República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0706547-7 A2**

BRPI0706547A2

(22) Data de Depósito: 18/01/2007
(43) Data da Publicação: 29/03/2011
(RPI 2099)

(51) Int.Cl.:
C30B 11/14
H01L 31/18

(54) Título: **MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE SILÍCIO MOLDADO E DE CÉLULA SOLAR, CÉLULAS SOLARES, CORPOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINOS CONTÍNUOS, BOLACHAS E SILÍCIO**

(30) Prioridade Unionista: 20/01/2006 US 60/760,453, 30/05/2006 US 60/808,954, 24/08/2006 US 60/839,670, 24/08/2006 US 60/839,672

(73) Titular(es): BP CORPORATION NORTH AMERICA INC.

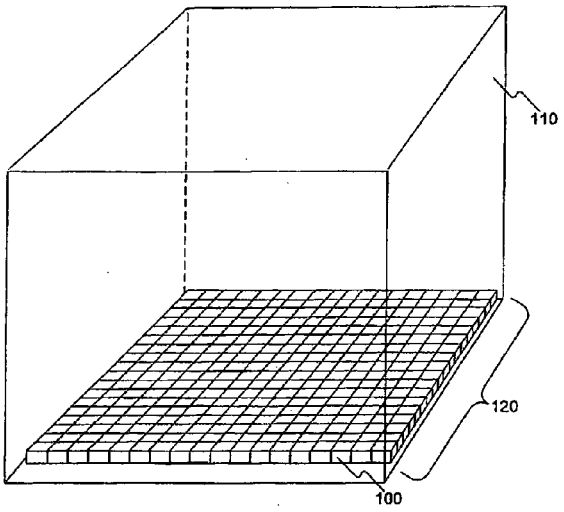
(72) Inventor(es): Nathan G. Stoddard

(74) Procurador(es): Hugo Silva & Maldonado Prop. Int

(86) Pedido Internacional: PCT US2007060661 de 18/01/2007

(87) Publicação Internacional: WO 2007/084934de 26/07/2007

(57) Resumo: Métodos de Fabricação de Sílicio Moldado e de Célula Solar, Células Solares, Corpos de Sílicio Monocristalinos Contínuos, Bolachas e Sílicio. Métodos e aparelhos são providos para moldagem de silício para células fotovoltaicas e outras aplicações. Com esses métodos e aparelhos, pode ser formado um corpo moldado de silício monocristalino que é isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos distribuídos radialmente e tendo pelo menos duas dimensões que são, cada uma, de pelo menos cerca de 35 cm.



PI0706547-7

Métodos de Fabricação de Silício Moldado e de Célula Solar, Células Solares, Corpos de Silício Monocristalinos Contínuos, Bolachas e Silício"

Relatório Descritivo

Esta invenção foi feita com o apoio do Governo dos Estados Unidos da América dentro do sub-contrato n° ZDO-2-30628-03 do National Renewable Energy Laboratory (NREL) dentro do contrato n° DE-AC36-98GO10337 do Departamento de Energia (DOE), concedido pelo DOE. O Governo americano tem certos direitos sobre esta invenção.

Depósitos Relacionados

Este Pedido reivindica o benefício da prioridade do Pedido Provisório US 60/760.453, depositada em 20 de janeiro de 2006, Pedido Provisório US 60/808.954, depositada em 30 de maio de 2006, Pedido Provisório US 60/839.672, depositada em 24 de agosto de 2006 e Pedido Provisório US 60/839.670, depositada em 24 de agosto de 2006, cuja totalidade é aqui expressamente incorporada neste documento por referência nas suas totalidades.

Campo Técnico

A presente invenção refere-se em geral ao campo dos fotovoltaicos e a métodos e aparelhos para a fabricação de silício moldado para aplicações fotovoltaicas. A invenção ainda refere-se a novas formas de silício moldado que podem ser usadas para fabricar dispositivos, tais como células fotovoltaicas e outros dispositivos semi-condutores. O novo silício pode ter uma estrutura monocristalina e pode ser fabricado por um processo de moldagem.

Informações Antecedentes

As células fotovoltaicas convertem luz em corrente elétrica. Uma das mais importantes medidas de uma célula fotovoltaica é sua eficiência na conversão de energia luminosa em energia elétrica. Embora as células fotovoltaicas possam ser fabricadas a partir de uma variedade de materiais semicondutores, o silício é geralmente usado porque está prontamente disponível a um custo razoável e porque tem um balanço apropriado de propriedades elétricas, físicas e químicas para uso na fabricação de células fotovoltaicas.

Em um procedimento conhecido de fabricação de células fotovoltaicas, uma carga de silício é misturada com um material (ou dopante) para indução de um tipo de condutividade seja positiva ou negativa fundida e, então, cristalizada, seja pela retirada do silício cristalizado de uma zona de fusão em lingotes de silício monocristalino (via os métodos de Czochralski (CZ) ou da zona de flutuação (FZ)) seja moldado em blocos ou "tijolos" de silício multicristalino ou silício policristalino, dependendo do tamanho do grão dos grãos de silício individuais. No procedimento descrito acima, os lingotes ou blocos são cortados em substratos finos, também referidos como bolachas, por métodos conhecidos de fatiamento ou corte. Estas bolachas podem, então, ser processadas em células fotovoltaicas.

O silício monocristalino para uso na fabricação de células fotovoltaicas é geralmente produzido pelos métodos CZ ou FZ, sendo ambos processos nos quais um cristal sintético puro na forma cilíndrica de silício cristalino é produzido. Para um processo CZ, o cristal sintético puro é vagarosamente retirado de um reservatório de silício fundido. Para um processo FZ, o material sólido é alimentado através de uma zona de fundição e solidificado de novo no outro lado da zona de fundição. Um cristal sintético puro de silício monocristalino, fabricado destes modos, contém uma distribuição radial de impurezas e defeitos,

tais como anéis de falhas de empacotamento induzidas pelo oxigênio (OSF) e defeitos de "rotação" de aglomerados intersticiais ou vazios. Mesmo com a presença destas impurezas e defeitos, o silício monocristalino é geralmente uma fonte preferida de silício para a produção de células fotovoltaicas por que ele pode ser usado para produzir células solares de alta eficiência. O silício monocristalino é, todavia, mais caro de produzir do que o silício multicristalino convencional, usando técnicas conhecidas tais como aquelas descritas acima.

O silício multicristalino convencional para uso na fabricação de células fotovoltaicas é geralmente produzido por um processo de moldagem. São conhecidos processos de moldagem para o preparo de silício multicristalino convencional na técnica da tecnologia fotovoltaica. Resumidamente, nesses processos, o silício fundido é contido em um cadinho, tal como um cadinho de quartzo e é resfriado de um modo controlado para permitir a cristalização do silício contido no mesmo. O bloco de silício multicristalino que resulta é geralmente cortado em tijolos tendo uma seção transversal que é a mesma ou próxima da mesma do tamanho da bolacha a ser usada na fabricação de uma célula fotovoltaica e os tijolos são cortados ou de outra forma cortados em tais bolachas. O silício multicristalino produzido de tal modo é uma aglomeração de grãos de cristal onde, dentro das bolachas feitas do mesmo, a orientação dos grãos com relação uns aos outros é efetivamente aleatória.

A orientação aleatória dos grãos, seja no silício multicristalino convencional ou policristalino, torna difícil texturizar a superfície de uma bolacha resultante. A texturização é usada para aumentar a eficiência de uma célula fotovoltaica pela redução da reflexão da luz e aumentando a absorção da energia luminosa através da superfície de uma célula. Além disso, "dobras" que se formam nos limites entre os grãos do silício multicristalino convencional tende a nuclear defeitos estruturais na forma de aglomerados ou linhas de deslocamentos.

Acredita-se que estes deslocamentos e as impurezas que eles tendem a atrair causam uma recombinação rápida de condutores de carga elétrica em uma célula fotovoltaica que funciona feita de silício multicristalino convencional. Isto pode causar uma diminuição da eficiência das células. As células fotovoltaicas feitas de tais silícios multicristalinos geralmente tem baixa eficiência comparada à células fotovoltaicas equivalentes feitas de silício monocristalino, mesmo considerando a distribuição radial dos defeitos presentes no silício monocristalino produzido por técnicas conhecidas. Todavia, por causa da simplicidade relativa e baixo custo de fabricação de silício monocristalino convencional, bem como o efetivo defeito de passivação no processamento da célula, o silício multicristalino é a forma mais largamente usada de silício para a fabricação de células fotovoltaicas.

Algumas técnicas anteriores de moldagem envolviam o uso de um cadinho de "parede fria" para crescimento de cristal. O termo "parede fria" refere-se ao fato de que serpentinas de indução presentes sobre ou dentro das paredes do cadinho são resfriadas a água e podem também ser embutidas, permanecendo, assim, geralmente abaixo de 100°C. As paredes do cadinho podem estar situadas bem perto entre as serpentinas e a carga. O material das paredes do cadinho não é particularmente isolado termicamente e pode desta forma permanecer em equilíbrio térmico com as serpentinas resfriadas. O aquecimento do silício não é desta maneira um predicado da radiação das paredes do cadinho, por que o aquecimento indutivo do silício no cadinho significa que o silício é aquecido diretamente pela corrente induzida que flui naquele lugar. Deste modo, as paredes do cadinho permanecem abaixo da temperatura de fusão do silício e são consideradas "frias" em relação ao silício fundido. Durante a solidificação do silício fundido aquecido indutivamente, estas paredes frias do cadinho agem como um sorvedouro de calor. Os lingotes se resfriam rapidamente, determinado pela radiação para as paredes frias. Desta forma, uma frente de solidificação

inicial rapidamente se torna substancialmente curva, com a nucleação do cristal ocorrendo nos lados dos lingotes e crescendo diagonalmente em direção ao centro dos lingotes, quebrando qualquer tentativa de se manter um processo de semeadura vertical e geometricamente ordenado ou uma frente de solidificação substancialmente plana.

Em vista do exposto acima, existe uma necessidade de uma forma de silício melhorada que possa ser usada para fabricar células fotovoltaicas. Existe também a necessidade de um silício que possa ser produzido em um processo que seja mais rápido e menos caro do que os processos que têm sido usados até então para produzir silício monocristalino. A presente invenção fornece esse silício e esses processos.

Sumário da Invenção

Conforme aqui usado, o termo "silício monocristalino" refere-se a um corpo de silício de cristal único, tendo uma orientação de cristal consistente através dele todo. Ainda, silício multicristalino convencional refere-se a silício cristalino tendo uma distribuição de tamanho de grão na escala do cm com múltiplos cristais orientados aleatoriamente localizados dentro do corpo do silício.

Ainda, como aqui usado, o termo "silício policristalino" refere-se a silício cristalino com tamanho de grão da ordem de mícron e múltiplas orientações de grãos localizadas dentro de um dado corpo de silício. Por exemplo, os grãos são tipicamente uma média entre submícron a submilímetro de tamanho (por exemplo, grãos individuais podem não ser visíveis ao olho nu) e orientação de grão distribuída aleatoriamente através dele todo.

Ainda mais, como aqui usado, o termo "silício próximo do monocristalino" refere-se a um corpo de silício cristalino tendo uma orientação de cristal consistente através de todo ele para maior do que 50% em volume do corpo, onde, por exemplo, tal silício próximo do

monocristalino pode compreender um corpo de silício de cristal único próximo a uma região multicristalina ou ele pode compreender um cristal de silício consistente grande, contiguamente que parcialmente ou totalmente contem cristais menores de silício de outras orientações de cristal, onde os cristais menores não compreendem mais do que 50% do volume total. Preferivelmente, o silício próximo do monocristalino pode conter cristais menores os quais não compreendem mais do que 25% do volume total. Com maior preferência, o silício próximo do monocristalino pode conter cristais menores os quais não se constituem em mais do que 10% do volume total. Ainda com maior preferência, o silício próximo do monocristalino pode conter cristais menores os quais não se constituem em mais do que 5% do volume total.

Conforme aqui usado, todavia, o termo "silício multicristalino ordenado geometricamente" (daqui em diante abreviado como "silício multicristalino geométrico") refere-se ao silício cristalino, de acordo com as modalidades da presente invenção, tendo uma distribuição de tamanho de grão na escala do cm ordenada geometricamente, com múltiplos cristais ordenados localizados dentro de um corpo de silício. Por exemplo, no silício multicristalino geométrico, cada grão tipicamente tem uma área da seção transversal média de cerca de 0,25 cm^2 a cerca de 2.500 cm^2 em tamanho e uma altura pode ser tão grande quanto o corpo do silício, por exemplo, a altura pode ser tão grande quanto a dimensão do corpo de silício que é perpendicular ao plano da seção transversal, com orientação de grão dentro de um corpo de silício multicristalino geométrico sendo controlado de acordo com orientações pré-determinadas. A forma da seção transversal do grão que é perpendicular à altura ou comprimento do grão de silício multicristalino geométrico é tipicamente a mesma forma da semente de cristal ou parte de uma semente de cristal sobre a qual ele foi formado. Preferivelmente, a forma da seção transversal do grão é poligonal. Preferivelmente, os cantos dos grãos poligonais correspondem às junções de três diferentes

grãos. Embora cada grão dentro de um corpo de silício multicristalino geométrico de preferência compreende silício tendo uma orientação de cristal consistente contiguamente através de todo aquele grão, um ou mais grãos podem também conter pequenas quantidades de cristais menores de silício de orientação diferentes. Por exemplo, cada tal grão pode parcialmente ou totalmente conter cristais menores de silício de outras orientações de cristal, onde tais cristais menores não constituem mais do que 25% do volume total do grão, de preferência não mais do que 10% do volume total do grão, com maior preferência não mais do que 5% do volume total do grão, ainda com maior preferência não mais do que 1% do volume total do grão e ainda com maior preferência não mais do que 0,1% do volume total do grão.

De acordo com a invenção com aqui realizada e amplamente descrita, é fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo um ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício e pelo menos uma parede de resfriamento; e formação de um corpo sólido de silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização, onde a formação inclui a formação de uma interface sólido-líquido numa borda do silício fundido que pelo menos inicialmente é paralela a pelo menos uma parede de resfriamento, a interface sendo controlada durante o resfriamento de forma a se mover numa direção que aumente a distância entre o silício fundido e pelo menos uma parede de resfriamento. É contemplado que uma das paredes do cadinho pode ser um fundo de um cadinho.

De acordo com uma modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: colocar um arranjo geométrico de uma pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino em pelo menos uma superfície em

um cadinho tendo uma ou mais paredes aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício e pelo menos uma parede de resfriamento, em que o arranjo geométrico dos cristais de semente de silício monocristalino inclui polígonos densamente empacotados; colocar o silício fundido em contato com o arranjo geométrico dos cristais de semente de silício monocristalino; e formação de um corpo sólido de silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização, onde a formação inclui a formação de uma interface sólido-líquido em uma borda do silício fundido que é paralela a pelo menos uma parede de resfriamento, a interface sendo controlada durante o resfriamento de forma a se mover na direção que aumenta a distância entre o silício fundido e pelo menos uma parede de resfriamento.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: o arranjo de uma pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino em um padrão pré-determinado de pelo menos duas superfícies de um cadinho; colocar o silício fundido em contato com os cristais de semente de silício monocristalino; e formação de um corpo sólido de silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido a partir de pelo menos duas superfícies do cadinho para controlar a cristalização, onde a formação inclui o controle de uma interface sólido-líquido em uma borda do silício fundido durante o resfriamento de forma a se mover na direção que aumenta a distância entre o silício fundido e pelo menos duas superfícies do cadinho.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício fundido, compreendendo: colocar a carga de silício em contato com pelo menos

um cristal de semente de silício monocristalino em pelo menos uma superfície; aquecer a carga de silício e pelo menos um cristal de semente de silício monocristalino até a temperatura de fusão do silício; controlar o aquecimento de forma a que pelo menos um cristal de semente de silício monocristalino não funda completamente, compreendendo o controle manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho; e, uma vez que pelo menos um cristal de semente de silício monocristalino seja parcialmente fundido, formar um corpo sólido de silício monocristalino pelo resfriamento do silício.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: colocar um arranjo geométrico de uma pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino em pelo menos uma superfície em um cadinho, em que o arranjo geométrico inclui polígonos densamente empacotados; colocar a carga de silício em contato com uma pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino em pelo menos uma superfície; aquecimento da carga de silício e da pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino até a temperatura de fusão do silício; controlar o aquecimento de forma que a pluralidade de cristais de semente não funda completamente, compreendendo o controle manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho; e, uma vez que pelo menos um cristal de semente de silício monocristalino seja parcialmente fundido, formar um corpo sólido de silício monocristalino pelo resfriamento do silício.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: o arranjo de uma pluralidade de cristais de semente de

silício monocristalino em um padrão pré-determinado de pelo menos duas superfícies de um cadinho; colocar a carga de silício em contato com a pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino em pelo menos duas superfícies; aquecimento da carga de silício e da pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino até a temperatura de fusão do silício; controlar o aquecimento de forma que a pluralidade de cristais de semente não funda completamente, compreendendo o controle manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho; e, uma vez que pelo menos um cristal de semente de silício monocristalino seja parcialmente fundido, formar um corpo sólido de silício monocristalino pelo resfriamento do silício.

De acordo com uma modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo um ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício, pelo menos um cristal de semente de silício arranjado para cobrir uma área inteira ou substancialmente inteira da superfície do vaso; e formação de um corpo sólido de silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização.

