adaptado de [Koch <i>et al.</i> , 2003].	21
Figura 2.7 – Técnica D-Web de crescimento de fitas de silício, adaptado de [Koch <i>et al.</i> , 2003].	22
Figura 2.8 – Técnica RGS de crescimento de fitas de silício, adaptado de [Koch <i>et al.</i> , 2003].	23
Figura 2.9 – Técnica SSP de crescimento de fitas de silício desenvolvida no Fraunhofer ISE, adaptado de [Eyer <i>et al.</i> , 2001].	24
Figura 3.1 – Variação da taxa de deposição com a temperatura para várias fontes de silício gasosas, todas com concentração igual a 0,1 % (mol) em hidrogénio, à pressão atmosférica [Seymour., 1980].	31
Figura 3.2 – Esquema da sequência do Processo SDS	32
Figura 3.3 – Esquema do crescimento epitaxial de silício monocristalino, policristalino e amorfo sobre substrato de silício monocristalino, em função da temperatura e da taxa de deposição [Schuegraf, 1988].	37
Figura 3.4 – Esquema e fotografias das diferentes fases de nucleação e crescimento do pó de silício, adaptado de [Cabarrocas <i>et al.</i> , 2002]	38
Figura 3.5 – Esquema da taxa de deposição típica em processos de CVD em função da temperatura recíproca, mostrando os 2 regimes: (1) o regime limitado pelo transporte de massa e (2) o regime limitado pela cinética de reacção na superfície do substrato	40
Figura 3.6 – Esquema simplificado do processo ZMR: focagem da radiação proveniente de duas lâmpadas de halogéneo nas superfícies da fita de silício, criando uma zona fundida com ~2mm de largura	44
Figura 4.1 – Fotografias do reactor tubular de CVD e pormenor do módulo de aquecimento	49
Figura 4.2 – Porta-amostras para CVD no reactor tubular: A – esquema de parte do porta-amostras com 2 amostras; B – pormenor do contacto porta-amostras/amostra	50
Figura 4.3 – Esquema do posicionamento da amostra no interior do reactor tubular	51

Figura 4.4 - Esquema do reactor de CVD e sistemas auxiliares	52
Figura 4.5 – Fotografia da central de gases: painel de oito linhas gasosas com válvulas pneumáticas, debitómetros e electroválvulas	53
Figura 4.6 – Esquema do pulmão, para expulsão dos gases residuais de CVD	54
Figura 4.7 – Bolómetro de silício utilizado na caracterização da temperatura de CVD	55
Figura 4.8 – Dependência da temperatura na amostra com a tensão das lâmpadas, no reactor tubular de CVD	56
Figura 4.9 - Aspecto dos substratos de silício multicristalino após corrosão electroquímica	58
Figura 4.10 - Aspecto dos substratos de silício cobertos totalmente com pó de silício	58
Figura 4.11 - Amostras após deposição de silício por CVD, sobre silício poroso. Note-se que praticamente não existe deposição nas paredes do tubo de quartzo	60
Figura 4.12 - Deposição de silício nas paredes de quartzo do reactor por decomposição em fase gasosa do silano, em experiências com substratos cobertos com pó de silício	61
Figura 4.13 – Esquema de princípio do reactor SDS de CVD.	62
Figura 4.14 – Esquemas da posição relativa lâmpadas-amostra: a) vista de topo; b) direcção y; c) direcção x	63
Figura 4.15 – Intensidade relativa de radiação ao longo da direcção y, paralela ao filamento das lâmpadas. O filamento está entre -70 e 70 mm e a amostra entre -30 e 30 mm	65
Figura 4.16 - Intensidade relativa de radiação ao longo da direcção x, perpendicular ao filamento das lâmpadas. A amostra situa-se entre as posições -15 e 15 mm	66
Figura 4.17 - Fotografia do reactor SDS de CVD: câmara de alumínio e módulo de aquecimento	67
Figura 4.18 - Esquemas completo, A, e de corte, B, da câmara do reactor SDS de CVD	68
Figura 4.19 - Fotografia e esquema do módulo de aquecimento, com 3 lâmpadas de halogéneo	69
Figura 4.20 - Esquemas completo e em corte do porta amostras para agregação do pó	70
Figura 4.21 - Esquema do porta-amostras de quartzo para deposição sobre pó no reactor SDS	70
Figura 4.22 - Esquema detalhado e legendado do reactor SDS de CVD de alumínio	71
Figura 4.23 – Dependência da temperatura no interior de uma amostra de pó com a tensão das lâmpadas, no reactor SDS de CVD	72
Figura 4.24 – Esquema em corte do posicionamento da amostra de pó de silício para agregação	73
Figura 4.25 - Esquema em corte do posicionamento da amostra para deposição sobre pó de silício	75
Figura 4.26 – Fotografia de uma pré-fita de Si crescida por CVD	76
Figura 4.27 – Pulverização da superfície das pré-fitas de Si com ácido bórico, para dopagem	78