De acordo com uma modalidade da presente invenção, é também fornecido um corpo de silício monocristalino contínuo sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, e tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo ainda com outra modalidade da presente inven-

ção, é também fornecido um corpo de silício monocristalino contínuo tendo uma concentração de carbono de cerca de $2x10^6$ átomos/cm^3 a cerca de $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio não excedendo $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de nitrogênio de pelo menos $1x10^{15}$ átomos/cm^3, e tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um corpo de silício monocristalino moldado contínuo tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha formada a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e contatos condutores elétricos na bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha formada a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e contatos condutores elétricos na bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha de silício monocristalino contínua formada a partir de um corpo de silício monocristalino moldado contínuo sendo, a bolacha tendo pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 50 mm, e tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e contatos condutores elétricos na bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma bolacha, compreendendo: silício formado a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma bolacha, compreendendo: silício formado a partir de um corpo de silício monocristalino moldado contínuo, a bolacha tendo pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 50 mm, e tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo uma ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício e pelo menos

uma parede de resfriamento; e formação de um corpo sólido de silício próximo do monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização, onde a formação inclui a formação de uma interface sólido-líquido numa borda do silício fundido que pelo menos inicialmente é paralela a pelo menos uma parede de resfriamento, a interface sendo controlada durante o resfriamento de forma a se mover numa direção que aumente a distância entre o silício fundido e pelo menos uma parede de resfriamento.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um método de fabricação de silício moldado, compreendendo: colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo uma ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício, pelo menos um cristal de semente de silício arranjado para cobrir uma área inteira ou substancialmente inteira da superfície do vaso; e formação de um corpo sólido de silício próximo monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada sendo pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um corpo de silício próximo monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, e tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um corpo de silício próximo monocristalino tendo uma concentração de carbono de cerca de $2x10^6$ átomos/cm^3 a cerca de $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio não excedendo $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de nitrogênio de pelo

menos $1x10^{15}$ átomos/cm^3, e tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecido um corpo de silício próximo monocristalino moldado tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha formada a partir de um corpo de silício próximo monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e contatos condutores elétricos na bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha formada a partir de um corpo de silício próximo monocristalino moldado, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e contatos condutores elétricos na bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma bolacha, compreendendo: silício formado a

partir de um corpo de silício próximo monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma bolacha, compreendendo: silício formado a partir de um corpo de silício próximo monocristalino moldado, a bolacha tendo pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 50 mm, e tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha fatiada a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; um campo de superfície de trás opcional; uma ou mais camadas passivadoras opcionais; e uma pluralidade de contatos condutores elétricos em pelo menos uma superfície da bolacha.

De acordo ainda com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha fatiada a partir de um corpo de silício monocristalino moldado sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da

bolacha; um campo de superfície de trás opcional; uma ou mais camadas passivadoras opcionais; e uma pluralidade de contatos condutores elétricos em pelo menos uma superfície da bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, é também fornecida uma célula solar, compreendendo: uma bolacha de silício monocristalino contínua fatiada a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo e sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, a bolacha tendo pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 40 mm, e tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm; uma junção p-n na bolacha; um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; um campo de superfície de trás opcional; uma ou mais camadas passivadoras opcionais; e uma pluralidade de contatos condutores elétricos em pelo menos uma superfície da bolacha.

De acordo com outra modalidade da presente invenção, silício próximo monocristalino feito de acordo com a invenção contem até 5% em volume de cristais menores de silício de outras orientações de cristal. Preferivelmente, de acordo com outra modalidade da presente invenção, silício próximo monocristalino feito de acordo com a invenção contem até 1% em volume de cristais menores de silício de outras orientações de cristal. Ainda com maior preferência, de acordo com outra modalidade da presente invenção, silício próximo monocristalino feito de acordo com a invenção contem até 0,1% em volume de cristais menores de silício de outras orientações de cristal.

Aspectos adicionais e vantagens da invenção serão estabelecidos na descrição que se segue, sendo evidente a partir da descrição ou aprendido na prática das modalidades da invenção. Os aspectos e outras vantagens da invenção serão efetuados e atingidos por estruturas de dispositivos semicondutores e métodos e aparelhos de fabricar

particularmente apontadas na descrição escrita e reivindicações, bem como nos desenhos anexados.

É para ser compreendido que ambas a descrição geral precedente e a descrição detalhada seguinte são exemplificativoes e explanatórias e são pretendidas a fornecer explanação adicional da invenção como reivindicada. Esta invenção também inclui silício feito pelos métodos descritos e reivindicados aqui neste documento e bolachas e células solares feitas de tal silício.

Breve Descrição dos Desenhos

Os desenhos que acompanham o documento, os quais são incorporados e constituem uma parte desta especificação, ilustram modalidades da invenção e, juntos com a descrição, servem para explicar os aspectos, vantagens e princípios da invenção. Nos desenhos:

A **Figura 1** ilustra um arranjo exemplificativo de sementes de silício nas superfícies de fundo e lateral de um cadinho, de acordo com uma modalidade da presente invenção;

A **Figura 2** ilustra outro arranjo exemplificativo de sementes de silício nas superfícies de fundo e lateral de um cadinho; de acordo com uma modalidade da presente invenção;

As **Figuras 3A-3C** ilustram um exemplo de empilhamento de silício multicristalino ordenado geometricamente moldado em um cadinho, de acordo com uma modalidade da presente invenção;

A **Figura 4** ilustra outro exemplo de empilhamento para o silício multicristalino ordenado geometricamente moldado em um cadinho, de acordo com uma modalidade da presente invenção;

A **Figura 5** ilustra um exemplo de um empilhamento de sementes em matriz densamente empacotada em hexágono, de acordo

com uma modalidade da presente invenção;

A **Figura 6** ilustra um exemplo de uma matriz de forma poligonal tendo interstícios rombóides e triangulares, de acordo com uma modalidade da presente invenção;

A **Figura 7** ilustra um método exemplificativo, de acordo com uma modalidade da presente invenção; e

As **Figuras 8A-8G** e **9** ilustram processos de moldagem exemplificativoes para silício monocristalino ou ordenado geometricamente, de acordo com uma modalidade da presente invenção.

Descrição das Modalidades

A referência será feita agora em detalhe às modalidades da presente invenção, exemplos das quais estão ilustradas nos desenhos que a acompanham. Sempre que possível, os números de referência iguais ou similares serão usados em todos os desenhos para se referir às partes iguais ou semelhantes.

Nas modalidades consistentes com a invenção, a cristalização de silício fundido é conduzida por processos de moldagem usando um ou mais cristais de sementes. Como revelado aqui neste documento, tais processos de moldagem podem ser implementados de forma que o tamanho, forma e orientação dos grãos dos cristais no corpo moldado do silício cristalizado são controlados. Conforme aqui usado neste documento, o termo "moldado" significa que o silício é formado pelo resfriamento do silício fundido em um molde ou vaso usado para reter o silício fundido. Uma vez que um líquido, como o silício fundido, tomará a forma do recipiente no qual ele é colocado, é também contemplado aqui neste documento que o resfriamento do silício fundido pode também ser efetuado enquanto se confina o silício fundido por quaisquer meios e não apenas em um molde ou vaso. Como exemplo, o silício

pode ser formado pela solidificação em um cadinho, aonde a solidificação é iniciada a partir de pelo menos uma parede do cadinho e não através de um objeto estranho resfriado introduzido no meio fundido. O cadinho pode ter qualquer forma apropriada, tal como uma taça, um cilindro ou uma caixa. Assim, o processo de cristalização do silício fundido de acordo com esta invenção não é controlado ao se "puxar" um cristal sintético puro ou uma tira. Ainda, consistente com uma modalidade da presente invenção, o molde, vaso ou cadinhos incluem pelo menos uma superfície de "parede de lado quente" em contato com o silício fundido, Conforme aqui usado, o termo "parede de lado quente" refere-se a uma superfície que é isotérmica ou mais quente do que o silício fundido que ela contacta. Preferivelmente, uma superfície de parede de lado quente permanece fixa durante o processamento do silício.

Consistente com as modalidades da invenção, o silício cristalizado pode ser tanto monocristalino contínuo, silício próximo monocristalino ou multicristalino geométrico contínuo tendo orientações de grãos controladas. Conforme aqui usado neste documento, o termo "silício monocristalino contínuo" refere-se a um cristal de silício único, onde o corpo de silício é um corpo homogêneo de silício monocristalino e não pedaços menores de silício posto juntos para formar um pedaço maior de silício. Ainda, como aqui usado neste documento, o termo "silício multicristalino geométrico contínuo" refere-se a silício multicristalino geométrico onde o corpo do silício é um corpo homogêneo de silício multicristalino geométrico e não pedaços menores de silício colocados juntos para formar um pedaço maior de silício.

Consistente com as modalidades da presente invenção, a cristalização pode ser efetuada pelo posicionamento de uma coleção desejada de "sementes" de silício cristalino, por exemplo, no fundo de um vaso, tal como um cadinho de quartzo que pode conter silício fundido. Conforme aqui usado neste documento, o termo "semente"

refere-se a um pedaço de silício de formato de preferência geométrico com uma estrutura de cristal desejada, de preferência pelo menos uma seção transversal tem uma forma geométrica, de preferência poligonal e de preferência tendo um lado que se conforma à superfície de um vaso no qual ele pode ser colocado. Essa semente pode ser tanto um pedaço de silício monocristalino quanto um pedaço de silício multicristalino ordenado geometricamente, por exemplo, uma barra ou um corte de seção horizontal ou de outra forma obtido de um lingote de um silício monocristalino. Consistente com a presente invenção, uma semente pode ter uma superfície do topo que é paralela à sua superfície de fundo, embora este possa não ser o caso. Por exemplo, uma semente pode ser um pedaço de silício, variando em tamanho de cerca de 2 mm a cerca de 3.000 mm de lado a lado. Por exemplo, uma semente pode ser de cerca de 10 mm a cerca de 300 mm de lado a lado. O pedaço de silício pode ter uma espessura de cerca de 1 mm a cerca de 1.000 mm, de preferência de cerca de 5 mm a cerca de 50 mm. Um tamanho e forma apropriados da semente podem ser selecionados por conveniência e empilhamento. O empilhamento, como será descrito em mais detalhes abaixo, ocorre quando cristais de semente de silício são arranjados em uma orientação ou padrão geométrico pré-determinado de lado a lado, por exemplo, o fundo de um ou mais dos lados e as superfícies de fundo de um cadinho. É preferível que a semente ou sementes cubram a superfície inteira do cadinho próxima de onde elas estão localizadas, de forma que quando movendo a frente de solidificação de crescimento do cristal semeado para longe das sementes, o tamanho total da seção transversal do cadinho pode ser mantida como um cristal geométrico consistente.

O silício fundido é, então, permitido resfriar e cristalizar na presença das sementes, de preferência de uma maneira na qual o resfriamento do silício fundido é conduzido de forma que a cristalização do silício fundido se inicia no nível do topo original das sementes de

sólido ou abaixo e prossegue para longe, de preferência para longe no sentido ascendente, a partir das sementes. A interface líquido-sólido em uma borda do silício fundido conformar-se-á de preferência inicialmente a uma superfície de resfriamento do vaso, tal como a superfície de um cadinho, na qual ele está sendo moldado. De acordo com as modalidades da invenção, a interface líquido-sólido entre o silício fundido e o silício cristalizado pode ser mantida substancialmente plana por toda a parte, por exemplo, a parte inicial do estágio de solidificação ou todo o processo de moldagem. Em uma modalidade da invenção, a interface líquido-sólido de cada uma das bordas do silício fundido é controlada durante o resfriamento de forma a se mover numa direção que aumenta a distância entre o silício fundido e a superfície resfriada do cadinho, ao mesmo tempo em que, de preferência, mantém uma interface sólido-líquido substancialmente plana.

Desta forma, consistente com a presente invenção, a frente de solidificação pode ficar paralela à forma de uma superfície resfriada do vaso. Por exemplo, com um cadinho de fundo plano, a frente de solidificação pode permanecer substancialmente plana, com a interface sólido-líquido tendo um perfil controlado. A interface sólido-líquido pode ser controlada de forma que seu raio de curvatura diminua quando se está se movendo da borda para o centro. Alternativamente, a interface sólido-líquido pode ser controlada para manter um raio médio de curvatura de pelo menos metade da largura do vaso. Além do mais, a interface sólido-líquido pode ser controlada para manter um raio de curvatura médio de pelo menos duas vezes a largura do vaso. O sólido pode ter uma interface levemente convexa com um raio de curvatura de pelo menos cerca de quatro vezes a largura do vaso. Por exemplo, a interface sólido-líquido pode ter um raio de curvatura geralmente maior do que 2 m em um cadinho quadrado de 0,7 m, mais do que duas vezes a dimensão horizontal do cadinho e de preferência cerca de 8x a cerca de 16x de uma dimensão horizontal do cadinho.

De acordo com as modalidades da presente invenção, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo do monocristalino, de preferência moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 20 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 20 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm. Preferivelmente, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 30 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 30 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 40 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 40 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 50 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 50 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 60 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 60 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 70 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 70 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. De acordo com as modalidades da presente invenção, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo

ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 20 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm. Preferivelmente, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 30 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm. Com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 35 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 40 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 50 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 60 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo

monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 70 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

Um limite superior de tamanho horizontal de um lingote de silício moldado feito de acordo com as modalidades da invenção é apenas determinado pela tecnologia de moldagem e fabricação de cadinho e não pelo próprio método da invenção. Os lingotes tendo uma área de seção transversal de pelo menos 1 m^2 e até 4-8 m^2 podem ser manufaturados de acordo com esta invenção. De modo semelhante, um limite superior da altura do lingote pode estar relacionado com ciclos de tempo maiores e não aos fundamentos do processo de moldagem. Alturas de lingotes até cerca de 50 cm a cerca de 80 cm são possíveis. Assim, consistente com a invenção, um corpo de silício monocristalino contínuo, ou silício próximo monocristalino, pode ser feito crescer com sucesso de cerca de 66 cm x 66 cm de seção transversal, com uma peça de sólido retangular de silício monocristalino contínuo sendo pelo menos 33.750 cm^3 em volume. Ainda, consistente com a presente invenção, um corpo sólido de silício monocristalino contínuo moldado, ou silício próximo monocristalino, pode ser formado de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma tão larga quanto as dimensões interiores de um vaso de moldagem e a terceira dimensão sendo da mesma altura do lingote. Por exemplo, se o corpo moldado de silício monocristalino for um sólido em forma de cubo ou em formato retangular, estas dimensões acima referir-se-iam ao comprimento, largura e altura desses corpos.

De modo semelhante, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 10 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Preferivelmente, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico

moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 20 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 30 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 35 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 40 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 50 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 60 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm pode ser formado. Ainda com maior preferência, um corpo sólido de silício multicristalino geométrico moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma de pelo menos cerca de 70 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 5 cm. Assim, consistente com a invenção, pode ser feito crescer um corpo de silício multicristalino geométrico contínuo com sucesso de cerca de 66 cm x 66 cm de seção transversal, com uma peça de sólido retangular de silício multicristalino geométrico contínuo sendo pelo menos 33.750 cm^3 em volume. Ainda, consistente com a presente invenção, um corpo sólido de silício multicristalino geométrico contínuo moldado pode ser formado de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma tão

larga quanto as dimensões interiores de um vaso de moldagem. Por exemplo, se o corpo moldado de silício multicristalino geométrico for um sólido em forma de cubo ou em formato retangular, estas dimensões acima referir-se-iam ao comprimento, largura e altura desses corpos.

Pela condução da cristalização do silício fundido de uma maneira consistente com as modalidades da invenção, pode ser feito silício moldado tendo fronteiras de grãos específicas, ao invés de aleatórias e tamanhos de grãos específicos. Além disso, pelo alinhamento da(s) semente(s) de um modo tal que todas as sementes fiquem orientadas na mesma direção em relação uma à outra, por exemplo, a direção do pólo (100) sendo perpendicular ao fundo do cadinho e a direção do pólo (110) paralela a um dos lados de um cadinho retangular ou de seção transversal quadrada, podem ser obtidos corpos grandes de silício moldado que são ou quase são silício monocristalino em que a direção do pólo de tal silício moldado é a mesma daquela da(s) semente(s). De modo semelhante, outras direções do pólo podem ser perpendiculares ao fundo do cadinho. Além do mais, consistente com uma modalidade da invenção, a(s) semente(s) podem ser arranjadas de forma que qualquer direção do pólo comum seja perpendicular ao fundo do cadinho.

Quando silício monocristalino é feito pelo método convencional de remoção um cristal sintético puro de forma cilíndrica a partir de um recipiente de silício fundido, por exemplo, de acordo com os métodos CZ ou FZ, o silício monocristalino obtido contém impurezas e defeitos distribuídos radialmente, tal como defeitos de rotação (formados a parte de defeitos intrínsecos tais como vazios e átomos autointersticiais) e defeitos de anéis OSF. Os defeitos de rotação são átomos de silício intersticiais ou vazios, sejam na forma singular sejam na forma aglomerada. Esses defeitos de rotação podem ser detectados por topografia de raio-X e aparecem como "rotações" no silício. Eles também podem ser detectados após gravação ácida preferencial do silício para

delineação do defeito.

De acordo com os métodos convencionais CZ e FZ, a distribuição dos átomos de oxigênio dentro do silício e os defeitos no silício causados por esses átomos de oxigênio estão situados radialmente. Isto significa que eles tendem a ser arranjados em anéis, espirais ou estrias que são simétricas em relação ao eixo central. Os defeitos de anéis OSF são um exemplo particular disto, em que o oxigênio em escala nanométrica precipita faltas de empilhamento nucleadas em uma banda cilíndrica dentro de um lingote monocristalino removido ou cristal sintético puro de silício, resultando em bandas de defeitos circulares nas bolachas feitas de tal silício. Essas bandas podem ser observadas em uma amostra de silício após gravação ácida preferencial.

Tanto os defeitos de rotação como os defeitos de anéis OSF ocorrem nos cristais sintéticos puros de silício monocristalino pela remoção de um cristal sintético puro de forma cilíndrica a partir de um recipiente de silício fundido, por exemplo, de acordo com os métodos CZ ou FZ, devido à simetria rotacional do processo de remoção, os gradientes térmicos axiais e a rotação inerente ao processo. Em contraste, o silício pode ser feito por processos de moldagem de acordo com modalidades da presente invenção que não exiba esses defeitos de rotação e defeitos de anéis OSF. Isto é por que a incorporação de defeitos durante o processo de moldagem pode ser essencialmente distribuída aleatoriamente na interface crescente não influenciada pela rotação, em um corpo de silício que não possui simetria cilíndrica e em um processo onde as isotermas são essencialmente planas através do lingote durante todo o processo de solidificação e resfriamento.

Com relação às concentrações de impurezas de elementos leves no crescimento do silício por diferentes métodos, os níveis seguintes, mostrados na Tabela 1, são amplamente considerados característicos.

Tabela 1

	Concentrações (átomos/cm^3)		
	Oxigênio	**Carbono**	**Nitrogênio**
Zona de Flutuação	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^{14}$
Czochralski	$2 \times 10^{17} - 1 \times 10^{18}$	$< 1 \times 10^6$	$< 5 \times 10^{14}$
Moldagem	$2\text{-}3 \times 10^{17}$	$2 \times 10^6 - 5 \times 10^{17}$	$> 1 \times 10^{15}$

Partes dos lingotes CZ podem ser produzidas com tão baixa quanto 5×10^{17} átomos/cm^3 de oxigênio, mas não mais baixa. As concentrações de carbono e nitrogênio podem ser aumentadas nos lingotes FZ e CZ por dopagem intencional, mas a dopagem não excede o limite de solubilidade do sólido nestas técnicas (como se faz no material moldado) e lingotes dopados não tem sido feitos em tamanhos maiores do que 20 cm em diâmetro. Em contraste, lingotes moldados são tipicamente supersaturados com carbono e nitrogênio devido ao revestimento de liberação e o projeto da zona quente da fornalha. Como uma conseqüência, nitretos e carbetos precipitados estão em toda parte devido à nucleação e crescimento da fase líquida. Em adição, lingotes de cristal único moldado têm sido fabricados, de acordo com as modalidades da invenção, com os níveis de impurezas acima relatados e com tamanhos tão grandes quanto 50 x 50 x 20 cm^3 e 60 x 60 x 5 cm^3. Estas dimensões são apenas exemplificativas e não são consideradas limites superiores para o processo de moldagem da invenção.

Por exemplo, com relação aos níveis de impureza, são preferidas uma concentração de carbono dissolvido de cerca de $1\text{-}5 \times 10^{17}$ átomos/cm^3 (notação de cerca de 1×10^{17} a cerca de 5×10^{17} átomos/cm^3), uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de $2\text{-}3 \times 10^{17}$ átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de $1\text{-}5 \times 10^{15}$ átomos/cm^3 na moldagem do silício de acordo com a invenção. De acordo com as modalidades da presente invenção, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino, ou silício

próximo monocristalino, de preferência moldado, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 20 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 20 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Preferivelmente, um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 30 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 30 cm em um lado, e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm, pode ser formado, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino, ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 35 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 35 cm em um lado, e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm, , tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 40 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 40 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda

com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 50 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 50 cm num lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino, ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 60 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 60 cm de um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo sólido de silício monocristalino, ou silício próximo monocristalino, de preferência moldado, tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 70 cm, por exemplo, pelo menos cerca de 70 cm em um lado e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3.

De acordo com as modalidades da presente invenção, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 20 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm, tendo uma

concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Preferivelmente, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 30 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 35 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 10 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 40 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impure-

zas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 50 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, tendo de preferência pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 60 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, pode ser formado, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3. Ainda com maior preferência, pode ser formado um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino, sendo isento ou substancialmente isento de defeitos e/ou impurezas radialmente distribuídas, de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma pelo menos cerca de 70 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm, tendo uma concentração de carbono dissolvido de cerca de 1-5x10^{17} átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio dissolvido de cerca de 2-3x10^{17} átomos/cm^3 e uma concentração de nitrogênio dissolvido de cerca de 1-5x10^{15} átomos/cm^3.

Um limite superior de tamanho horizontal de um lingote de silício moldado feito de acordo com as modalidades da invenção, e tendo as concentrações de impurezas acima referidas, é apenas determinado pela tecnologia de moldagem e fabricação do cadinho e não pelo próprio método da invenção. Assim, consistente com a presente invenção, um corpo de silício monocristalino contínuo moldado, ou silício próximo monocristalino, tendo as concentrações de impurezas acima referidas,

pode ser formado de preferência tendo pelo menos duas dimensões sendo cada uma tão grande quanto as dimensões interiores do vaso de moldagem e uma terceira dimensão sendo da mesma altura que o lingote. Por exemplo, se o corpo moldado de silício monocristalino é um sólido de em forma de cubo ou forma retangular, estas dimensões acima referir-se-iam ao comprimento, largura e altura desses corpos.

A(s) semente(s) usada(s) no processo de moldagem, consistente com as modalidades da invenção, pode(m) ter qualquer tamanho e forma desejados, mas são peças em formato geométrico apropriado do silício monocristalino, silício próximo monocristalino ou silício multicristalino ordenado geometricamente, tal como peças de silício no formato quadrado, retangular, hexagonal, rombóide ou octogonal. Elas podem ser moldadas condizente com o empilhamento, de forma que podem ser colocadas ou "empilhadas" lado a lado e conformadas ao fundo de um cadinho em um padrão desejado. Também consistente com as modalidades da invenção, as sementes podem ser colocadas em um ou mais, incluindo todos, lados do cadinho. Tais sementes podem ser obtidas, por exemplo, pelo corte de uma fonte de silício cristalino, tal como um cristal sintético puro de silício monocristalino, em peças tendo as formas desejadas. As sementes podem também ser formadas pelo corte a partir de uma amostra seja de silício monocristalino, silício próximo monocristalino ou silício multicristalino geométrico contínuo feito pro um processo de acordo com as modalidades da invenção, de forma que a(s) semente(s) para uso em processos subseqüentes de moldagem podem ser feitas a partir de um processo de moldagem inicial. Assim, por exemplo, uma barra de um corte ou obtido de outra forma de um lingote de silício monocristalino ou próximo monocristalino, seja de silício monocristalino contínuo ou próximo monocristalino, pode funcionar como um molde para uma moldagem subseqüente de silício monocristalino contínuo ou próximo monocristalino. Esse cristal de semente pode ter o tamanho e a forma, ou substancialmente o

tamanho e a forma, de um lado, tal como o fundo, de um cadinho ou outro vaso no qual a semente é colocada. Para os propósitos de moldagem monocristalina, é preferível ter tão poucas sementes quanto possível para cobrir o fundo do cadinho de forma a evitar a incorporação de defeitos. Assim, a semente ou as sementes pode(m) ter um tamanho e forma, ou substancialmente o tamanho e forma, de um ou mais lados, tal como o fundo, de um cadinho ou outro vaso no qual a semente ou sementes é colocada para efetuar o método de moldagem de acordo com esta invenção.

Serão agora descritos os processos e aparelhos para preparar silício de acordo com certas modalidades da invenção. Todavia, deve ser compreendido que estes não são apenas modos de formar silício consistentes com os princípios da invenção.

Com referência à Figura 1, são colocadas sementes 100 no fundo de um cadinho com fundo e parede 110, tal como um cadinho de quartzo, de modo que qualquer delas está em contato próximo com a mesma orientação de modo a formar uma barra 120 orientada continuamente, grande. Alternativamente, elas podem ficar em contato próximo em desordem pré-selecionada de forma a produzir limites de grãos específicos com tamanhos de grãos escolhidos deliberadamente no silício resultante que é produzido. Isto é, para moldagem do silício multicristalino geométrico, a seção transversal do tamanho do grão, de preferência, a forma da seção transversal do silício multicristalino geométrico cristalizado resultante será igual ou se aproximará daquela das sementes e a altura do grão pode ser tão alto quanto a dimensão do silício que é perpendicular à seção transversal. Se for usado um cristal de semente multicristalino geométrico, por exemplo, um pedaço de barra de silício multicristalino geométrico ou de outra forma obtido de um lingote de silício multicristalino geométrico, tal como um cristal de semente ou cristais de sementes para moldagem de silício multicristalino geométrico, a seção transversal do tamanho de grão e, de preferên-

cia, a forma da seção transversal dos grãos do silício multicristalino geométrico resultante se aproximará dos grãos da semente ou sementes multicristalina geométrica. Assim, um pedaço de barra de silício multicristalino geométrico ou de outra forma obtido de um lingote de silício multicristalino geométrico pode ser um "cristal de semente de silício multicristalino geométrico" (também referido como "cristal de semente de silício multicristalino ordenado geometricamente") e pode funcionar como molde para uma moldagem subseqüente de silício multicristalino geométrico. Esse cristal de semente pode ter um tamanho e forma, ou substancialmente o tamanho e forma, de um lado, tal com o fundo, de um cadinho ou outro vaso no qual a semente é colocada. Quando esse cristal de semente for usado nesta invenção, o silício multicristalino geométrico resultante de preferência terá grãos de cristal que tem o mesmo ou substancialmente o mesmo tamanho e forma da seção transversal dos grãos na semente.

Preferivelmente, as sementes 100 são empilhadas e colocadas de forma a cobrir substancialmente a totalidade do fundo do cadinho 110. É também preferível que o cadinho 110 tenha um revestimento de liberação tal como um feito de sílica, nitreto de silício ou um líquido encapsulante, para ajudar na remoção do silício cristalizado do cadinho 110. Ainda, as sementes podem compreender uma barra ou barras de silício monocristalino com uma orientação de cristal desejada, cerca de 3 mm a cerca de 100 mm de espessura. Embore um número e tamanho específicos de sementes 100 sejam mostrados na Figura 1, será prontamente evidente para uma pessoa versada na técnica que ambos os número e tamanho de sementes podem ser aumentados ou diminuídos, dependendo da aplicação.

Referindo-se à Figura 2, podem também ser colocadas sementes 100 em uma ou mais paredes laterais 130, 140 do cadinho 110. As sementes 100 podem ser colocadas em todas as quatro paredes do cadinho 110, embora com o propósito de ilustração apenas, sementes

100 sejam mostradas apenas nas paredes 130, 140. Preferivelmente, as sementes 100 que são colocadas em qualquer das quatro paredes do cadinho 110 são na forma de coluna para facilitar o crescimento do cristal. De preferência, cada uma das sementes na forma de coluna colocadas em qualquer das quatro paredes do cadinho 110 terá a mesma orientação de grão que a semente colocada imediatamente abaixo dela na superfície do fundo do cadinho 110. No caso do crescimento do silício multicristalino geométrico, a colocação das sementes na forma de coluna desta maneira facilitará o crescimento dos grãos de silício multicristalino geométricos tão grandes quanto a altura do cadinho 110.

Ainda, com referência à Figura 2, as vantagens deste arranjo de sementes 110 são um processo de autopropagação, mais simples, mais rápido de moldagem de silício com alta cristalinidade e altas taxas de crescimento. Por exemplo, o silício pode ser fundido em uma "taça" de silício, consistindo de muitas sementes que são empilhadas juntas para formar uma cavidade, por exemplo, um fundo e várias paredes, dentro do cadinho 110. Num exemplo alternativo, a "taça" receptora é primeiramente trazida para a temperatura de fusão do silício, mas mantida em estado sólido, e então o silício fundido é derramado dentro e permitido alcançar o equilíbrio térmico. Então, em qualquer exemplo acima, o cadinho 110 é resfriado, onde o calor é removido do fundo e lados do cadinho 110 por, por exemplo, um material absorvedor de calor sólido (não mostrado) que irradia calor para o ambiente, enquanto calor é ainda aplicado ao topo aberto do cadinho 110. Desta forma, o lingote moldado resultante de silício pode ser tanto monocristalino ou multicristalino geométrico (dependendo dos tipos de sementes 100 usadas e suas orientações), e a cristalização prossegue mais rápido do que nos processos de moldagem multicristalino conhecidos. Para repetir o processo, uma parte dos lados e fundo do lingote de silício cristalizado é removida, usando técnicas conhecidas e pode ser reutilizada em um

processo de moldagem subseqüente. Preferivelmente, uma pluralidade de cristais de sementes, por exemplo, sementes 100, é arranjada de forma que uma direção de pólo comum entre as sementes 100 é perpendicular a cada um do fundo e um lado do cadinho 110, de forma que nenhuma borda de grão é formada entre o fundo e um lado do cadinho 110.

As Figuras 3A-3C ilustram um exemplo de empilhamento para moldagem de silício multicristalino geométrico em cadinho 110. A engenharia do grão do cristal pode ser conseguida pela cuidadosa criação, orientação, colocação e crescimento de cristal da semente. Figuras 3A e 3B, por exemplo, mostram duas barras de silício monocristalino 155, 165, nas quais diferentes direções (110) são indicadas. Ambas as barras tem uma direção perpendicular (100) em comum com suas superfícies. Cada barra de silício monocristalino 155, 165 é então cortada para formar muitos pedaços de silício, os quais se tornam sementes 150, 160. Os tipos de superfície podem ser uniformes, por exemplo, (100), por razões de textura ou escolhidos à vontade. A forma e tamanho dos grãos podem ser selecionados baseados no corte dos empilhamentos das barras de silício monocristalino 155 e 156, como mostrado na Figura 3B. Os ângulos de orientação relativa entre os empilhamentos vizinhos das peças 150, 160, determinam o tipo de fronteira do grão (por exemplo, ângulo alto, ângulo baixo ou idêntico) no silício multicristalino geométrico resultante. Na Figura 3A, por exemplo, duas orientações de grão da direção do pólo (100) são mostradas.

As sementes mostradas na Figura 3C são, então, compreendidas de peças de silício monocristalino empilhadas 150, 160 que têm relacionamentos de orientação selecionada específica com suas pilhas vizinhas. As peças de silício 150, 160 são então empilhadas no fundo do cadinho 110, como mostrado na Figura 3C, de forma que as duas direções (110) são alternantes, como mostradas pelas setas desenhadas nas peças 150, 160. É importante notar que as peças 150,

160 são projetadas como blocos quadrados grosseiros com propósitos ilustrativos somente, e pelas razões discutidas abaixo, poderiam ter outras formas.

Embora não mostrado na Figura 3C, as sementes podem também estar localizadas nos lados do cadinho, como na Figura 2. A Carga de silício (não mostrada) pode então ser introduzida no cadinho 110 sobre as peças 150, 160 e então fundida. Alternativamente, o silício fundido pode ser derramado no cadinho 110. No exemplo alternativo, o cadinho 110 é primeiro trazido para muito próximo da temperatura do silício ou até a temperatura do silício e, então, o silício fundido é vertido nele. Consistente com as modalidades da invenção, uma camada fina de sementes pode ser fundida antes de a solidificação começar.

Então, em qualquer exemplo acima, o cadinho 110 é resfriado, onde calor é removido do fundo do cadinho 110 (e lados apenas se as sementes estão empilhadas nas superfícies laterais também) por meio, por exemplo, de um material absorvedor de calor sólido que irradia calor para o ambiente, enquanto calor é ainda aplicado ao topo aberto do cadinho 110. Então, é introduzido silício fundido enquanto a semente é mantida como um sólido e a solidificação direcional do fundido causa o crescimento no sentido ascendente dos grãos na forma de coluna. Desta forma, o lingote moldado resultante de silício multicristalino geométrico imitará as orientações dos grãos das sementes de silício empilhados 150, 160. Uma vez esta técnica sendo implementada apropriadamente, o lingote resultante pode ser cortado, por exemplo, em barras horizontais para atuar como camadas de sementes para outros processos de moldagem. A barra pode ter, por exemplo, o tamanho e forma ou substancialmente o tamanho e forma de uma superfície, tal como o fundo, de um cadinho ou outro vaso usado para a moldagem. Por exemplo, apenas uma de tal barra pode ser usada para o processo de moldagem.

A Figura 4 ilustra uma variação no empilhamento mostrado na Figura 3C. Como exemplo de orientação de grão para o silício multicristalino geométrico moldado, peças de sementes 150, 160 são empilhadas com uma direção de pólo comum (001) sendo perpendicular ao fundo do cadinho 110. Na Figura 4, todas as variações das famílias de direção (110) estão representadas na peças de empilhamento 150, 160, como indicado pelas setas direcionais. Embora não mostrada nesta figura em particular, as sementes podem estar em um ou mais lados do cadinho 110.