Figura 4.28 – Forno óptico de ZMR; pormenor do aquecimento da zona a fundir	79
Figura 5.1 – Variação da espessura equivalente da fita depositada por CVD sobre silício poroso com o tempo de deposição, para $T=840^{\circ}\text{C}$ . O declive da recta indica a taxa de deposição: $R=2,22\ \mu\text{m}/\text{min}$	86
Figura 5.2 - Em cima: Am119 (esquerda) e Am124 (direita) após deposição de silício por CVD. Note-se que praticamente não existe deposição nas paredes do tubo de quartzo em Am119. Em baixo: Am123 Para esta amostra, a deposição nas paredes do tubo de quartzo foi mais significativa relativamente às amostras 119 e 124, devido à temperatura mais elevada, utilizada	87
Figura 5.3 - Amostras Am119, Am124 e Am123 após deposição de silício por CVD: em cima a face porosa que ficou voltada para as lâmpadas, em baixo a face sem tratamento químico, que não é exposta directamente à radiação	87
Figura 5.4 – Taxa de deposição de Si por CVD sobre Si poroso em função da temperatura	88
Figura 5.5- Imagem de SEM amostra Am119 após deposição de silício por CVD. A - perfil da AM119: em cima a face porosa que ficou voltada para as lâmpadas, em baixo a face sem tratamento químico, que não é exposta directamente à radiação. B - pormenor da morfologia do Si crescido sobre a face porosa. C – pormenor da morfologia do Si crescido na face oposta	89
Figura 5.6 – Imagens SEM de pontes sólidas entre substrato e filme de Si depositado por CVD, ao longo da camada porosa	90
Figura 5.7 - Substrato de silício policristalino (esquerda) da amostra P1, e esquadro (direita) para conter o pó de silício	92
Figura 5.8 - Amostra P1 após deposição por CVD: à esquerda apresenta-se superfície da folha de silício que cresceu sobre o pó; à direita a superfície da mesma folha exposta aos gases reactivos. Note-se a existência de parte do esquadro, onde se formaram algumas pontes sólidas que dificultam a separação, directamente relacionadas com o sentido do fluxo do silano, indicado na figura	93
Figura 5.9 – Imagem de SEM do perfil folha de silício (em cima), com substrato (em baixo), correspondente à Amostra P1 após deposição por CVD: a zona que separa a folha do substrato estava preenchida por pó de silício, que não foi agregado durante a deposição, actuando como camada de separação	93
Figura 5.10 – Imagens de SEM do perfil folha de silício correspondente à Amostra P1 após deposição por CVD. A – face superior: superfície da folha de silício voltada para o substrato; face inferior: superfície da folha exposta aos gases reactivos; B e C - pormenores da morfologia da superfície da folha de silício que cresceu sobre o pó onde se observam estruturas colunares, B, e subestruturas, C	94
Figura 5.11 – Imagem SEM da superfície da amostra P7 (fluxo $\text{SiH}_4 = 0,1\ \text{l}/\text{min}$ )	97
Figura 5.12 – Imagem SEM da superfície da amostra P8 (fluxo $\text{SiH}_4 = 0,2\ \text{l}/\text{min}$ )	97
Figura 5.13 – Imagem SEM da superfície da amostra P13 (fluxo $\text{SiH}_4 = 0,3\ \text{l}/\text{min}$ )	97
Figura 5.14 – Aspecto das amostras P7, P8 e P13 após CVD e destacamento. P7 e P13 não são contínuas, “esfarelam” ao serem manuseadas. P8 era contínua, mas devido à existência de algumas pontes sólidas entre folha e substrato de multi-Si, partiu-se na separação	98
Figura 6.1 - Distribuição volúmica do diâmetro das partículas do pó de silício.	102