Assim, a orientação dos cristais de semente em um cadinho usado para formar o silício pode ser escolhida de forma são formadas que bordas de grãos específicas no silício multicristalino geométrico moldado e onde essas bordas de grãos englobam formas geométricas. Em contraste ás modalidades desta invenção, processos conhecidos de moldagem envolvem a moldagem de grãos multicristalinos de uma maneira não controlada pela solidificação direcional a partir de uma massa fundida completamente de silício. Os grãos resultantes têm basicamente orientação e distribuição de tamanho aleatória. A orientação de grão aleatória torna difícil a textura efetiva da superfície de silício. Além disso, tem sido mostrado que as dobras nas bordas dos grãos, produtos naturais das técnicas de crescimento típicas, tendem a nuclear defeitos estruturais envolvendo aglomerados ou linhas de deslocamento. Estes deslocamentos e as impurezas que eles tendem a atrair, causam rápida recombinação dos condutores elétricos e a degradação do desempenho de um material fotovoltaico. Desta forma, consistente com uma modalidade da invenção, o planejamento e semeadura cuidadosa de uma rede com borda de grão regular para moldagem tanto do silício monocristalino ou silício multicristalino geométrico é efetuado de tal forma que o tamanho, forma e orientação dos grãos são explicitamente escolhidos de forma a maximizar um menor tempo de vida de condutor e agregação de impureza enquanto

minimiza os defeitos estruturais.

As bordas dos grãos podem ser escolhidas para serem planos lisos de forma a minimizar a nucleação de deslocamento enquanto mantém suas direções verticais durante o crescimento. Os tipos de bordas de grãos são escolhidos para maximizar a agregação de impurezas e liberação de estresse. As orientações dos grãos (e especialmente a orientação da superfície) são escolhidas para permitir a texturização, aumentar a superfície de passivação e aumentar a força do grão. O tamanho dos grãos é escolhido para otimizar o balanço entre distâncias de agregação efetivas e áreas de absorção grandes. Por exemplo, a moldagem de silício multicristalino geométrico pode ser efetuada de tal forma que o silício multicristalino geométrico tenha um tamanho de seção transversal de grão mínimo médio de pelo menos cerca de 0,5 cm a cerca de 10 cm com uma direção de pólo comum sendo perpendicular à superfície do silício multicristalino geométrico moldado, como mostrado, por exemplo, nas Figuras 3C e 4. O tamanho de seção transversal de grão mínimo médio pode ser cerca de 0,5 cm a cerca de 70 cm ou maior. Como descrito acima, o tamanho da seção transversal é compreendido como a dimensão mais comprida da seção transversal do grão que é perpendicular à altura ou comprimento do grão. O resultado líquido é um aumento global na eficiência do material fotovoltaico resultante.

Consistente com uma modalidade da invenção, um arranjo geométrico de uma pluralidade de cristais de sementes de silício monocristalino pode ser colocado pelo menos em uma superfície em um cadinho, por exemplo, uma superfície do fundo de um cadinho, em que o arranjo geométrico inclui polígonos densamente empacotados. Alternativamente, um arranjo geométrico de uma pluralidade de cristais de semente de silício monocristalino pode ser colocado de tal forma que o arranjo geométrico inclui hexágonos densamente empacotados ou formas poligonais tendo interstícios rombóides ou triangulares, como

mostrado, por exemplo, nas Figuras 5 e 6. Ainda noutra alternativa, ao invés de usar uma pluralidade de cristais de semente monocristalino, uma seção ou barra de corte de silício ou de outra forma obtida a partir de um lingote produzido em uma moldagem prévia de silício monocristalino ou silício próximo monocristalino pode ser usado como um cristal de semente único para moldar silício monocristalino ou silício próximo monocristalino de acordo com esta invenção. Esse cristal de semente único pode ter o mesmo tamanho e forma, ou substancialmente o mesmo tamanho e forma, como uma superfície do cadinho ou outro vaso usado para conduzir a moldagem. Mais especificamente, a Figura 5 ilustra um exemplo de uma matriz de empacotamento denso de hexágonos 170. Em contraste, a Figura 6 ilustra um exemplo de uma matriz de formas poligonais tendo interstícios rombóides e triangulares 180, 190. Ambas as matrizes são discutidas em mais detalhes abaixo. Quaisquer dos arranjos discutidos acima são também aplicáveis a uma modalidade para moldar seja um corpo sólido de silício monocristalino, um corpo sólido de silício próximo monocristalino ou um corpo sólido de um silício multicristalino geométrico, onde os cristais de semente são colocados em ambas as superfícies, fundo e lado do cadinho.

Os grãos de cristal de silício produzidos pela moldagem de um corpo de silício multicristalino geométrico, consistente com as modalidades da invenção, podem ser crescidos de um modo na forma de coluna. Ainda, esses grãos de cristal podem ter uma seção transversal que é, ou é próxima, à forma da semente da qual ela é formada. Quando fazendo silício que tenha tais bordas de grão selecionadas especificamente, de preferência as junções da borda do grão apenas têm três bordas de grãos se encontrando em um canto. Como mostrado na Figura 5, arranjos hexagonais de cristais de semente 170 são desejáveis para o empilhamento das sementes onde a orientação do cristal é tal que os átomos no plano horizontal tenham simetria de três dobras ou seis dobras, tal como (111) para o silício. Assim, a Figura 5 ilustra uma

vista em plano de uma parte de uma coleção de sementes em forma hexagonal para arranjo no fundo de um cadinho apropriado, tais como aqueles mostrados nas Figuras 1 e 2. As setas indicam a orientação da direção (110) do cristal de silício nas sementes.

Alternativamente, para orientações com simetria de quatro dobras, uma configuração geométrica diferente das sementes pode ser usada para manter bordas de grãos estáveis, simétricas através dos múltiplos grãos enquanto ainda satisfazendo a regra da borda com três grãos no canto. Por exemplo, se θ for uma desorientação entre a direção (110) e os lados primários de um octógono com um pólo (100) e α é o ângulo do vértice de um rombo intersticial, como mostrado na Figura 6, todos os grãos de cristal terão uma borda de grão simétrica com relação à direção (110) se $\alpha = 90° - \theta$. Neste exemplo, todos os grãos de cristal têm uma direção de pólo (100) perpendicular ao plano do papel no qual a Figura 6 está desenhada. Assim, a Figura 6 é uma vista de plano de uma parte de uma coleção de sementes em forma octogonal ao longo com sementes em forma de losango 180, 190 para arranjo no fundo de um cadinho apropriado, tal como aquele mostrado nas Figuras 1 e 2. As setas indicam a orientação da direção (110) do cristal de silício nas sementes.

A Figura 7 é um fluxograma que mostra um método exemplificativo de fabricação de silício consistente com a presente invenção. Consistente com a Figura 7, o método 700 pode começar pela seleção dos cristais de semente de silício monocristalino para crescimento de silício monocristalino ou multicristalino geométrico e arranjo dos cristais de sementes de silício monocristalino em um cadinho (etapa 705). Alternativamente, pode ser usado um corte de barra único ou de outra forma obtido de um lingote de silício monocristalino ou silício multicristalino ordenado geometricamente como um cristal de semente único. A seguir, a carga de silício pode ser adicionada ao cadinho (etapa 710). O cadinho é então aquecido a partir do topo enquanto o fundo do

cadinho é resfriado a partir do fundo (seja passivamente ou ativamente; veja etapa 715). Durante a fusão, o estágio de fusão do silício é monitorado para determinar e controlar a posição da interface sólido-líquido (etapa 720). O estágio de fusão do silício é permitido de ocorrer até que uma parte dos cristais de semente de silício monocristalino é fundida (etapa 725). Uma vez que uma parte desejada do silício monocristalino é fundida, o estágio de fusão é terminado e o estágio de crescimento de cristal se inicia (etapa 730). O crescimento de cristal é permitido continuar unidirecional e verticalmente dentro do cadinho até que a cristalização do silício esteja completa (etapa 735). Se as sementes estão arranjadas para crescimento de silício multicristalino geométrico, a cristalização da etapa 735 produzirá um lingote de silício multicristalino geométrico com grãos na forma de coluna (etapa 740). Alternativamente, se as sementes são arranjadas para crescimento de silício monocristalino, a cristalização da etapa 735 produzirá um lingote de silício monocristalino (etapa 745). Finalmente, o lingote produzido em qualquer das etapas 735 ou 745 é removido para processamento posterior (etapa 750).

Como mostrado na Figura 8A, a carga de silício 200 pode ser introduzida no cadinho 210 contendo sementes 220 de, por exemplo, um ou dois modos. No primeiro, o cadinho 210 é carregado na sua capacidade plena com carga de silício sólido 200, apropriado na forma de pedaços grossos de tamanhos convenientes e o cadinho carregado 210 é colocado em uma estação de moldagem (não mostrada).

Como mostrado na Figura 8B, o perfil térmico de um cadinho 210 é fixado de forma que o topo da carga do silício no cadinho 110 seja aquecido até a fusão, enquanto o fundo é ativamente ou passivamente resfriado para manter a fase sólida das sementes 220 no fundo do cadinho 210, isto é, de forma que eles não flutuam quando a carga 200 é fundida. Um material sólido de sumidouro de calor 230 está em contato com o fundo do cadinho 210 para irradiar o calor para paredes

resfriadas por água. Por exemplo, o material de sumidouro de calor 230 pode ser um bloco sólido de grafite e pode ter, de preferência, dimensões tão grandes ou maiores do que o fundo do cadinho. Consistente com a invenção, por exemplo, o material de sumidouro de calor pode ser 66 cm por 66 cm por 20 cm, quando usado com um cadinho tendo uma superfície de fundo que seja 66 cm por 66 cm. As paredes laterais do cadinho 210 são, de preferência, não resfriadas de qualquer modo, desde que as sementes 220 estejam localizadas apenas no fundo do cadinho 210. Se as sementes 220 estivessem localizadas no fundo e nos lados do cadinho 210, então o material de sumidouro de calor 230 estaria localizado em ambos o fundo e os lados do cadinho 210 para manter o perfil térmico desejado.

A fase em fusão da carga de silício 200 é monitorada de perto para determinar a posição da interface entre o silício fundido e as sementes. Preferivelmente, a fusão 240 (como mostrado na Figura 8B) prossegue até que a carga de silício 200 exceto pelas sementes 220 seja completamente fundida, após o que as sementes 220 são parcialmente fundidas. Por exemplo, o aquecimento pode ser controlado de perto de forma que as sementes 220 não fundam completamente, pela manutenção de um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar no cadinho. Preferivelmente, o aquecimento pode ser controlado de perto pela manutenção de um ΔT de cerca de 0,05 °C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar no cadinho. Por exemplo, consistente com a invenção, o ΔT pode ser medido na superfície externa do cadinho entre o cadinho e um bloco grande de grafite, e uma haste de imersão pode ser inserida na fusão 240 para medir a profundidade da fusão, de forma a calcular a parte das sementes 220 que tenham fundido.

Como mostrado na Figura 8C, a parte 250 ilustra uma par-

te fundida da espessura total das sementes 220, abaixo da fusão 240. Após a parte 250 das sementes 220 serem fundidas abaixo da fusão 240, o estágio de fusão é então rapidamente terminado e o estágio de crescimento de cristal é iniciado, onde o aquecimento no topo do cadinho 210 é diminuído e/ou o resfriamento do fundo no material de sumidouro de calor 230 é aumentado. Como um exemplo deste processo, o gráfico mostrado na Figura 8D ilustra a fusão de uma parte 250 das sementes 220 em função do tempo. Como mostrado na Figura 8D, uma parte das sementes tendo uma espessura inicial entre 5 e 6 cm é gradualmente fundida até apenas sob 2 cm de onde a semente sólida permanece. Por exemplo, o aquecimento pode ser controlado de perto de forma que as sementes 220 não fundam completamente, pela manutenção de um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho (por exemplo, através de um termopar montado no bloco de resfriamento), após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar no cadinho. Preferivelmente, o aquecimento pode ser controlado de perto pela manutenção de um ΔT de cerca de 0,05°C/minuto ou menos, como medido na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar no cadinho. Neste ponto, o estágio de fusão é então rapidamente terminado e o estágio de crescimento de cristal é começado, o qual é indicado pelo aumento comparativo na espessura do sólido medido na ordenada do gráfico.

Então, como mostrado na Figura 8E, o crescimento do cristal semeado continua unidirecional e verticalmente, dentro do cadinho 210 até que a cristalização do silício esteja completa. O ciclo de moldagem termina quando o gradiente térmico entre o topo e o fundo do cadinho 210 é igualado. Então, o lingote inteiro 260 é vagarosamente resfriado até à temperatura ambiente. Para a moldagem de silício multicristalino geométrico, como mostrado na Figura 8E, este crescimento unidirecional de semeadura produz grãos em forma de coluna

270 tendo, geralmente, uma seção transversal horizontal que é da forma da semente individual 220 sobre a qual ele é formado. Desta maneira, as bordas do grão no silício multicristalino geométrico moldado pode ser pré-selecionadas. Qualquer dos padrões de semeadura/empilhamento discutidos previamente é aplicável a este processo de moldagem.

Alternativamente, para moldagem de silício monocristalino, o arranjo das sementes 220 pode ser feito para não se ter bordas no grão de qualquer maneira, resultando em silício monocristalino moldado. Com mostrado na Figura 8F, a parte 250 ilustra uma parte fundida da espessura total das sementes 220, abaixo da fusão 240. Após a parte 250 das sementes 220 serem fundidas abaixo da fusão 240, o estágio de fusão é então rapidamente terminado e o estágio de crescimento de cristal é começado, onde o aquecimento do topo do cadinho 210 é diminuído e/ou o resfriamento do fundo da material de sumidouro de calor 230 é aumentado. Então, como mostrado na Figura 8G, o crescimento do cristal semeado continua unidirecional e verticalmente dentro do cadinho 210 até que a cristalização do silício esteja completa. Uma interface sólido-líquido, de preferência, substancialmente lisa 285 se propaga na direção ascendente e para longe da superfície do fundo do cadinho 210. O ciclo de moldagem termina após o crescimento do cristal estar completo, quando o gradiente térmico do topo e do fundo dentro do cadinho 210 é igualado. Então, o lingote inteiro 280 é vagarosamente resfriado à temperatura ambiente. Para moldagem do silício monocristalino, com mostrado na Figura 8C, este crescimento unidirecional por semeadura produz um corpo sólido contínuo de silício monocristalino moldado 290.

Em outro processo, ilustrado na Figura 9, a carga de silício 200 pode ser primeiro fundida em um compartimento separado ou um vaso de fusão separado 300. Sementes 220 podem ou não ser parcialmente fundidas a partir do topo antes da carga fundida 305 ser

alimentada ou derramada no cadinho 210 via um tubo de fusão 310, após o que o resfriamento e crescimento prosseguem como descritos com referência às Figuras 8B-8G. Em outra modalidade, cristais de semente de silício podem ser montados nas paredes do cadinho 210 (não mostrado) e o crescimento por semeadura pode prosseguir a partir dos lados bem como do fundo do cadinho 210, como descrito previamente. Alternativamente, a carga de silício 200 é fundida em um vaso de fusão 300 separado do cadinho 210, e ao mesmo tempo o cadinho 210 é aquecido para a temperatura de fusão do silício e o aquecimento é controlado de forma que as sementes 220 não fundem completamente. Sob fusão parcial das sementes 220, a carga fundida 305 pode ser transferida a partir do vaso de fusão 300 para o cadinho 210, e o resfriamento e cristalização pode começar. Assim, consistente com uma modalidade da invenção, uma parte do corpo sólido do silício cristalizado pode incluir sementes 220. Alternativamente, as sementes podem ser mantidas completamente sólidas antes da introdução da fusão. Neste caso, o silício fundido no vaso de fusão 300 é aquecido além da temperatura de fusão, e o líquido superaquecido é permitido fundir uma parte de algumas sementes quando o líquido superaquecido é introduzido.

Numa estação de moldagem em dois estágios, tal como aquela mostrada na Figura 9, a carga fundida 305 seria vertida no vaso de fusão 300, sobre as sementes 220, e assumir a cristalinidade delas durante a solidificação. Alternativamente, a fusão pode ter lugar em um vaso de fusão central 300, o qual alimenta um arranjo distribuído de cadinhos de solidificação, tais como uma ou mais cópias do cadinho 210 (não mostrado). Consistente com as modalidades da invenção, os cadinhos de solidificação podem ser forrados com sementes 220 em qualquer um ou ambos os lados e fundo dos cadinhos. Algumas vantagens desta abordagem incluem: a separação dos sistemas de fusão e solidificação, para permitir melhor otimização de cada etapa de

moldagem; uma fusão semi-contínua do silício, em que a fusão de novo material pode ocorrer de um modo regular, como necessário para manter o cadinho alimentado; formação de escória do silício de topo (e potencial drenagem do fundo) enquanto as estações de solidificação são alimentadas a partir do meio da fusão, aumentando a pureza do material de silício inicial; e permitir que o vaso de fusão 300 alcance o equilíbrio com a carga fundida 305 e não sendo mais uma fonte significante de impurezas.

Assim, após um lingote 260 ou 280 ter sido moldado por um dos métodos descritos acima, o lingote moldado resultante pode ser processado adicionalmente, por exemplo, por corte do fundo ou outra seção do lingote e usando-o como uma semente de cristal única em uma corrida subseqüente para formar um corpo de silício monocristalino, silício próximo monocristalino ou silício multicristalino geométrico, consistente com a invenção, e aonde o tamanho e a forma dessa semente de cristal única é do mesmo tamanho e forma do fundo do cadinho usado na corrida de moldagem subseqüente e o resto do lingote pode ser cortado em tijolos ou bolachas para processamento em células fotovoltaicas. Alternativamente, o lingote inteiro pode ser cortado, por exemplo, em barras horizontais para uso como cristais de semente em múltiplas estações de moldagem para futuras corridas de moldagem.

A carga de silício usada nos processos consistente com as modalidades da invenção pode conter um ou mais dopantes tais como aqueles selecionados a partir de uma lista incluindo: boro, alumínio, lítio, gálio, fósforo, antimônio, arsênio e bismuto. A quantidade total de tal dopante pode ser de cerca de 0,01 partes por milhão por % atômica (ppma) a cerca de 2 ppma. Preferivelmente, a quantidade de dopante no silício está em uma quantidade tal que uma bolacha feita a partir do silício tem uma resistividade de cerca de 0,1 a cerca de 50 ohm-cm, de preferência de cerca de 0,5 a cerca de 5,0 ohm-cm.

Assim, consistente com a presente invenção, o silício pode ser um corpo de silício monocristalino contínuo moldado, silício próximo monocristalino moldado ou silício multicristalino geométrico moldado, que de preferência é essencialmente isento ou isento de defeitos radialmente distribuídos tais como de OSF e/ou defeitos de rotação, e de preferência, onde pelo menos duas dimensões do corpo são de preferência pelo menos cerca de 10 cm, de preferência cerca de 20 cm, com maior preferência pelo menos 30 cm, ainda com maior preferência pelo menos 40 cm, ainda com maior preferência pelo menos 50 cm, ainda com maior preferência pelo menos 60 cm, e com maior preferência pelo menos 70 cm. Com maior preferência, a terceira dimensão de tal corpo de silício é de pelo menos cerca de 5 cm, de preferência de pelo menos cerca de 15 cm e, com maior preferência, de pelo menos cerca de 20 cm. O corpo de silício pode ser uma peça separada como um corpo único ou ela pode ser contida dentro ou envolvida pela totalidade ou parcialmente, de outro silício. O corpo de silício pode ser formado de preferência tendo pelo menos duas dimensões cada sendo tão grandes quanto as dimensões interiores de um vaso de moldagem. Como aqui revelado, modalidades da invenção podem ser usadas para produzir corpos grandes de silício monocristalino, silício próximo monocristalino ou silício multicristalino geométrico por um simples e custo efetivo processo de moldagem.

Os seguintes são exemplos de resultados experimentais consistentes com as modalidades da invenção. Estes exemplos estão apresentados para meramente exemplificar e ilustrar as modalidades da invenção e não devem ser entendidos como limitantes do escopo da invenção de qualquer modo.

Exemplo 1

Preparação da semente: Um cristal sintético puro de silício (monocristalino) puro Czochralski (CS), obtido da MEMC, Inc. e tendo

0,3 ppma de boro, foi cortado ao longo de seu comprimento usando uma lâmina de banda revestida com diamante de forma que ela tinha uma seção transversal quadrada medindo de 14 cm por lado. O bloco resultante de silício monocristalino foi cortado através de sua seção transversal usando a mesma lâmina em fatias tendo uma espessura de cerca de 2 cm a cerca de 3 cm. Estas fatias foram usadas como cristais de sementes de silício monocristalino, ou "sementes". A orientação do pólo cristalográfico (100) do corpo sintético puro de silício foi mantida. As fatias de silício de cristal único resultante foram então arranjadas no fundo de um cadinho de quartzo de forma que a direção (100) das fatias ficou para cima, e a direção (110) foi mantida paralela a um lado do cadinho. O cadinho de quartzo tinha uma seção transversal quadrada com 698 cm em um lado, uma profundidade de cerca de 40 cm e uma espessura de parede de cerca de 1,8 cm. As fatias foram arranjadas no fundo do cadinho com suas dimensões mais compridas paralelas ao fundo do cadinho e seus lados se tocando para formar uma camada única, completa de tais fatias no fundo do cadinho.

Moldagem: O cadinho foi então preenchido até uma massa total de 265 kg de carga de silício sólido na temperatura ambiente. O cadinho preenchido foi então carregado em uma estação de moldagem de fusão/solidificação direcional *in situ* usada para moldar silício multicristalino. O processo de fusão foi corrido pelo aquecimento de aquecedores resistivos a aproximadamente 1550°C, e os aquecedores foram configurados de forma que o aquecimento veio do topo enquanto o calor era permitido irradiar para fora pelo fundo ao se abrir o isolamento de um total de 6 cm. Esta configuração levou a fusão a acontecer numa direção topo para fundo em direção ao fundo do cadinho. O resfriamento passivo através do fundo levou a que os cristais de semente fossem mantidos no estado sólido na temperatura de fusão, como monitorado por um termopar. A extensão da fusão foi medida por uma haste de imersão de quartzo que foi baixada no meio fundido a

cada dez minutos. A altura da haste de imersão foi comparada com uma medida tomada em um cadinho vazio na estação para determinar a altura do material sólido remanescente. Pela medida da haste de imersão, primeiro a carga fundiu e então a fase fundida foi permitida a continuar até apenas uma altura de cerca de 1,5 cm dos cristais de semente restante. Neste ponto, o aquecimento foi diminuído para uma temperatura ajustada em 1500°C, enquanto a radiação a partir do fundo foi aumentada pela abertura do isolamento para 12 cm. Um ou dois milímetros adicionais de cristais de semente fundiram antes de a solidificação começar, como observado pelas medidas com a haste de imersão. Então o crescimento do cristal único semeado se iniciou até o fim da etapa de solidificação. O estágio de crescimento e o restante do ciclo de moldagem foram efetuados com os parâmetros normais em que foi igualado o gradiente térmico topo-fundo e, então, o lingote inteiro foi vagarosamente resfriado para a temperatura ambiente. O produto silício moldado era um lingote de 66 cm por 66 cm por 24 cm, tendo uma parte central do qual uma seção transversal quadrada horizontal medindo 50 cm por 50 cm era silício monocristalino do topo ao fundo. A estrutura do silício monocristalino era evidente pela inspeção visual da superfície do lingote. Além disso, a gravação do silício com uma fórmula cáustica capaz de delinear as fronteiras dos grãos ainda afirmou a falta de borda nos grãos no material. A dopagem média no total foi 1,2 ohm-cm, e as células fotovoltaicas fabricadas com este silício tinham uma eficiência elétrica de 16,0%.

Em outras corridas de moldagem conduzidas de acordo com este exemplo, foi observado que o produto silício moldado era um cristal de silício consistente contínuo que continha cristais de silício menores de outras orientações de cristal ou era um corpo de silício monocristalino que tinha regiões adjacentes de silício multicristalino.

Exemplo 2

Preparação da semente: A semeadura foi efetuada como no Exemplo 1, exceto que as sementes de silício monocristalino foram cortadas de forma que a direção (110) foi de 45 graus a partir do lado das sementes quadradas para metade das sementes, enquanto a outra metade tinha um ângulo de aproximadamente 20 graus. As peças quadradas foram colocadas em camadas no fundo do cadinho de um modo como num tabuleiro de damas alternando as duas orientações diferentes da semente, isto é, a direção (110) tinha um ângulo de 45 graus e 20 graus a partir da orientação dos lados do cadinho. Com relação um ao outro, as sementes tinham ou 25 graus ou 155 graus de desorientação. Todavia, devido às diferenças de tamanho nas sementes em forma de quadrado, alguns vazios na camada de semeadura foram deixados descobertos. O cadinho media aproximadamente 33 cm em cada um dos lados do quadrado e aproximadamente 22 de altura.

Moldagem: O cadinho contendo as sementes e um cadinho separado contendo um total de 56 kg de carga de escória de silício foram carregados numa estação de moldagem em dois estágios de Processo de Moldagem Ubíquo (UCP). O cadinho receptor (com as sementes dentro) foi aquecido até o ponto de fusão do silício, mas não dada energia para fundir completamente. O silício no outro cadinho foi fundido usando aquecedores de grafite resistivos na temperatura de pelo menos 50°C acima da temperatura de fusão do silício e, então, vertido no cadinho receptor. Neste ponto, a solidificação começou imediatamente, com o calor sendo extraído do fundo do cadinho receptor de forma a efetuar a solidificação direcional e crescimento de cristal semeado. O ciclo de crescimento padrão foi encurtado para levar em conta a massa de material já solidificado constituída pelas sementes. Deste modo, ao invés de permitir um tempo para que todos os 66 kg (10 kg de sementes e 56 kg de carga de silício) solidificassem antes do processo de resfriamento começar, apenas o tempo para que os 56 kg de silício fundido fosse fornecido para evitar perda de energia de

aquecimento. O produto deste processo foi um lingote de silício com grãos geralmente na forma de coluna, grandes tendo uma seção transversal quadrada tendo forma e dimensões que permaneceram próximas da superfície do topo das dimensões do cristal de semente original sobre os quais eles foram formados. As posições de borda de grão lateral mudaram em alguns casos enquanto o crescimento prosseguia.

Exemplo 3

Preparação da semente: A semeadura foi efetuada com 23 kg de placas (100) quadradas usadas para recobrir o fundo de um cadinho, fornecendo uma área de cobertura de 63 cm x 63 cm e uma espessura variando de 3 cm no centro a 1,8 cm nos lados. Todas as placas foram arranjadas com suas direções (110) a 45° a partir das paredes do cadinho.

Moldagem: O cadinho contendo as sementes foi preenchido com um total adicional de 242 kg de carga de escória de silício, representando uma mistura de silício intrínseco, silício reciclado a partir de lingotes prévios e silício duplamente moldado com uma resistividade tipo p maior do que 9 ohm-cm. A carga de silício no cadinho foi carregada em uma fornalha de solidificação direcional de um estágio. O cadinho (com as sementes dentro) foi aquecido até uma temperatura de 1550°C, enquanto o fundo foi resfriado pela abertura do isolamento em 12 cm. A interface sólido-líquido permaneceu substancialmente plana durante a fusão, de forma que ao final da fusão, nenhuma parte da semente foi fundida. A espessura do silício foi monitorada pelo uso de uma haste de imersão de quartzo. Quando uma espessura do centro foi medida em 2,5 cm, o estágio de fusão foi parado, a temperatura de aquecimento foi diminuída para 1.440°C e a altura do isolamento foi diminuída para 15 cm. A partir do começo da mudança da fase de fusão, a taxa de aumentou de temperatura foi mantida em 0,1

°C/minuto ou abaixo, como medida na superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho. Então, o restante do processo de solidificação foi permitido de ocorrer, com a potência do aquecedor grosseiramente constante sendo mantida até o final do crescimento do cristal ser observado. Após o final do crescimento, a temperatura do lingote de silício cristalizado foi igualada e então trazida uniformemente para a temperatura ambiente. Após a remoção do lingote do cadinho, o fundo do lingote foi cortado em uma peça grande pra re-uso posterior como uma semente em outro processo de moldagem subseqüente, e o restante do lingote foi cortado em tijolos quadrados de 12,5 cm para posterior processamento. O processo foi um sucesso ao conseguir crescimento monocristalino substancialmente sobre a inteira seção transversal da camada de semente, e ocorrendo através do topo do lingote. A monocristalinidade foi evidente a partir da inspeção do silício cortado.

Em outras corridas de moldagem conduzidas de acordo com este exemplo, foi observado que o produto silício moldado foi um cristal de silício consistente contíguo que continha cristais de silício menores de outras orientações de cristal ou era um corpo de silício monocristalino que tinha regiões adjacente de silício multicristalino.

As bolachas feitas a partir de silício consistente com as modalidades da invenção são apropriadamente finas e podem ser usadas em células fotovoltaicas. Além disso, as bolachas podem ser do tipo n ou do tipo p. Por exemplo, bolachas podem ter uma espessura de cerca de 10 micra a cerca de 700 micra de espessura. Ainda, as bolachas usadas em células fotovoltaicas de preferência têm um comprimento de difusão (L_p) que é maior do que a espessura (t) da bolacha. Por exemplo, a razão de L_p para t é apropriadamente pelo menos 0,5. Pode ser, por exemplo, pelo menos cerca de 1,1 ou pelo menos cerca de 2. O comprimento de difusão é a distância média que condutores minoritários (tais como elétrons no material tipo p) podem se difundir antes da recombi-

nação com os condutores majoritários (buracos no material do tipo p). O L_p é relacionado ao tempo de vida τ do condutor minoritário através da relação $L_p = (D\tau)^{1/2}$, onde D é a constante de difusão. O comprimento de difusão pode ser medido por um número de técnicas, tais como a técnica da Corrente Fóton-Feixe-Induzida ou a técnica da Fotovoltagem de Superfície. Veja, por exemplo, "*Fundamentals of Solar Cells*", de A. Fahrenbruch e R. Rube, Academic Press, 1983, pág. 90-102, para uma descrição de como o comprimento de difusão pode ser medido.

As bolachas podem ter uma largura de cerca de 100 milímetros a cerca de 600 milímetros. Preferivelmente, as bolachas têm pelo menos uma dimensão sendo pelo menos cerca de 50 mm. As bolachas feitas de silício da invenção e, conseqüentemente, as células fotovoltaicas feitas pela invenção podem, por exemplo, ter uma área superficial de cerca de 50 a cerca de 3600 centímetros quadrados. A superfície frontal da bolacha é, de preferência, texturizada. Por exemplo, a bolacha pode ser apropriadamente texturizada usando gravação química, gravação por plasma ou traçador a laser ou mecânico. Se uma bolacha tendo uma orientação de pólo (100) é usada, a bolacha pode ser gravada para formar uma superfície texturizada anisotrópica pelo tratamento da bolacha em uma solução aquosa de uma base, tal como hidróxido de sódio, a elevada temperatura, por exemplo, de cerca de 70°C a cerca de 90°C, por cerca de 10 a cerca de 120 minutos. A solução aquosa pode conter um álcool, tal como isopropanol.

Assim, células solares podem ser fabricadas usando as bolachas produzidas a partir de lingotes de silício moldados de acordo com as modalidades da invenção, pelo fatiamento do corpo sólido de silício moldado para formar pelo menos uma bolacha; opcionalmente efetuando um procedimento de limpeza na superfície da bolacha; opcionalmente efetuando uma etapa de texturização na superfície; formação de uma junção p-n, por exemplo, ao dopar a superfície; opcionalmente depositando um revestimento anti-reflexivo na superfí-

cie; opcionalmente formandpelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação por, por exemplo, uma etapa de sinterização de alumínio; e formação de contatos condutores elétricos na bolacha. Uma camada de passivação é uma camada que tem uma interface com uma superfície da bolacha descoberta que une as ligações oscilantes da superfície dos átomos. Exemplos de camadas de passivação no silício incluem nitreto de silício, dióxido de silício e silício amorfo. Esta camada é geralmente mais fina do que um mícron, seja transparente à luz ou atuando como uma camada anti-reflexiva.

Num processo típico e geral para preparar célula fotovoltaica usando, por exemplo, uma bolacha de silício tipo p, a bolacha é exposta em um lado a um n-dopante apropriado para formar uma camada emissora e uma junção p-n na frente, ou lado receptor de luz na bolacha. Tipicamente, a camada do tipo n ou camada emissora é formada ao primeiro se depositar o n-dopante na superfície da frente da bolacha do tipo p usando técnicas comumente empregadas na técnica, tais como deposição química ou física e, após essa deposição, o n-dopante, por exemplo, fósforo, é direcionado para a superfície da frente da bolacha de silício para ainda difundir o n-dopante na superfície da bolacha. Esta etapa de "direção" é comumente efetuada pela exposição da bolacha a altas temperaturas. Uma junção p-n é, desta forma, formada na região de fronteira entre a camada do tipo n e o substrato da bolacha de silício tipo p. A superfície da bolacha, antes da dopagem por fósforo ou outro dopante para formar a camada emitente, pode ser texturizada. De forma a ainda aumentar a absorção de luz, um revestimento anti-reflexivo opcional, tal como nitreto de silício, pode ser tipicamente aplicado na frente da bolacha, algumas vezes fornecendo passivação simultânea para a superfície e ou de volume.

De forma a utilizar o potencial elétrico gerado pela exposição da junção p-n à energia luminosa, a célula fotovoltaica é tipicamen-

te provida com um contato elétrico de frente condutivo na face da frente da bolacha e um contato elétrico de trás condutivo na face de trás da bolacha, embora ambos os contatos possam estar na parte de trás da bolacha. Esses contatos são tipicamente feitos de um ou mais metais condutores altamente elétricos e são, desta forma, tipicamente opacos.

Assim, as células solares consistentes com as modalidades descritas acima podem compreender uma bolacha formada de um corpo de silício monocristalino contínuo ou silício próximo monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de defeitos distribuídos radialmente, o corpo podendo ser como descrito acima neste documento e, por exemplo, tendo pelo menos duas dimensões cada um sendo pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão sendo pelo menos cerca de 20 cm, uma junção p-n na bolacha, um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; de preferência tendo pelo menos uma camada selecionada de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e contatos condutores elétricos na bolacha, onde o corpo pode ser isento ou substancialmente isento de defeitos de rotação e isento ou substancialmente isento de defeitos de OSF.

Também células solares consistentes com as modalidades descritas acima podem compreender uma bolacha formada a partir de um corpo de silício multicristalino geométrico contínuo, tendo o corpo um arranjo pré-determinado de orientações de grãos, de preferência com uma direção de pólo comum sendo perpendicular à superfície do corpo, o corpo de preferência ainda tendo pelo menos duas dimensões cada um preferencialmente sendo pelo menos cerca de 10 cm, uma junção p-n na bolacha, um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha; de preferência tendo pelo menos uma camada selecionada de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e contatos condutores elétricos na bolacha, onde o silício multicristalino geométrico inclui grãos de silício tendo um tamanho de seção transversal de grão de cristal médio de cerca de 0,5 cm a cerca de

30 cm e em que o corpo pode ser isento ou substancialmente isento de defeitos de rotação e isento ou substancialmente isento de defeitos de OSF.