Figura 6.2 – Imagem SEM do pó de silício	102
Figura 6.3 – Imagens TEM do pó de silício	103
Figura 6.4 – Espectro XPS do pó de silício	104
Figura 6.5 – Fotografias do perfil de deposição de Si por CVD sobre substratos de pó de Si para várias temperaturas, mostrando as faces superior (à esquerda) e inferior (à direita), com indicação da espessura em $\mu\text{m}$ em alguns pontos representados por *.	106
Figura 6.6 – Fotografias das 2 faces das fitas de Si depositadas por CVD com diferentes tempos	109
Figura 6.7 – Taxa de Deposição e Rendimento de Conversão	109
Figura 6.8 - Recristalização das pré-fitas de Si com diferentes perfis de deposição.	110
Figura 6.9 – Fotografias de ambas as faces de uma amostra típica antes e depois das duas etapas de CVD. Note-se que no final do CVD1 o perfil de deposição dá-se preferencialmente nos bordos. Após CVD2, a concavidade fica totalmente preenchida e a amostra não aumenta de espessura. As dimensões iniciais da camada de pó são: $6 \times 3 \times 0,05 \text{ cm}^3$	111
Figura 6.10 – Fita de Si crescida por CVD e recristalizada por ZMR (sem dopagem). A espessura média da pré-fita era de $800 \mu\text{m}$ e após recristalização a fita tem espessura média de $650 \mu\text{m}$	112
Figura 6.11 – Difracção de Raios-X numa pré-fita de Si	113
Figura 6.12 – A: Estrutura de uma fita SDS na interface entre a região não recristalizada (pré-fita) e recristalizada (fita); B: pormenor dos cristais de Si; C: pormenor da interface de recristalização; D: pormenor da estrutura da pré-fita	114
Figura 6.13 – Fotografia de SEM na transição entre zona recristalizada (esquerda) e pré-fita de Si (direita), mostrando a redução de espessura e porosidade após ZMR	115
Figura 6.14 – Fotografias SEM de pormenor da figura anterior: superfície da pré-fita (esquerda) e superfície da fita recristalizada, numa zona de fronteira entre cristais (direita)	115
Figura 6.15 – Perfilometria de uma pré-fita SDS. Em cima: perfilometria 2D numa amostra com $400 \times 625 \mu\text{m}^2$ e perfilometria ao longo de uma linha, com amplitude máxima de irregularidade de $280 \mu\text{m}$ . Em baixo: perfilometria 3D numa área de $240 \times 252 \mu\text{m}^2$ ; a escala abrange o intervalo $[-186; 103] \mu\text{m}$	116
Figura 6.16 – Perfilometria de uma fita SDS. Em cima: perfilometria 2D numa amostra com $513 \times 467 \mu\text{m}^2$ e perfilometria ao longo de uma linha, com amplitude máxima de irregularidade de $298 \text{ nm}$ . Em baixo: perfilometria 3D numa área de $206 \times 164 \mu\text{m}^2$ ; a escala abrange o intervalo $[-150; 150] \text{ nm}$	117
Figura 6.17 – Espectro de transmissão no infravermelho de uma fita SDS.	118
Figura 6.16 – Fotografia de uma parte de fita SDS com camada contínua de óxido e imagem de SEM mostrando pormenor da superfície de óxido, irregular e com rupturas.	119
Figura 6.17 – Fita SDS com camadas de óxido superficial descontínuas, que se arrastam ao longo da amostra durante a recristalização e imagem SEM onde se observa a segregação e uma fina camada de óxido contínua.	119

- Figura 6.18 – Espectro de energia dispersiva de Raios-X para determinação da composição de uma fita SDS: interior da fita (amarelo), superfície da fita (vermelho). O espectro verde é da resina utilizada na preparação das amostras. 120
- Figura 6.19 – Espectrometria ToF-SIMS de uma fita SDS, mostrando a evolução na presença de impurezas (em unidades arbitrárias) desde a superfície da fita (time 0) até à profundidade de 80 nm (time 2500). 121
- Figura 7.1 – Esquema eléctrico do método dos 4 pontos para medida da resistividade superficial das fitas de Si. Adaptado de [Costa, 2005] 131
- Figura 7.2 – Resistividade do silício em função da densidade de portadores do tipo-p (boro) e do tipo-n (fósforo). Adaptado de [Schroder, 1998] 132
- Figura 7.3 – Geometria dos contactos para a medição da curva I(V). Adaptado de [Costa, 2005] 134
- Figura 7.4 – Características I(V) para 3 células: CR1 (célula de controlo); 107 (melhor célula); 120 (célula representativa da média de resultados). 135
- Figura 7.5 – Esquema do sistema utilizado na obtenção da resposta espectral. 1 – célula de referência calibrada; 2- célula a testar. Adaptado de [Serra, 1995]. 136
- Figura 7.6 – Eficiência quântica externa para 3 células: CR1 (célula de controlo); 107 (melhor célula); 120 (célula representativa da média de resultados). 137



## D - Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Gases reagentes e inertes para CVD	53
Tabela 4.2 – Condições de formação da camada de silício poroso	57
Tabela 4.3 – Parâmetros experimentais de CVD otimizados em substratos de silício poroso e resumo dos resultados experimentais	60
Tabela 4.4 – Parâmetros experimentais de CVD em substratos de pó silício poroso e resumo dos resultados experimentais	61
Tabela 4.5 – Características da camada de pó como substrato do processo SDS	74
Tabela 4.6 – Parâmetros experimentais de CVD otimizados para o Processo SDS	76
Tabela 4.7 – Contactos traseiro e dianteiro das células: materiais e espessuras	81
Tabela 5.1 - Parâmetros de deposição de silício por CVD e resultados obtidos	88
Tabela 5.2 – Parâmetros experimentais e resultados para a amostra P1	92
Tabela 5.3 – Parâmetros experimentais e resultados para as amostras P1 e P7, de diferentes dimensões	95
Tabela 5.4 – Parâmetros experimentais e resultados para as amostras P7, P8 e P13, preparadas com diferentes fluxos de gases	96
Tabela 6.1 – Características do pó de silício	101
Tabela 6.2 – Parâmetros de deposição por CVD sobre pó e esquemas dos resultados obtidos para o perfil de deposição, em função da temperatura (Exp 46, 70, 75, 73, 65) e do tempo de deposição (Exp 65 e 66). □SiH <sub>4</sub> = 0,3 l/min, [SiH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> ]=10%	105
Tabela 6.3 – Resultados do CVD para o estudo do perfil de deposição	107
Tabela 6.4 – Parâmetros e resultados da deposição das pré-fitas de Si por CVD sobre pó de Si no SDS, com fluxo de silano de 0,3 l/min e concentração de 10% em hidrogénio	112
Tabela 6.5 - Energia envolvida nas várias etapas do processo SDS	122
Tabela 7.1 – Resultados experimentais para a resistividade e a concentração de boro para algumas amostras preparadas por CVD, dopadas e recristalizadas.	133
Tabela 7.2 – Resultados experimentais para a resistividade superficial após formação da junção pn	133
Tabela 7.3 – Resultados experimentais para os parâmetros característicos da curva I(V) das células solares	134



## Bibliografia

- Aberle AG, Straub A, Widenborg PI, Sproul AB, Huang Y, Campbell P, "**Polycrystalline silicon thin-film solar cells on glass by aluminium-induced crystallisation and subsequent ion-assisted deposition (ALICIA)**", Progress in Photovoltaics: Res. Appl. 13 (2005) 37.
- Aberle AG "**Fabrication and characterisation of crystalline silicon thin-film materials for solar cells**", Thin Solid Films, 511-512, (2006), 26-34
- Ai B, Shen H, Ban Q, Wang X, Liang Z, Liao X, "**Preparation and characterization of Si sheets by renewed SSP technique**", Journal of Crystal Growth, 270 (2004), 446-454
- Alsema EA, "**Environmental life cycle assessment of solar home systems**" consultado em 24 Outubro 2008 URL: <http://www.chem.uu.nl/nws>
- Baghdadi A, Bullis WM, Croarkin M, Li Y Z, Scace R, Series R W, Stallhofer P, Watanabe M "**Oxygen diffusion and precipitation in Czochralski silicon**", J. Electrochem. Soc. 136 (1989) 2015
- Basore PA, "**CSG-2: expanding the production of a new polycrystalline silicon PV technology**", Conf. Proceedings, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden (2006) 830-833
- Baumann, A., Bhargava, Y., Liu, Z., Nemet, G., Wilcox, J., "**Photovoltaic Technology Review**", MSE/C226 (2004), consultado em 20 de Maio de 2008 URL: <http://socrates.berkeley.edu/~kammen/C226/Berkeley-C226-PVTechComp-Pres.pdf>
- Beaucarne G, Duerinckx F, Kuzma I, Van Nieuwenhuysen K, Kim HJ, Poortmans J, "**Epitaxial thin-film Si solar cells**", Thin Solid Films, 511-512, (2006), 533-542
- Beaucarne G, "**Silicon Thin-Film Solar Cells – Review Article**" Advances in Optoelectronics, Volume 2007, Article ID 36970 (2007)
- Benmansour M, Francke E, Morvan D, Amouroux J, Ballutaud D, "**In flight treatment of metallurgical silicon powder by RF thermal plasma: elaboration of hydrogenated silicon deposit on a substrate**", Thin Solid Films, 403-404, (2002), 112-115
- Bloem J, Giling LJ, "**Current Topics in Materials Science: Mechanisms of the Chemical Vapour Deposition of Silicon**", 1, North-Holland Publishing Company, (1978)
- BP Statistical Review of World Energy (2008)**, consultado em 31 de Julho de 2008 URL:

<http://www.bp.com>

- Bücher K, “**True module rating: analysis of module power loss mechanisms**” 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, UK (1995) 2097
- Cabanel C, et al, “**Role of Carbon on the electrical activity of directional solidification polysilicon**”, 7<sup>th</sup> E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, The Netherlands (1987) 708
- Cabarrocas PR, Morral A, Lebib S, Poissant Y, “**Plasma production of nanocrystalline silicon particles and polymorphous silicon thin films for large-area electronic devices**” Pure Appl.Chem, 74, (2002), 359-367
- Canham LT, “**IR absorption due to C in silicon**” Properties of Silicon, INSPEC, (1988) p316
- Canizo C, Luque A, Bullon J, Miranda A, Miguez JM, Riemann H, Abrosimov N, “**Integral procedure for fabrication of solar cells on solar silicon**” Conf. Proceedings, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona (2005) 946-949
- Catchpole K, McCann MJ, Blakers AW, Weber KJ, “**A review of thin-film crystalline silicon for solar cell applications. Part 2: Foreign substrates**” Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 68, Issue 2, (2001), 173-215
- Ceccaroli B, Lohne O, “**Solar Grade Silicon Feedstock**”, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd (2003) ISBN: 0-471-49196-9
- Ceccaroli B, Ege P, Hamilton R, Hartmann T, Macalalad E, Maurits J, “**Novel submerged spout fluid bed process for high quality granular polycrystalline silicon directed to PV applications**” Conf. Proceedings, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona (2005) 612-614
- Chapin, D., Fuller, C., Pearson, G., “**A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical power**”, Journal of Applied Physics 25 (1954) pp 676-677
- Conibeer G, Green M, *et al.*, “**Silicon nanostructures for 3th generation photovoltaic solar cells**”, Thin Solid Films 511-512 (2006) 654-662
- Contreras MA, Ramanathan K, AbuShama J, Hasoon F, Young D, Egass B, Noufi R, “**Diode characteristics in state-of-the art ZnO/CdS/CuIn<sub>(1-x)</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> solar cells**” Progress in Photovoltaics (2005) 13: 209-216
- Costa, I.M.T., “**Estudo e Melhoramento do Processo de Formação de Células Fotovoltaicas no Laboratório de Aplicações Fotovoltaicas e Semicondutores**”, Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia Física, Faculdade de Ciências da