Ficará evidente para aqueles versados na técnica que várias modificações e variações podem ser feitas nas estruturas e métodos revelados sem se afastar do escopo ou espírito da invenção. Por exemplo, os processos e métodos revelados que referem-se à formação de silício monocristalino são também aplicáveis para a formação de silício próximo monocristalino ou combinações dos mesmos. Além do mais, embora a moldagem de silício tenha sido descrita aqui neste documento, outros materiais semicondutores e materiais cristalinos não metálicos podem ser moldados sem sair do escopo e espírito da invenção. Por exemplo, o inventor considerou a moldagem de outros materiais consistentes com as modalidades da invenção, tais como arsenieto de gálio, germânio silício, óxido de alumínio, nitreto de gálio, óxido de zinco, sulfeto de zinco, arsenieto índio gálio, antimoneto de índio, germânio, óxidos de bário ítrio, óxidos de lantanídeos, óxido de magnésio e outros semicondutores, óxidos e intermetálicos com uma fase líquida. Outras modalidades da invenção serão evidentes para aqueles versados na técnica a partir da consideração da especificação e prática da invenção revelada aqui neste documento. Pretende-se que o Relatório Descritivo e os Exemplos sejam considerados apenas exemplificativos, com um escopo e um espírito da invenção verdadeiros sendo indicados pelas Reivindicações seguintes.

"Métodos de Fabricação de Silício Moldado e de Célula Solar, Células Solares, Corpos de Silício Monocristalinos Contínuos, Bolachas e Silício"

Reivindicações

1 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que compreendendo:

colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo um ou mais lados aquecidos até pelo menos a temperatura de fusão do silício e pelo menos uma parede para resfriamento; e

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada sendo pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização, onde a formação inclui a formação de uma interface sólido-líquido em uma borda do silício fundido que pelo menos inicialmente é paralela a pelo menos uma parede para resfriamento, a interface sendo controlada durante o resfriamento de forma a se mover na direção que aumenta a distância entre o silício fundido e pelo menos uma parede para resfriamento.

2 - Método de Fabricação de Célula Solar, caracterizado por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 1;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na su-

perfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

3 – Método, de acordo com as Reivindicações 1 ou 2, **caracterizado** por que

colocar inclui ainda colocar pelo menos um cristal de semente de silício no fundo de um cadinho e

ainda em que o resfriamento move a interface sólido-líquido numa direção para longe do fundo do cadinho, ao mesmo tempo em que mantém a borda que é paralela a pelo menos uma parede para resfriamento.

4 – Método, de acordo com a Reivindicação 3, **caracterizado** por que o arranjo compreende ainda pelo menos um cristal de semente de forma que uma direção de pólo específica seja perpendicular a um fundo de um cadinho.

5 – Método, de acordo com a Reivindicação 3, **caracterizado** por que colocar o silício fundido inclui ainda fundir a carga de silício num recipiente de fusão separado do cadinho, aquecer o cadinho e o silício à

temperatura de fusão do silício, controlar o aquecimento de forma que pelo menos um cristal de semente no cadinho não funda completamente e transferir o silício fundido do recipiente de fusão para o cadinho.

6 – Método, de acordo com a Reivindicação 3, **caracterizado** por que inclui ainda formar uma parte do corpo para incluir pelo menos um cristal de semente.

7 - Método de Fabricação de Silício Moldado, **caracterizado** por que compreende:

colocar um arranjo geométrico de uma pluralidade de cristais de sementes de silício compreendendo silício monocristalino em pelo menos uma superfície de um cadinho tendo uma ou mais paredes laterais aquecidas para pelo menos a temperatura de fusão do silício e pelo menos uma parede para resfriamento, em que o arranjo geométrico inclui polígonos densamente empacotados;

colocar silício fundido em contato com o arranjo geométrico dos cristais de semente de silício; e

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada sendo pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização, em que a formação inclui a formação de uma interface sólido-líquido em uma borda do silício fundido que é paralela a pelo menos uma parede para resfriamento, sendo a interface controlada durante o resfriamento de forma a se mover na direção que aumenta a distância entre o silício fundido e a pelo menos uma parede para resfriamento.

8 - Método de Fabricação de Célula Solar, **caracterizado** por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 7;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

9 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que compreendendo:

arranjar uma pluralidade de cristais de semente de silício compreendendo silício monocristalino num padrão pré-determinado em pelo menos duas superfícies de um cadinho;

colocar silício fundido em contato com os cristais de semente de silício monocristalino; e

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada sendo pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido a partir de pelo menos duas superfícies do cadinho para controlar a cristalização,

em que a formação inclui a o controle de uma interface sólido-líquido em uma borda do silício fundido durante o resfriamento de forma a se mover na direção que aumenta a distância entre o silício fundido e a pelo menos duas superfícies do cadinho.

10 - Método de Fabricação de Célula Solar, caracterizado por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 9;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

11 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que compreende:

colocar uma carga de silício em contato com pelo menos um cristal de semente de silício compreendendo silício monocristalino em pelo menos uma superfície;

aquecer a carga de silício e pelo menos um cristal de semente de silício para a temperatura de fusão do silício;

controlar o aquecimento de forma que pelo menos um cristal de semente de silício não funda completamente, compreendendo o controle manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido numa superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho; e, uma vez que pelo menos um cristal de semente de silício seja parcialmente fundido,

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino pelo resfriamento do silício.

12 - Método de Fabricação de Célula Solar, caracterizado por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 11;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

13 - Método de Fabricação de Silício Moldado, de acordo com as Reivindicações 9 ou 11, **caracterizado** por que colocar ainda inclui colocar pelo menos um cristal de semente de no fundo de um cadinho.

14 - Método de Fabricação de Silício Moldado, de acordo com as Reivindicações 9 ou 11, **caracterizado** por que inclui ainda formar uma parte do corpo para incluir pelo menos um cristal de semente.

15 - Método de Fabricação de Silício Moldado, **caracterizado** por que, compreendendo:

colocar um arranjo geométrico de uma pluralidade de cristais de sementes de silício compreendendo silício monocristalino em pelo menos uma superfície de um cadinho, em que o arranjo geométrico inclui polígonos densamente empacotados;

colocar a carga de silício em contato com a pluralidade de cristais de semente de silício em pelo menos uma superfície;

aquecer a carga de silício e a pluralidade de cristais de semente de silício para a temperatura de fusão do silício;

controlar o aquecimento de forma que a pluralidade de cristais de semente de silício não funde completamente, compreendendo o controle manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido em uma superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho; e, uma vez que pelo menos um cristal de semente de silício seja parcialmente fundido,

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino pelo resfriamento do silício.

16 - Método de Fabricação de Célula Solar, **caracterizado** por que

compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 15;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

17 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que, compreende:

arranjar uma pluralidade de cristais de semente de silício compreendendo silício monocristalino num padrão pré-determinado em pelo menos duas superfícies de um cadinho;

colocar a carga de silício em contato com a pluralidade de cristais de semente de silício em pelo menos duas superfícies;

aquecer a carga de silício e a pluralidade de cristais de semente de silício para a temperatura de fusão do silício;

controlar o aquecimento de forma que a pluralidade de cristais de semente de silício não funde completamente, compreendendo o controle manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido em uma superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho; e, uma vez que pelo menos um cristal de semente de silício seja parcialmente fundido,

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino pelo resfriamento do silício.

18 - Método de Fabricação de Célula Solar, caracterizado por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 17;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

19 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que

compreende:

colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo uma ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício, pelo menos um cristal de semente de silício arranjado para cobrir uma área inteira ou substancialmente inteira da superfície do vaso; e

formar um corpo sólido compreendendo silício monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada sendo pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização.

20 - Método de Fabricação de Célula Solar, **caracterizado** por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 19;

formar pelo menos uma bolacha a partir do corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

opcionalmente depositar um revestimento anti-reflexivo na superfície;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada de passivação; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

21 - Célula Solar, caracterizada por que é fabricada de acordo com o método das Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19.

22 - Método, de acordo com as Reivindicações 1, 3, 7-12 ou 15-19, **caracterizado** por que o resfriamento inclui o uso de um material de sumidouro de calor para irradiar calor para as paredes resfriadas a água.

23 - Método, de acordo com as Reivindicações 1, 3, 7-12 ou 15-19, **caracterizado** por que ainda compreende formar o corpo sendo substancialmente isento de defeitos de rotação e substancialmente isento de defeitos de falhas de empilhamento induzidas pelo oxigênio.

24 - Método de Fabricação de Silício Moldado de acordo com as Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19, **caracterizado** por que ainda compreende formar uma bolacha tendo pelo menos uma dimensão sendo pelo menos cerca de 50 mm.

25 - Método de Fabricação de Célula Solar, de acordo com as Reivindicações 2, 8, 10, 12, 16, 18 ou 20, **caracterizado** por que ainda compreende formar uma bolacha tendo pelo menos uma dimensão sendo pelo menos de cerca de 50 mm.

26 - Método de Fabricação de Silício Moldado, de acordo com a Reivindicação 24, **caracterizado** por que compreende ainda formar a bolacha sendo substancialmente isenta de defeitos de rotação e substancialmente isenta de defeitos de falhas de empilhamento induzidas pelo oxigênio.

27 - Método de Fabricação de Célula Solar, de acordo com a Reivindicação 25, **caracterizado** por que compreende ainda formar a bolacha sendo substancialmente isenta de defeitos de rotação e substancialmen-

te isenta de defeitos de falhas de empilhamento induzidas pelo oxigênio.

28 - Método, de acordo com as Reivindicações 7-12 ou 15-18, **caracterizado** por que inclui ainda formar uma parte do corpo para incluir uma pluralidade de cristais de semente.

29 - Método, de acordo com as Reivindicações 7-10 e 15-18, **caracterizado** por que colocar o silício fundido inclui ainda fundir a carga de silício num recipiente de fusão separado do cadinho, aquecer o cadinho e o silício à temperatura de fusão do silício, controlar o aquecimento de forma que a pluralidade de cristais de semente no cadinho não funda completamente e transferir o silício fundido do recipiente de fusão para o cadinho.

30 - Método, de acordo com as Reivindicações 1, 2, 11, 12, 19 e 20, **caracterizado** por que colocar o silício fundido ainda inclui fundir a carga de silício num recipiente de fusão separado do cadinho, aquecer o cadinho e o silício para a temperatura de fusão do silício, controlar o aquecimento de forma que pelo menos um cristal de semente no cadinho não funda completamente e transferir o silício fundido do recipiente de fusão para o cadinho.

31 - Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 7, 8, 15 ou 16, **caracterizado** por que compreende ainda arranjar a pluralidade de cristais de semente de forma que uma direção de pólo comum entre os cristais de semente seja perpendicular ao fundo do cadinho.

32 - Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 1, 3, 7-12 ou 15-20, **caracterizado** por que compreende ainda formar outro corpo sólido de silício usando um cristal de semente cortado a partir de um corpo de silício previamente moldado de acordo com o dito método.

33 – Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 7-10, **caracterizado** por que colocar silício fundido inclui ainda aquecer o

cadinho e o silício para a temperatura de fusão do silício e controlar o aquecimento para manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido em uma superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho.

34 – Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 1, 2, 19 e 20, **caracterizado** por que colocar silício fundido inclui ainda aquecer o cadinho e o silício para a temperatura de fusão do silício e controlar o aquecimento para manter um ΔT de cerca de 0,1 °C/minuto ou menos, como medido em uma superfície externa do cadinho, após alcançar a temperatura de fusão do silício em qualquer lugar do cadinho.

35 – Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 9, 11 ou 18, **caracterizado** por que compreende ainda arranjar a pluralidade de cristais de semente de forma que uma direção de pólo comum entre os cristais de semente seja perpendicular a uma de pelo menos duas superfícies do cadinho de forma que nenhuma borda de grão seja formada entre o pelo menos duas superfícies do cadinho.

36 – Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 9, 11 ou 18, **caracterizado** por que compreende ainda arranjar a pluralidade de cristais de semente de forma que um máximo de seis bordas de cristal de semente se encontrem em qualquer canto do padrão pré-determinado.

37 – Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 9, 11, 17 ou 18, **caracterizado** por que compreende ainda arranjar o padrão pré-determinado em uma orientação hexagonal ou octogonal ao longo de pelo menos uma superfície do cadinho.

38 – Método, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 9, 11, 17 ou 18, **caracterizado** por que pelo menos duas superfícies do cadinho são perpendiculares.

39 – Método de Fabricação de Silício Moldado, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19, **caracterizado** por que compreende ainda monitorar um progresso de fusão pelo uso de uma haste de imersão.

40 – Método de Fabricação de Silício Moldado, de acordo com qualquer uma das Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19, **caracterizado** por que formar compreende formar um corpo sólido de silício monocristalino ou próximo monocristalino.

41 - Método de Fabricação de Silício Moldado, de acordo com a Reivindicação 1, **caracterizado** por que colocar inclui arranjar pelo menos um cristal de semente de silício para cobrir uma área inteira ou substancialmente inteira de uma superfície do vaso.

42 - Corpo de Silício Monocristalino Contínuo, **caracterizado** por que é isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos e tem pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

43 - Corpo de Silício Monocristalino Contínuo, **caracterizado** por que tem uma concentração de carbono de cerca de $2x10^6$ átomos/cm^3 a cerca de $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio não excedendo $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de nitrogênio de pelo menos $1x10^{15}$ átomos/cm^3 e tem pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

44 - Corpo de Silício Monocristalino Contínuo, de acordo com a Reivindicação 42, **caracterizado** por que o corpo é substancialmente isento de defeitos de rotação e substancialmente isento de defeitos de falhas de empilhamento induzidas pelo oxigênio.

45 - Corpo de Silício Monocristalino Contínuo, caracterizado por que tendo pelo menos duas dimensões que são cada de pelo menos cerca de 35 cm.

46 - Corpo de Silício Monocristalino Contínuo, de acordo com a Reivindicação 45, **caracterizado** por que o corpo é isento ou substancialmente isento de defeitos radialmente distribuídos.

47 - Célula Solar, caracterizado por que compreende o corpo de silício de acordo com as Reivindicações 42 ou 45.

48 - Célula Solar, caracterizada por que compreende:

uma bolacha formada a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm;

uma junção p-n na bolacha;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

contatos condutores elétricos na bolacha.

49 - Célula Solar, de acordo com a Reivindicação 48, **caracterizada** por que o corpo é isento ou substancialmente isento de defeitos de rotação e substancialmente isento de defeitos de falhas de empilhamento induzidas pelo oxigênio.

50 - Célula Solar, caracterizada por que compreende:

uma bolacha formada a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm;

uma junção p-n na bolacha;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

contatos condutores elétricos na bolacha.

51 - Célula Solar, de acordo com a Reivindicação 50, **caracterizada** por que o corpo é isento ou substancialmente isento de defeitos radialmente distribuídos.

52 - Célula Solar, caracterizada por que compreende:

uma bolacha de silício monocristalino contínua formada a partir de um corpo de silício monocristalino moldado contínuo, a bolacha tendo pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 50 mm e tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm;

uma junção p-n na bolacha;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

contatos condutores elétricos na bolacha.

53 - Célula Solar, de acordo com a Reivindicação 52, **caracterizada** por que a bolacha é isenta ou substancialmente isenta de defeitos radialmente distribuídos.

54 - Bolacha, caracterizada por que compreende: silício formado a partir de um corpo de silício monocristalino contínuo sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

55 - Bolacha, caracterizada por que compreende: silício formado a partir de um corpo de silício monocristalino moldado contínuo, tendo a bolacha pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 50 mm e tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

56 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que compreende:

colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício em um vaso tendo um ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício e pelo menos uma parede de resfriamento; e

formação de um corpo sólido de silício próximo monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização, em que a formação inclui a formação de uma interface sólido-líquido numa borda do silício fundido que pelo menos inicialmente é paralela pelo menos uma parede de resfriamento, sendo a interface controlada durante o resfriamento de forma a se mover numa direção que aumente a distância entre o silício fundido e pelo menos uma

parede de resfriamento.

57 - Método de Fabricação de Célula Solar, caracterizado por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 56;

formar uma bolacha a partir de um corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

58 - Método de Fabricação de Silício Moldado, caracterizado por que compreende:

colocar silício fundido em contato com pelo menos um cristal de semente de silício num vaso tendo uma ou mais paredes laterais aquecidas a pelo menos a temperatura de fusão do silício, pelo menos um cristal de semente de silício arranjado para cobrir uma área inteira ou substancialmente inteira da superfície do vaso; e

formar um corpo sólido compreendendo silício próximo monocristalino, opcionalmente tendo pelo menos duas dimensões cada sendo pelo menos cerca de 10 cm, pelo resfriamento do silício fundido para controlar a cristalização.

59 - Método de Fabricação de Célula Solar, caracterizado por que compreende:

proporcionar um corpo de silício moldado de acordo com a Reivindicação 58;

formar uma bolacha a partir de um corpo;

opcionalmente efetuar um procedimento de limpeza na superfície da bolacha;

opcionalmente efetuar uma etapa de texturização na superfície;

formar uma junção p-n;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente formar pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

formar contatos condutores elétricos na bolacha.