Universidade de Lisboa (2005)

- Cunningham D, Davies K, Grammond L, Mopas E, O'Connor N, Rubcich M, Sadeghi M, Skinner D, Trumbly T, "**Large Área Apollo™ module performance and reliability**" 28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Alaska (2000) 13-18
- Dutta J, Hofmann H, Houriet R, Hofmeister H, Hollenstein C, "**Growth, microstructure and sintering behavior of nanosized silicon powders**", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 127, (1997), 263-272
- Eckertová L, "**Physics of thin films**" 2<sup>nd</sup> Ed, SNTL – Publishers of Technical Literature, Praga (1986) ISBN 0306417987
- Eyer A, Schillinger N, Schelb S, Rauber A, Grabmaier JG, "**Silicon Sheets grown from powder layers by a zonemelting process**" Journal of Crystal Growth, 82 (1987) 151-154
- Eyer A, Schillinger N, Reis I, Rauber A, "**Silicon Sheets for solar cells grown from silicon powder by the SSP technique**" Journal of Crystal Growth, 104 (1990) 119-125
- Eyer A, Haas F, Kieliba T, Obwald D, Reber S, Zimmermann W, Warta W, "**Crystalline silicon thin-film (CSiTF) solar cells on SSP and on ceramic substrates**" Journal of Crystal Growth, 225, (2001), 340-347
- Faller FR, Hurrell A, "**High-temperature CVD for crystalline-silicon thin film solar cells**" IEEE Transactions on Electron Devices, 46, 10 (1999) 2048-2054
- Focsa A, Slaoui A, Pihan E, Snijkers F, Leempoel P, Beaucarne G, Poortmans J, "**Poly-Si films prepared by rapid thermal CVD on boron and phosphorus silicate glass coated ceramic substrates**", Thin Solid Films, 511-512, (2006), 404-410
- Foll H, Christophersen M, Carstensen J, Hasse G, "**Formation and Application of Porous Silicon**", Materials Science and Engineering-R, 39-4 (2002) 93-141
- Gall S, Schneider J, Klein J, Hubener K, Muske M, Rau B, Conrad E, Sieber I, Petter K, Lips K, Stoger-Pollach M, Schattschneider P, Fuhs W, *et al.* "**Development of polycrystalline silicon thin-film solar cells within the european projec meteor**", Conf. Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, (2005), 669-872
- Gall S, Schneider J, Klein J, Hubener K, Muske M, Rau B, Conrad E, Sieber I, Petter K, Lips K, Stoger-Pollach M, Schattschneider P, Fuhs W, "**Large-grained polycrystalline silicon on glass for thin-film solar cells**", Thin Solid Films, 511-512, (2006), 7-14
- Gates S M, "**Kinetics and mechanisms of surface reactions in epitaxial growth of Si from SiH<sub>4</sub> and Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>**" Journal of Crystal Growth 120, 1-4 (1992) 269-274