60 - Corpo de Silício, caracterizado por que é próximo de monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos e tem pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

61 - Corpo de Silício, caracterizado por que é próximo de monocristalino contínuo tendo uma concentração de carbono de cerca de $2x10^6$ átomos/cm^3 a cerca de $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de oxigênio não excedendo $5x10^{17}$ átomos/cm^3, uma concentração de nitrogênio de pelo menos $1x10^{15}$ átomos/cm^3 e tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

62 - Corpo de Silício, de acordo com a Reivindicação 60, **caracterizado** por que o corpo é isento ou substancialmente isento de defeitos de rotação e substancialmente isento de defeitos de falhas de empilhamento induzidas pelo oxigênio.

63 - Corpo de Silício, caracterizado por que é próximo de monocristalino tendo pelo menos duas dimensões que são cada uma de pelo menos cerca de 35 cm.

64 - Célula Solar, caracterizado por que compreende:

uma bolacha formada a partir de um corpo de silício próximo monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm;

uma junção p-n na bolacha;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

contatos condutores elétricos na bolacha.

65 - Célula Solar, caracterizado por que compreende:

uma bolacha formada a partir de um corpo de silício próximo monocristalino, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 35 cm;

uma junção p-n na bolacha;

um revestimento anti-reflexivo opcional na superfície da bolacha;

opcionalmente pelo menos uma camada selecionada a partir de um campo de superfície de trás e uma camada passivadora; e

contatos condutores elétricos na bolacha.

66 - Bolacha, caracterizada por que compreende:

silício formado a partir de um corpo de silício próximo monocristalino sendo isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos radialmente distribuídos, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

67 - Bolacha, caracterizada por que compreende:

silício formado a partir de um corpo de silício próximo monocristalino moldado, a bolacha tendo pelo menos uma dimensão que é pelo menos cerca de 50 mm, tendo o corpo pelo menos duas dimensões que são cada uma pelo menos cerca de 25 cm e uma terceira dimensão de pelo menos cerca de 20 cm.

68 - Silício, caracterizado por que é feito de acordo com o método de qualquer uma das Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19.

69 - Bolacha, caracterizada por que é feita de acordo com o método de

qualquer uma das Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19.

70 - Uma ou Mais Células Solares, caracterizada(s) por que compreende(m) silício feito de acordo com o método de qualquer uma das Reivindicações 1, 7, 9, 11, 15, 17 ou 19.

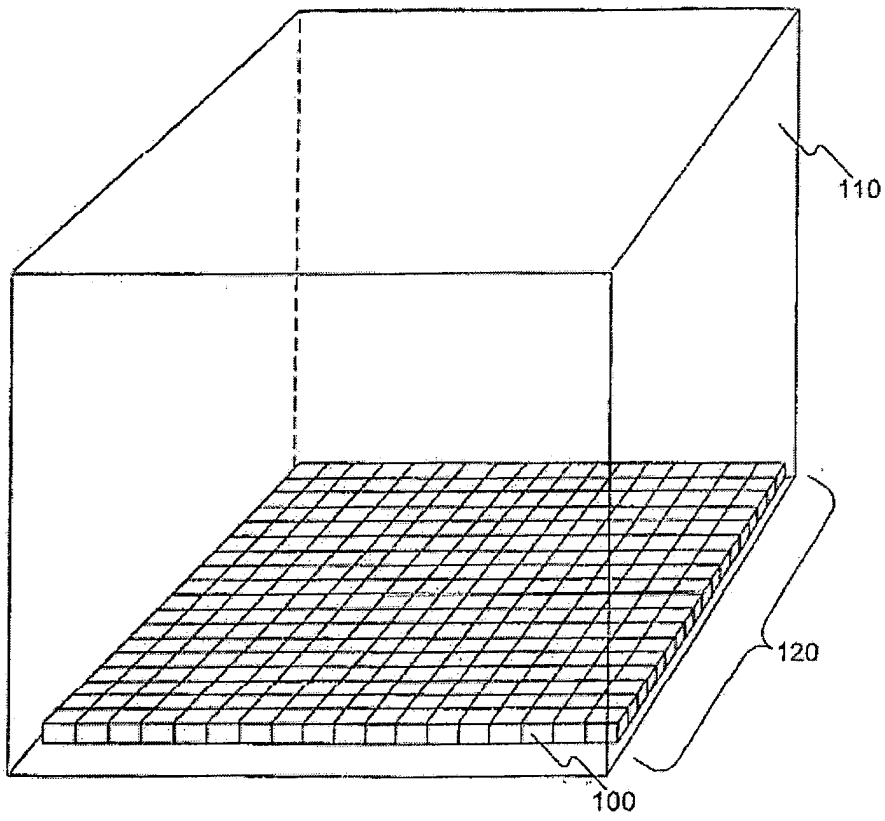


Figura 1

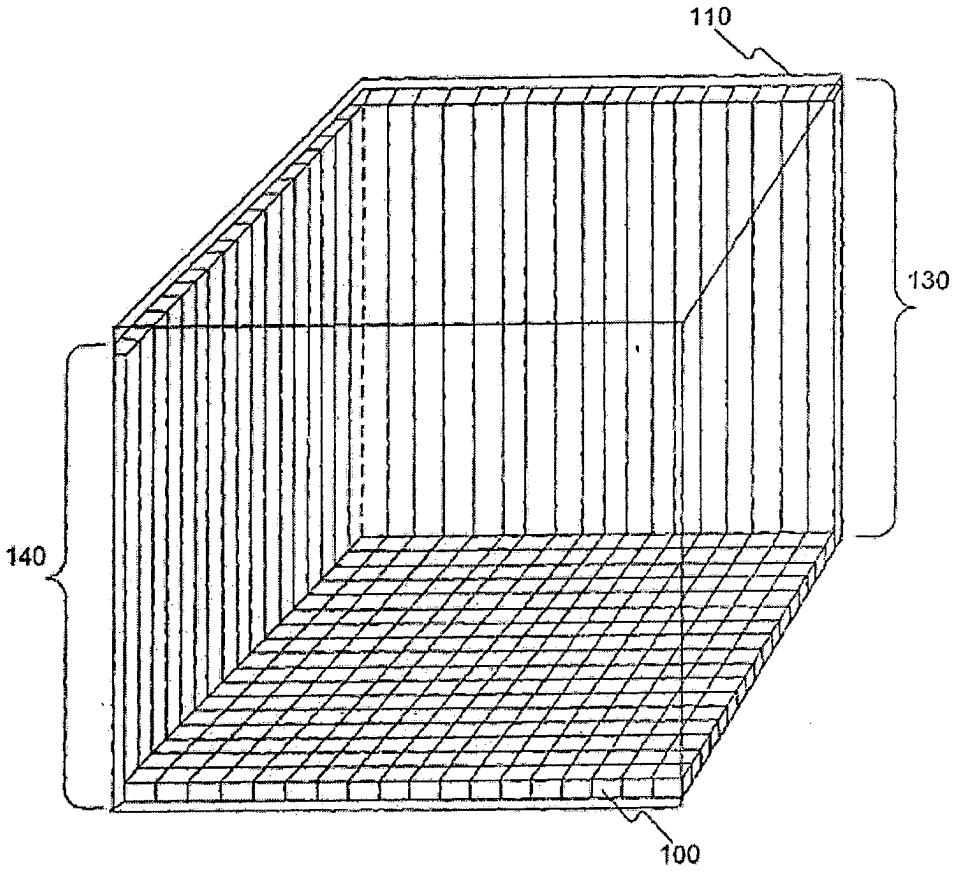


Figura 2

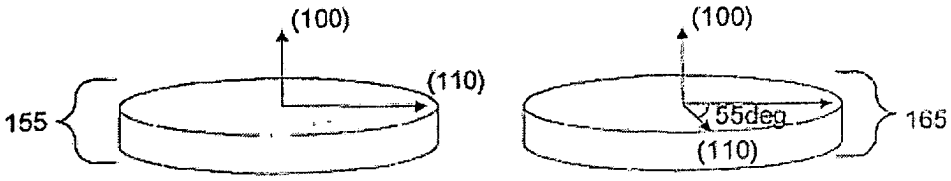


Figura 3A

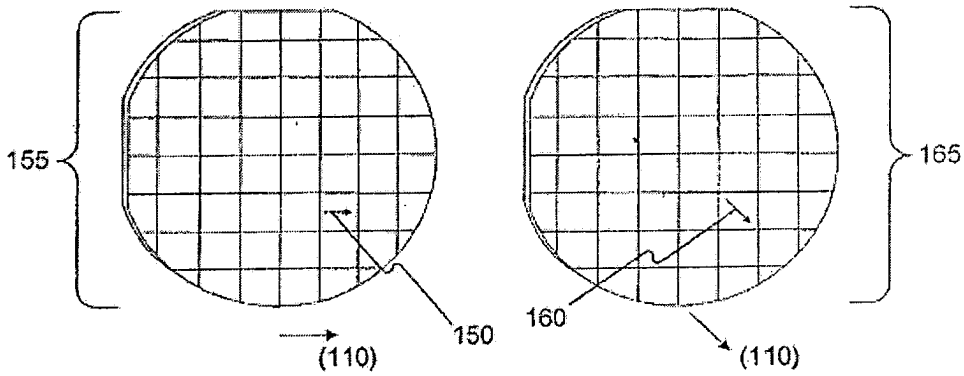


Figura 3B

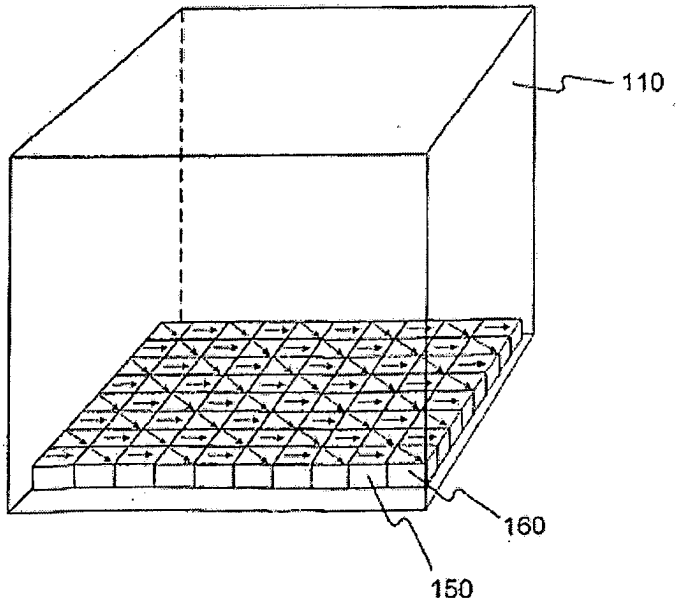


Figura 3C

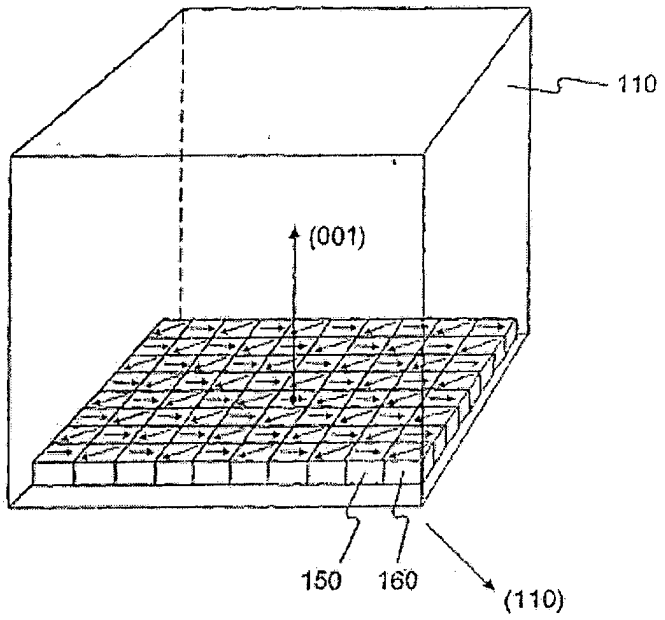


Figura 4

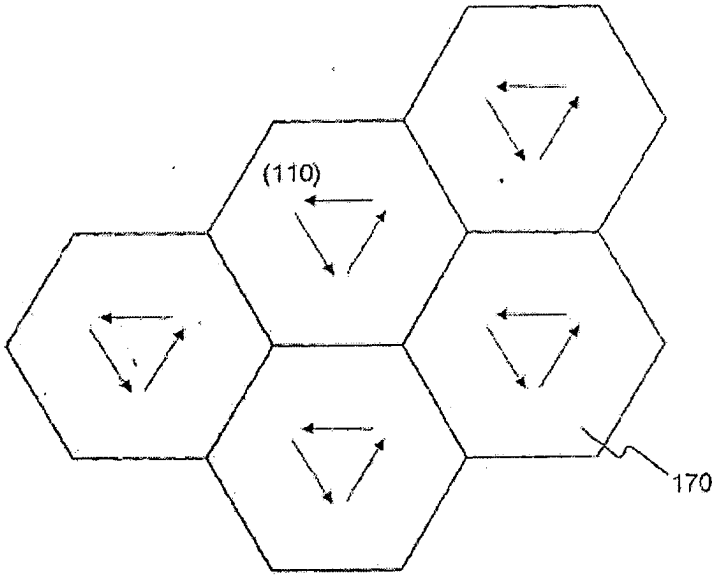


Figura 5

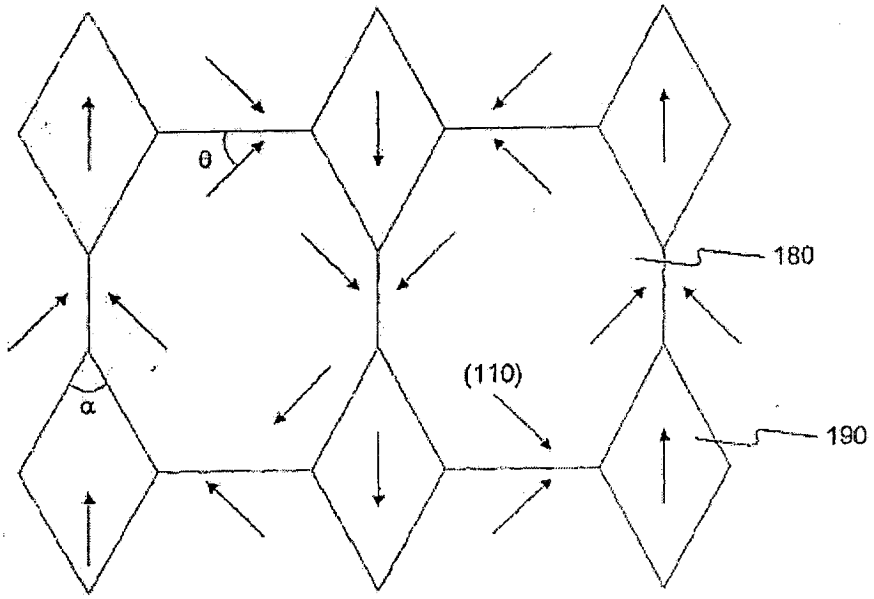


Figura 6

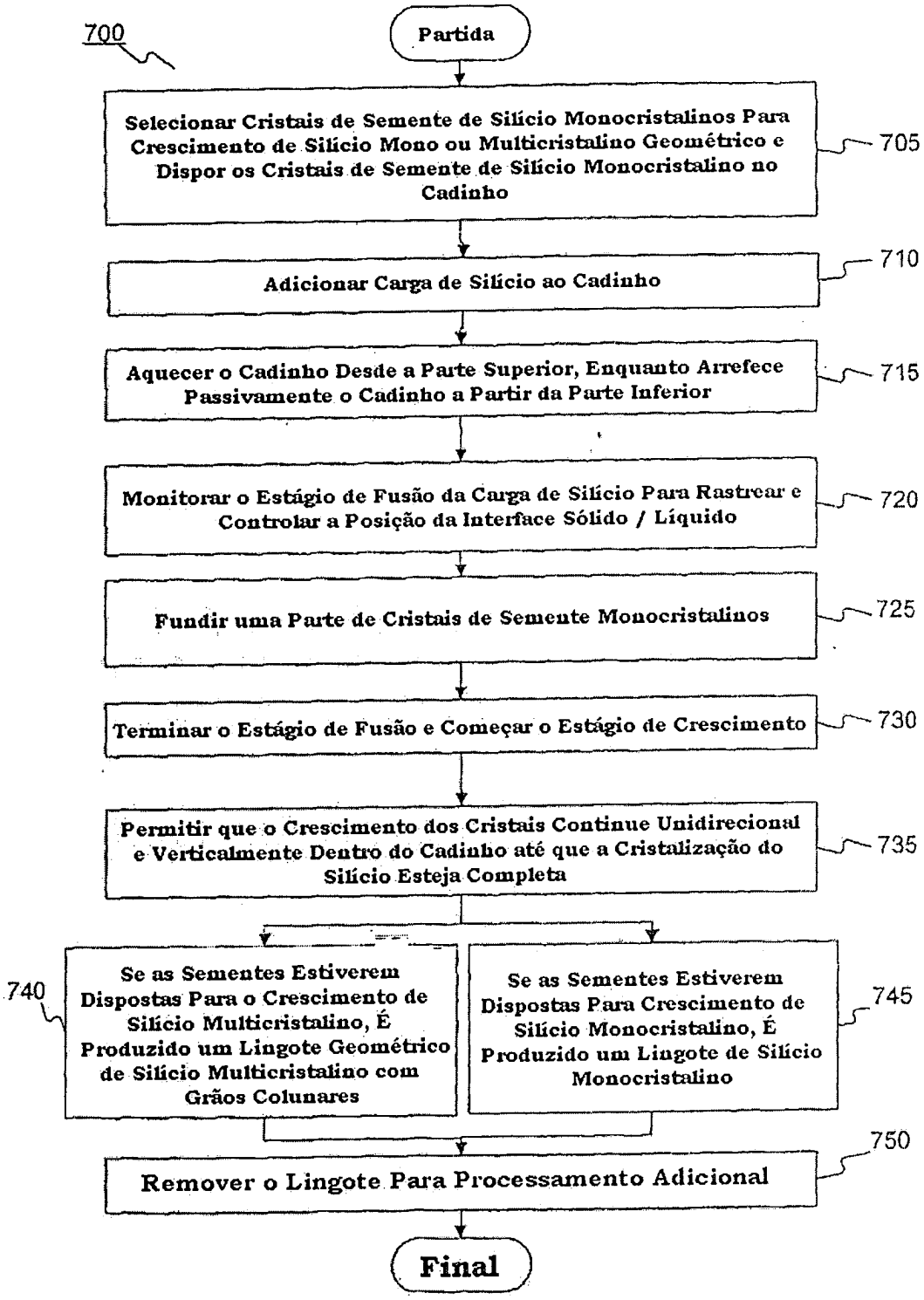

700
Partida
Selecionar Cristais de Semente de Silício Monocristalinos Para Crescimento de Silício Mono ou Multicristalino Geométrico e Dispor os Cristais de Semente de Silício Monocristalino no Cadinho
705
Adicionar Carga de Silício ao Cadinho
710
Aquecer o Cadinho Desde a Parte Superior, Enquanto Arrefece Passivamente o Cadinho a Partir da Parte Inferior
715
Monitorar o Estágio de Fusão da Carga de Silício Para Rastrear e Controlar a Posição da Interface Sólido / Líquido
720
Fundir uma Parte de Cristais de Semente Monocristalinos
725
Terminar o Estágio de Fusão e Começar o Estágio de Crescimento
730
Permitir que o Crescimento dos Cristais Continue Unidirecional e Verticalmente Dentro do Cadinho até que a Cristalização do Silício Esteja Completa
735
740
Se as Sementes Estiverem Dispostas Para o Crescimento de Silício Multicristalino, É Produzido um Lingote Geométrico de Silício Multicristalino com Grãos Colunares
Se as Sementes Estiverem Dispostas Para Crescimento de Silício Monocristalino, É Produzido um Lingote de Silício Monocristalino
745
750
Remover o Lingote Para Processamento Adicional
Final