- Geerligs L, Manshanden P, Wyers G, Ovrelid E, Raaness O, Waernes A, Wiersma B, **“Specification of solar grade silicon: how common impurities affect the cell efficiency on mC-Si solar cells”** Conf. Proceedings, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona (2005) 619-622
- Ghandhi, S.K. **“VLSI Fabrication Principles”**, 2nd Ed., Wiley Inter Science (1994)
- Givargizov, EI **“Growth of whiskers by the vapour-liquid-solid mechanism”** in Current Topics in Materials Science, Vol 1, North Holland Publishing Company (1978)
- Goetzberger A, Knobloch J, Voss B, **“Crystalline Silicon Solar Cells”**, Jonh Wiley & Sons, Inc, England, (1998), ISBN: 0471971448
- Goetzberger, A., Hebling, C., Schock, H., **“Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook”**, Materials Science and Engineering R40 (2003) pp1-46
- Gourdin G, **“Solar Cell Technology – Current State of the Art”** (2007) consultado em 31 de Julho de 2008 URL: <http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch471/documents/SolarCellsTechnology2.pdf>
- Green, M., Emery, K., Hisikawa, Y., Warta, W., **“Solar Cell Efficiency Tables (Version 30)”** Prog. Photovolt: Res. Appl. (2007); 15; 425-430
- Green MA, **“High Efficiency Solar Cells”**, Switzerland: Trans Tech Publications (1987) p155
- Hamamoto S, Morikawa H, Naomoto H, Kawama Y, Takami A, Arimoto S, Ishihara T, Namba K, **“Development of the VEST cell process for low cost fabrication”** Conf. Proceedings 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, (1997)
- Hanoka JI, **“An overview of silicon ribbon growth technology”**, Solar Energy Materials & Solar Cells, 65, (2001), 231-237
- Henriques, J.C., **“Desenvolvimento de Técnicas de Recristalização de Fitas de Silício para Aplicação Fotovoltaica”**, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (2002)
- Henriques, J.C., **“Estudo de um Processo de Cristalização de Fitas de Silício por Zona Fundida Linear”**, Relatório de Trabalho de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (2002)
- Hurrle A, Reber S, Schilinguer N, Haase J, Reichart JG, **“Hight-throughput continuos CVD reactor for silicon deposition”**, Conf. Proceedings 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, (2004), 459
- Kalejs JP, **“Silicon ribbons and foils-state of the art”**, Solar Energy Materials & Solar Cells,

72, (2002), 139-153

Kietzke T, “**Recent Advances in Organic Solar Cells**” *Advances in Optoelectronics* (2007)  
doi:10.1155/2007/40285

Kim HJ, Depauw V, Agostinelli G, Beaucarne G, Poortmans J, “**Progress in thin film free-standing monocrystalline silicon solar cells**”, *Thin Solid Films*, 511-512, (2006), 411-414

King, D., Schubert, W., Hund, T., “**World’s 1<sup>st</sup> 15% efficiency Multicrystalline silicon modules**” Conf. Record, 1<sup>st</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii (1994) 1660-1662

King, D., Rose, D., Koehler, O., Kaminar, N., Mulligan, B., “**Mass production of PV modules with 18% total-area efficiency and high energy deliver per Watt**” IEEE 4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, HI (2006) 2018-2023

Koch W, Endros AL, Franke D, Habler C, Kalejs JP, Moller HJ, “**Bulk Crystal Growth and Wafering for PV**”, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd (2003) ISBN: 0-471-49196-9

Liang ZC, Shen H, Xu NS, Reber S, “**Characterisation of direct epitaxial silicon thin film solar cels on a low-cost substrate**”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80, (2003), 181-193

Luke, A., Hegedus, S., “**Status, Trends, Challenges and the bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics**”, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd (2003) ISBN: 0-471-49196-9

Mackintosh B, Seidl A, Ouellette M, Bathey B, Yates D, Kalejs J, “**Large silicon crystal hollow-tube growth by the edge-defined film-fed growth (EFG) method**”, *Journal of Crystal Growth*, 278, (2006), 428-432

Marti A, Lopes N, Antolin E, Canovas E, Stanley C, Farmer C, Cuadra L, Luque A, “**Novel semiconductor solar cell structures: The quantum dot intermediate band solar cell**” *Thin Solid Films* 511-512 (2006) 638-644

Maycock, P., Bradford, T., “**PV Technology, Performance and Cost – 2007 Update**” Prometheus Institute for Sustainable Development , Cambridge, (2007)

Meier J, Sitznagel J, Kroll U, Bucher C, Fay S, Moriarty T, Shah A, “**Potencial amorphous and microcrystalline silicon solar cells**” *Thin Solid Films* (2004) 451-452: 518-524

Mertens RP, Overstraeten RJ “**Physics, Technology and Use of Photovoltaics**” Adam Hilger Ltd, UK (1986)