Figura 7

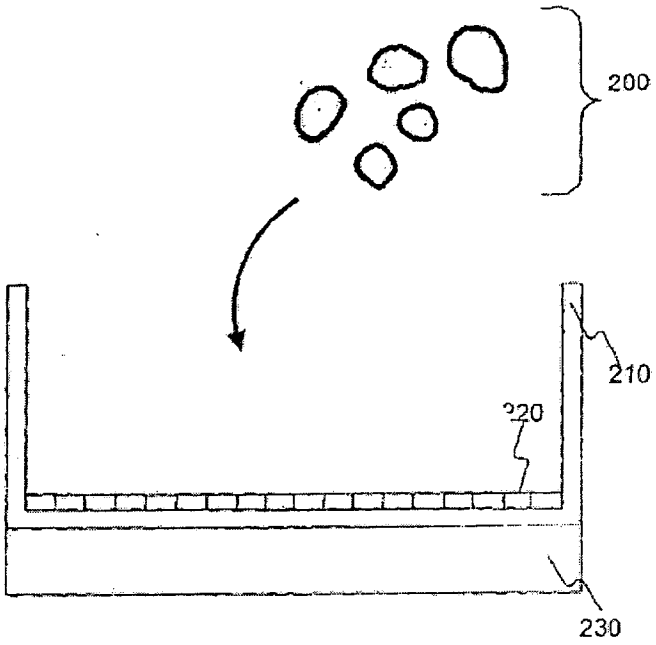


Figura 8A

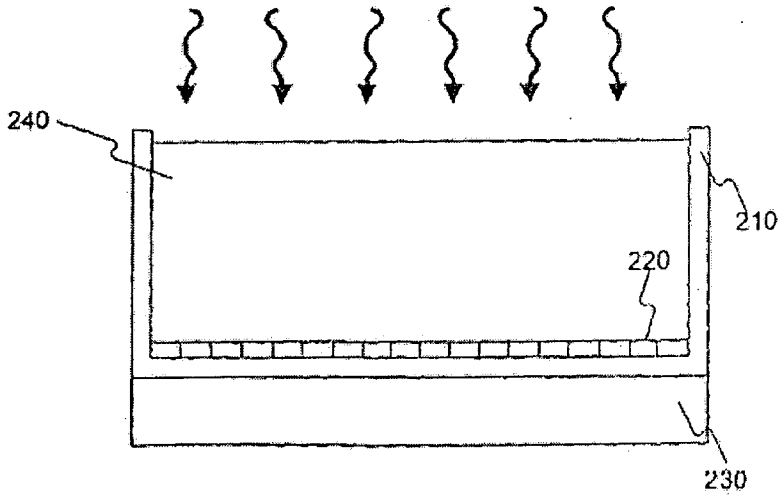


Figura 8B

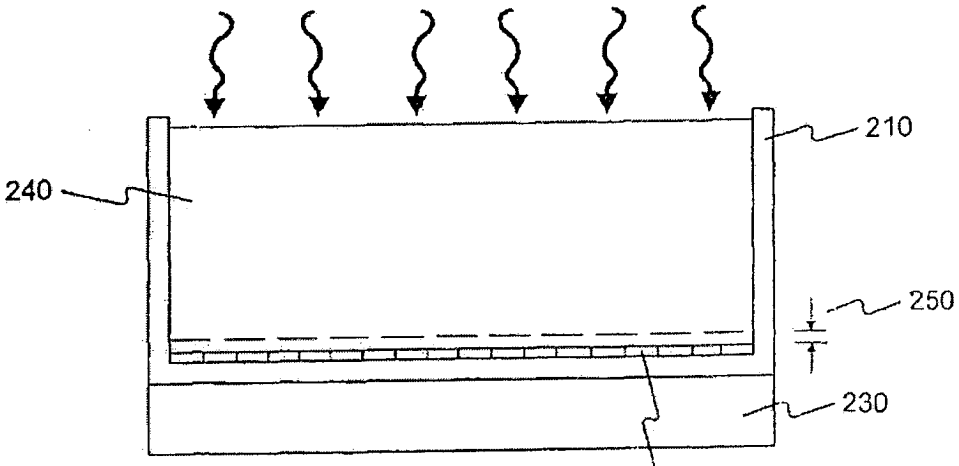


Figura 8C

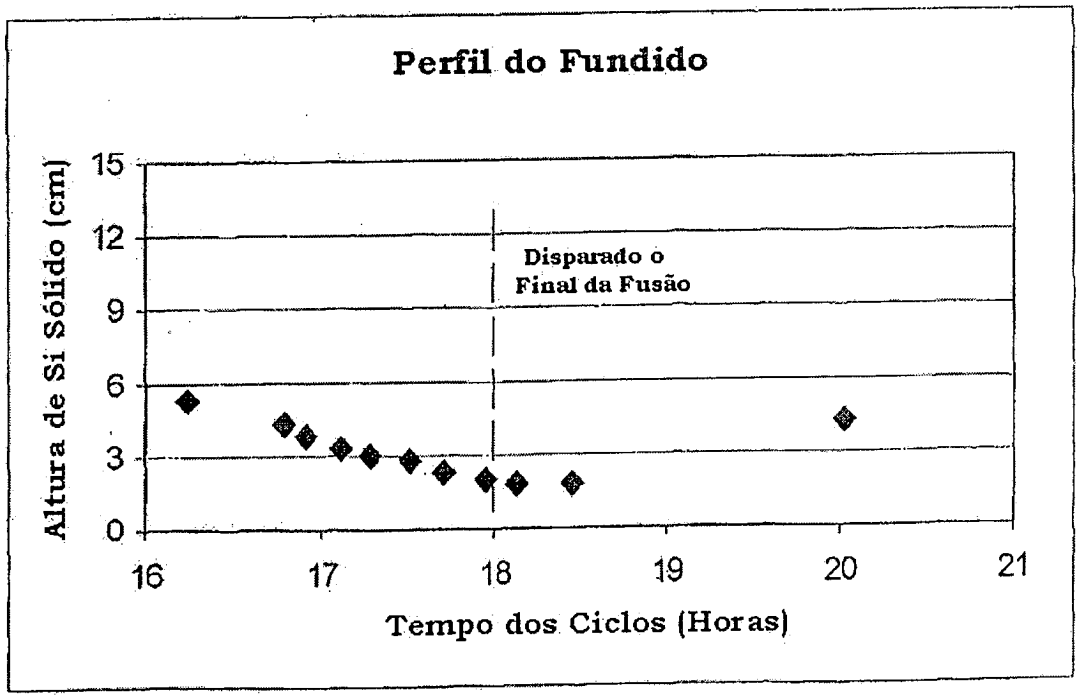


Figura 8D

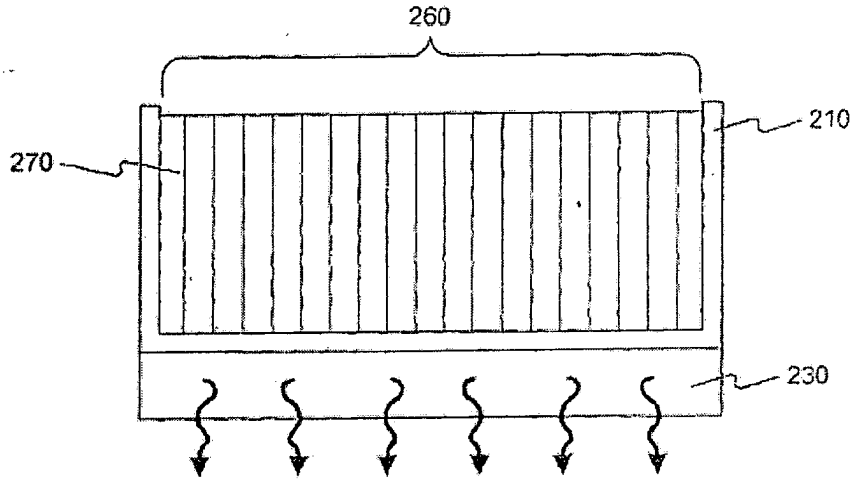


Figura 8E

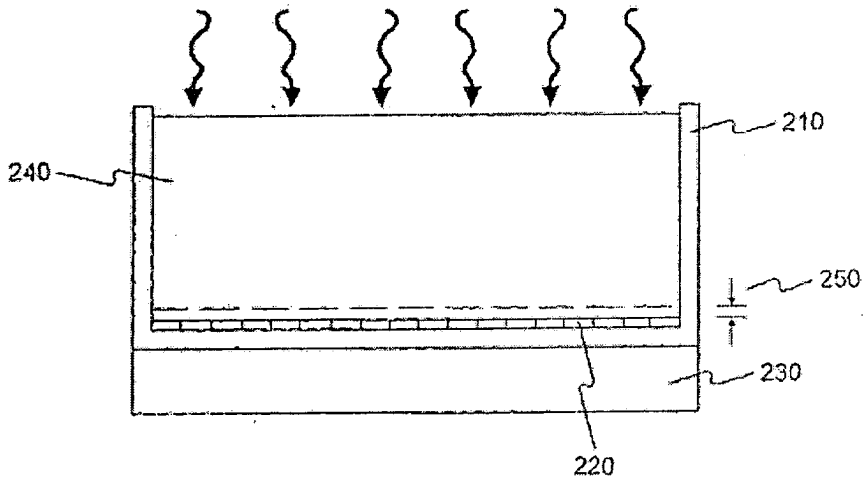


Figura 8F

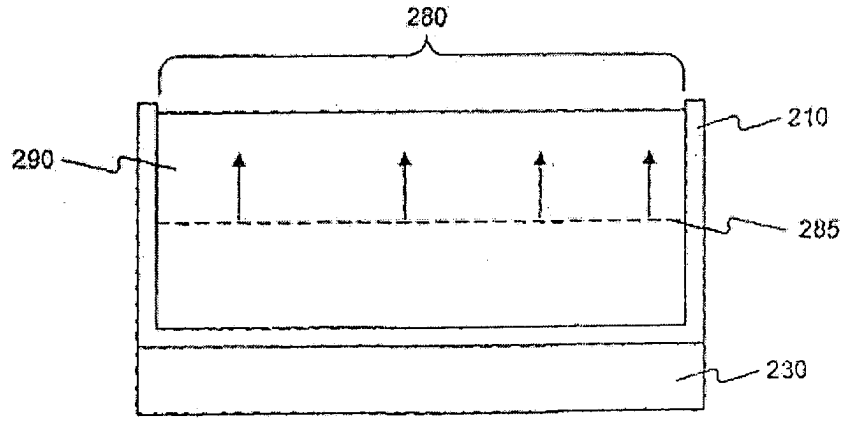


Figura 8G

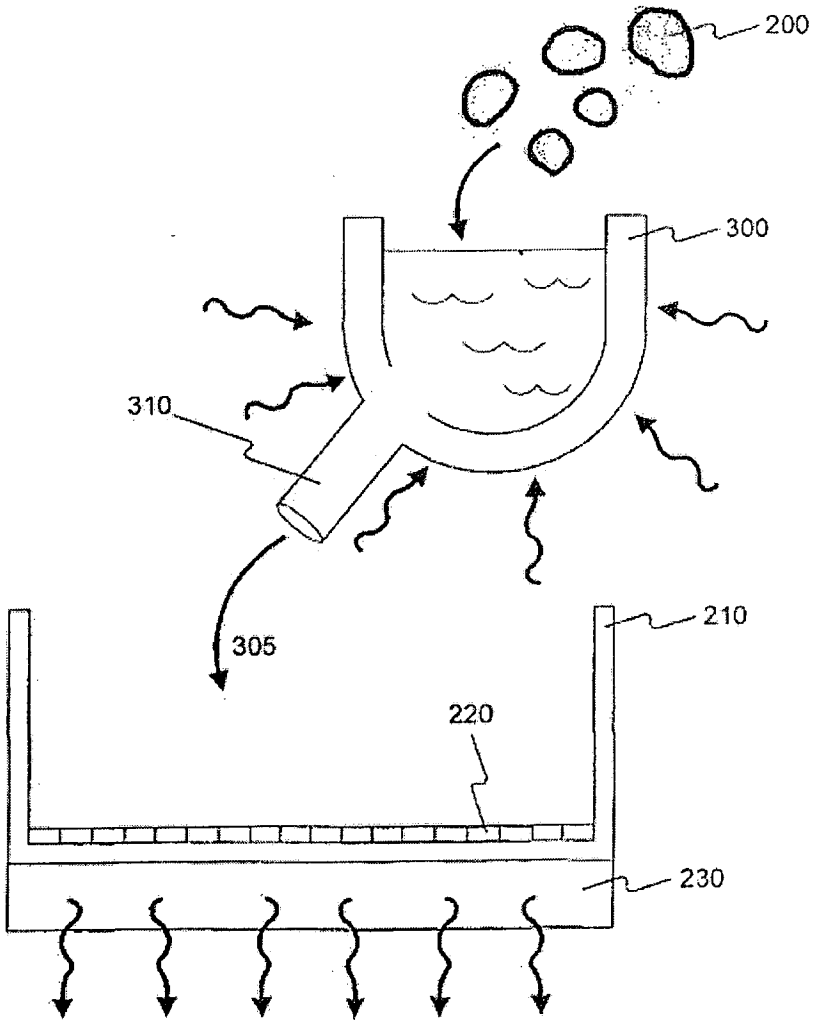
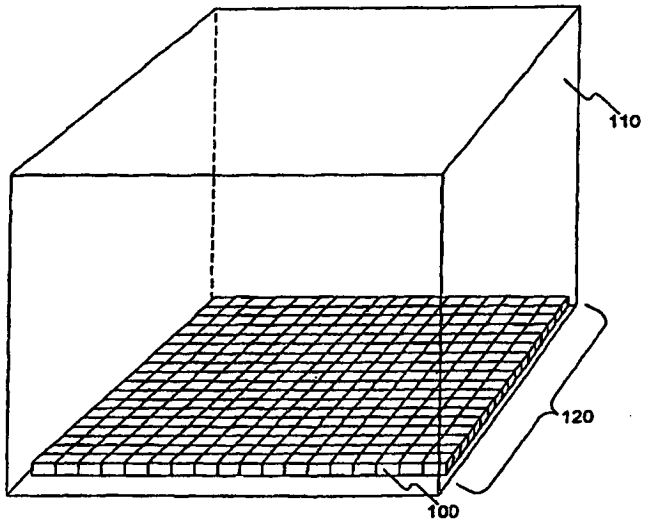


Figura 9

PI0706547-7

"Métodos de Fabricação de Silício Moldado e de Célula Solar, Células Solares, Corpos de Silício Monocristalinos Contínuos, Bolachas e Silício"

Resumo



Métodos e aparelhos são providos para moldagem de silício para células fotovoltaicas e outras aplicações. Com esses métodos e aparelhos, pode ser formado um corpo moldado de silício monocristalino que é isento ou substancialmente isento de impurezas e defeitos distribuídos radialmente e tendo pelo menos duas dimensões que são, cada uma, de pelo menos cerca de 35 cm.