- Miles, R.,W., “**Photovoltaic Solar Cells: Choice of Materials and Production Methods**”, Vacuum 80 (2006) pp 1090-1097
- Nakayashiki K, Rousaville B, Yelundur V, Kim DS, Rohatgi A, Clark-Phelps R, Hanoka JI, “**Fabrication and analysis of high-efficiency String Ribbon Si solar cells**” Solid-State Electronics, 50, (2006), 1406-1412
- Nicolas X, Benzaoui A, Xin S, “ **Numerical simulation of thermoconvective flows and more uniform depositions in a cold wall rectangular APCVD reactor**” Journal of Crystal Growth 310 (2008) 174-186
- O’Mara WC, Herring RB, Hunt LP, “**Handbook of semiconductor silicon technology**”, Noyes Publications,USA (1990) ISBN: 0815512376
- Odden JO, Egeberg PK, Kjekshus A, “**From monosilane to crystalline silicon, Part I: Decomposition of monosilane at 690-830 K and initial pressures 0,1-6,6 Mpa in a free-space reactor**”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 86, (2005), 165-176
- Odden JO, Egeberg PK, “**Thermal decomposition of silane**” Agder University College, Noruega (2004) consultado em 24 de Setembro de 2008 URL: <http://energiparken.hia.no/silisiumdoktor.htm>
- Onischuk AA, Strunin VP, Ushakova MA, Panfilov VN, “**On the pathways of aerosol formation by thermal decomposition of silane**”, J. Aerosol Sci, 28, (1997), 207-222
- Peter K, Enebakk E, Friestad K, Tronstad R, Dethloff C, “**Investigation of Multicrystalline silicon solar cells from solar grade silicon feedstock**” Conf. Proceedings, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona (2005) 615-618
- Market Survey-Cell & Module Production 2007 , Photon International, 3/2008
- Pierson HO, “**Handbook of Chemical Vapor Deposition: Principles, Technology and Applications**”, Noyes Publications, USA (1992) ISBN: 0815513003
- Pinto, C.R, Gambôa, R.C., Henriques, J.C., Serra, J.M., Alves, J. Maia, Vallera, A.M. “**Silicon sheet from silane: first results**”, Solar Energy Materials & Solar Cells 72 (2002) pp. 209-217
- Pinto, C.R., Serra, J.M., Brito, M.C., Gamboa, R., Alves, J.Maia, Vallera, A.M. “**Zone Melting Recrystallization of Self Supported Silicon Ribbons Obtained by Fast CVD From Silane**”, Proceedings of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (2006) 1099-1100
- Pinto, C.R., J.M.Serra, M.C.Brito, R.Gamboa, J.Maia Alves, A.M.Vallera, “**First Solar Cells on Silicon Ribbons Obtained by Fast CVD from Silane**”, Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2007) Milão

- Pinto, C.R., “**Crescimento de Silício Policristalino por CVD sobre Silício Poroso para Aplicações Fotovoltaicas**”, Relatório de Estágio da Licenciatura em Engenharia Física, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (2000)
- Poortmans J, Beaucarne G, “**Photovoltaics and microelectronics: going their own way or still cross-fertilizing?**” Conf. Proceedings, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona (2005)
- Reber S, Zimmermann W, Kieliba T, “**Zone melting recrystallization of silicon films for crystalline silicon thin-film solar cells**”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 65, (2001), 409
- Reber S, Hurre A, Eyer A, Willeke G, “**Crystalline silicon thin-film solar cells – recent results at Fraunhofer ISE**”, Solar Energy 77 (2004) 865-875
- Reber S, Eyer A, Haas F, Schillinger N, Janz S, Schmich E, “**Progress in crystalline silicon thin-film solar cell work at Fraunhofer Ise**”, Conf. Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, (2005), 694-697
- Reber S, Eyer A, Haas F, “**High-throughput zone-melting recrystallization for crystalline silicon thin-film solar cells**”, Journal of Crystal Growth, 287, (2006), 391-396
- Rogol M, Flynn H, Porter C, Rogol J, Song J, “**Solar Annual 2007 – Big Things in a Small Package**”, Solar Verlag GmbH’s Photon Consulting unit (2007) Germany
- Rohatgi A, Kim DS, Nakayashiki K, Yelundur V, Rounsaville B, “**High-efficiency solar cells on edge-defined film-fed grown (18,2%) and string ribbon (17,8%) silicon by rapid thermal processing**”, Applied Physics Letters, volume 48, Number 1, (2004), 145-147
- Schroder DK, “**Semiconductor Material and Device Characterization**”, 2nd Ed, John Wiley & Sons, Inc, USA, (1998), ISBN: 0471241393
- Schuegraf KK, “**Handbook of thin film deposition processes and techniques**” Noyes Publications, USA (1988) ISBN: 0815511531
- Schuegraf KK, “**Handbook of Thin-Film deposition processes and techniques**”, Noyes Publications, USA
- Schultz, O., Glunz, S., Willeke, G. “**Multicrystalline Silicon Solar Cells Exceeding 20% Efficiency**” Prog. Photovolt: Res. Appl. 12 (2004) 553-558
- Serra J, Gamboa R, Vallera A. “**Optical absorption coefficient of polycrystalline silicon with very high oxygen content**” Materials Science and Engineering B36, 73 (1996)

- Serra, J.M.A. “**Estudo de um Processo de Preparação de Fitas de Silício para Aplicação Fotovoltaica**”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, (1995)
- Seymour K, “**Materials, Properties and Preparation**”, in Moss TS, “**Handbook of Semiconductors**”, North-Holland Publishing Company, Vol3 (1980)
- Siemer, J., “**First Steps into Solar Age**”, Photon International 6 (2004) pp 65
- Silva, J.A., Costa, I., Brito, M.C., Serra, J.M., Alves, J. Maia, Vallera, A.M. “**Progress in the use of Sprayed Boric Acid as Dopant source for Silicon Ribbons**”, Proc. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden (2006) p1064.
- Silva, J.A., Brito, M.C., Costa, I., Alves, J. Maia, Serra, J.M., Vallêra, A.M., “**Sprayed Boric Acid as Dopant Source for Silicon Ribbons**” Solar Energy Materials and Solar Cells, 91, Issue 20 (2007) pp. 1948-1953
- Sinke, W.,C., and working group, “**A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology**”, Office for Official Publications of the European Communities (2007)
- Stewart D, Beck P, Thumser U, “**Growth of Native Oxide**” (2003), consultado em 24 Setembro 2008 URL: <http://snf.stanford.edu/Process/Characterization/NativeOx.html>
- Surek T, “**Crystal growth and materials research in photovoltaics: progress and challenges**”, Journal of Crystal Growth, 275, (2005), 292-304
- Swihart MT, Girshick S, “**Thermochemistry and kinetics of silicon Hydride Cluster formation during thermal decomposition of silane**”, Journal Physics Chemistry B (1998)
- Swihart MT, Nijhawan S, Mahajan MR, Suh SM, Girshick SL, “**Modeling the nucleation kinetics and aerosol dynamics of particle formation during CVD of silicon from silane**”, J.Aerosol Sci, 29, (1998), 79-80
- Sze SM, “**Semiconductors Devices**” John Wiley & Sons, Inc, USA, (1985), ISBN: 0471837040
- Tanaka Y, Akema N, Morishita T, Okumura D, Kushiya K “**Improvement of  $V_{oc}$  upward of 600mV/cell with CIGS-based absorber prepared by Selenization/Sulfurization**” Conf. Proceedings, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich (2001) 984-994

- Tayanaka H, Yamauchi K, Matsushita T, “**Thin-film crystalline silicon solar cells obtained by separation of a porous silicon sacrificial layer**”, Conf. Proceedings 2nd World PVSEC (1998) 1272
- Van Nieuwenhuysen K, Duerinckx F, Kuzma I, Van Gestel D, Beaucarne G, Poortmans J, “**Progress in epitaxial deposition on low-cost substrates for thin-film crystalline silicon solar cells at IMEC**” Journal of Crystal Growth, 287, (2006), 438-441
- Valente G, Cavallotti C, Masi M, Carrà S, “**Reduced order model for the CVD of epitaxial silicon from silane and chlorosilanes**” Journal of Crystal Growth 230 (2001) 247-257
- Vallêra, A., Brito, M.,” **Meio Século de História Fotovoltaica**” Gazeta de Física, (2006)
- Van Gestel D, Gordon I, Carnel L, Van Nieuwenhuysen K, D’Haen J, Irigoyen J, Beaucarne G, Poortmans J, “**Influence of seed layer morphology on the epitaxial growth of polycrystalline-silicon solar cells**”, Thin Solid Films, 511-512, (2006), 35-40
- Verlinden PJ, Swason RM, Crane RA, Wickham K, Perkins J, “**A 26,8% efficiency concentrator point contact solar cell**” 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (1995) 1582-1585
- Wallace RL, Hanoka JJ, Rohatgi A, Crotty G, “**Thin Silicon String Ribbon**”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 48, (1997), 179-186
- Weidhaus D, Schindlbeck E, Hesse K, Dornberger E, “**Pilot production of granular polysilicon from trichlorosilane using a fluidized bed-type reactor**”, Conf. Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, (2005), 565-568
- Wu X, Keane JC, Dhere RG, DeHart C, Duda A, Gessert TA, Asher S, Levi DH, Sheldon P, “**16,5% efficiency CdS/CdTe polycrystalline thin film solar cells**” Conf. Proceedings, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich (2001) 995-1000
- Yamamoto K, Yoshimi M, Tawada Y, Okamoto Y, Nakajima A, “**Thin film Si solar cell fabricated at low temperature**”, Journal of Non-Crystalline Solids, 266-269, (2000) 1082-1087
- Yang J, Banerjee A, Sugiyama S, Guha S, “**Recent progress in amorphous silicon alloy leading to 13% stable cell efficiency**” 26th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Anaheim (1997) 563-568
- Yochimi M, Sasaki T, Sawada T, Meguro T, Matsuda T, Ichikawa M, Nakajima A, Yamamoto K, “**High efficiency thin film silicon hybrid solar cell module on 1m<sup>2</sup>-class large area substrate**” Conf. Record, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka (2003) 1566-1569

- Zhao, J. Wang, A., Green, M. **“24,5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24,7% efficiency PERL cells on FZ substrates”** Prog. Photovolt: Res. Appl. 7 (1999) 471
- Zhao, J., Wang, A., Green, M., **“24,5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24,7% efficiency PERL cells on FZ substrates”**, Progress Photovoltaics 7 (1999) 471
- Zhao J, Wang A, Green M, **24.5% efficiency PERT silicon solar cells on SEH MCZ substrates and cell performance on other SEH CZ and FZ substrates**, Solar Energy Materials and Solar Cells ,66, 2001, 27-36,
- Zhao J, **Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials** [Solar Energy Materials and Solar Cells](#) 82., (2004), 53-64

A - Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	145
B - Lista de Publicações .....	147
C - Lista de Figuras .....	149
D - Lista de Tabelas.....	155
Bibliografia.....	157