

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

(21) PI 0808212-0 A2



(22) Data de Depósito: 10/03/2008
(43) Data da Publicação: 01/07/2014
(RPI 2269)

(51) Int.Cl.:
H01L 31/07
H01L 31/028

(54) Título: "CELULA FOTOVOLTAICA E MÉTODO PARA GERAR ELETRICIDADE"

(57) Resumo:

(30) Prioridade Unionista: 13/03/2007 US 11/685,439

(73) Titular(es): WISCONSIN ALUMNI RESEARCH FOUNDATION

(72) Inventor(es): FENG LIU, MAX LAGALLY

(74) Procurador(es): Antonio Mauricio Pedras Arnaud

(86) Pedido Internacional: PCT US2008056420 de 10/03/2008

(87) Publicação Internacional: WO 2008/112639 de 18/09/2008

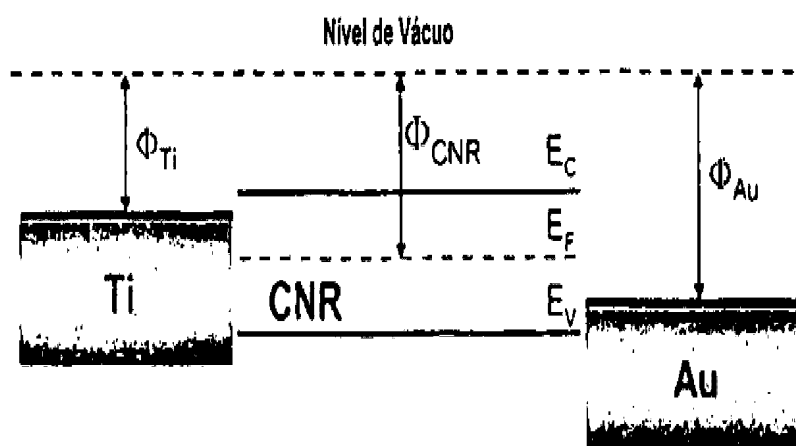
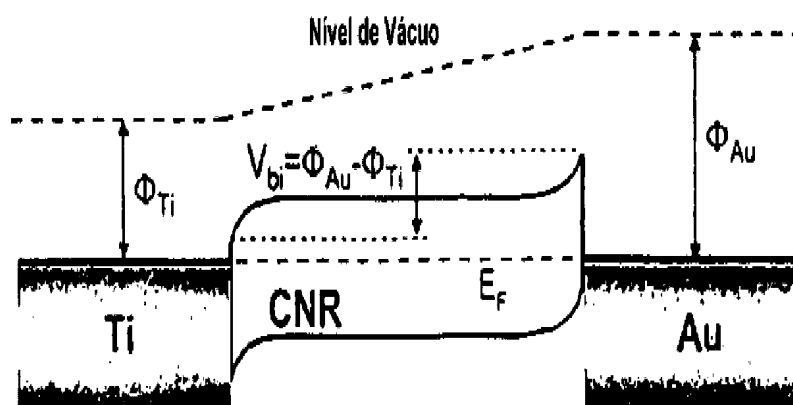


FIG.2a



"CÉLULA FOTOVOLTAICA E MÉTODO PARA GERAR ELETRICIDADE".

Histórico da Invenção

Células fotovoltaicas convertem a luz do sol diretamente em eletricidade através da interação dos fótons com um material fotocondutor. Para produzir uma célula fotovoltaica, um material fotocondutor, comumente silício, é ligado por contato elétrico para formar uma junção. Atualmente, a maior parte das células fotovoltaicas baseadas em silício se trata de dispositivos de junção silício p-n. Os fótons atingem as células e são absorvidos, provendo a formação de pares elétron-buraco; os pares elétron-buraco se movem em direções contrárias na junção e criam uma corrente. Uma grade dos contatos cria um arranjo de células a partir do qual a corrente é colhida. A corrente contínua produzida nas células depende do material usado, da energia e intensidade da radiação incidente na célula. Células fotovoltaicas já estão disponíveis no mercado há muitos anos e prevê-se que o uso de células fotovoltaicas deve crescer nos anos vindouros. O maior obstáculo ao uso de células fotovoltaicas, no entanto, diz respeito a sua eficiência e custo. Presentemente, o custo per Watt para grande parte das células não é suficientemente baixa para competir com as outras fontes de energia. Correntemente, o material padrão usado na indústria é o Si cristalino. Mas, com o Si é improvável que se consiga um custo mais baixo que \$1,00/ Watt em virtude da concentração de material usada em sua produção. Ademais, a eficiência intrínseca da Si é limitada pela termodinâmica a menos que cerca de 30%. A eficiência de célula solar é limitada por fatores intrínsecos e extrínsecos. Os fatores de perdas extrínsecas, tal como perdas por reflexão e transparência (opacidade) e coleta incompleta de portadores foto-gerados, devido a contatos imperfeitos e vazamentos, podem ser superados no projeto e fabricação de módulos de célula. As perdas intrínsecas, no entanto, devem ser

superadas pelo projeto de materiais de célula através de engenharia de banda de energia (bandgap). Por exemplo, mesmo se todas perdas extrínsecas pudessem ser eliminadas, a eficiência mais alta de uma célula ideal
5 feita de um único material é cerca de 31% com uma banda de energia ótima de cerca de 1,35 eV (C.H. Henry *J.Appl. Phys.* 51, 4494 (1980), porque fótons solares com energia menor que a banda de energia não podem ser adsorvidos, enquanto a dissipação de energia devido à termalização
10 dos buracos e elétrons gerados para fótons com energias mais altas produz calor e, portanto, perde energia. Uma estratégia para melhorar a eficiência das células é usar combinações de material de múltiplas bandas de energia. A eficiência de célula mais alta - perto de 40%
15 - foi conseguida através de células multijunção, feitas de filmes finos de III-V e Ge. No entanto, estas células de alta eficiência são caras para utilização comercial. Mais recentemente, uma célula de barreira Schottky baseada em nanotubos de carbono de uma única parede
20 foi proposta. No entanto, uma produção mais barata de tais células pode não ser possível. Assim, torna-se necessário descobrir novos materiais para melhorar a eficiência das células e reduzir seu custo para atingir a meta de custo - menor que \$0,50/ Watt.

25 Sumário da Invenção

A presente invenção se relaciona a células fotovoltaicas baseadas em grafite e a métodos para gerar eletricidade a partir de tais células. Nestas células fotovoltaicas, pilhas espacialmente separadas de grafite, cada uma delas
30 compreendendo uma pluralidade de folhas de grafeno semicondutivo, servem como material fotovoltaico, ligando contatos elétricos. As folhas de grafeno ou nanofitas têm dimensões nanométricas para largura, de modo que banda de energia de cada folha depende da largura da
35 folha. Assim, incorporando folhas de grafeno de diferentes larguras, daí, diferentes bandas de energia, à célula fotovoltaica, a célula pode ser projetada para

absorver eficientemente através do espectro solar, resultando uma célula fotovoltaica eficiente e barata.

Em uma configuração básica, a célula fotovoltaica inclui um primeiro contato (ou jogo de primeiros contatos) compreendendo um primeiro material eletricamente condutivo, através do qual as nanofitas nas pilhas de grafite formam uma barreira Schottky (para elétrons ou buracos), e um segundo contato (ou jogo de segundos contatos) compreendendo um segundo material eletricamente condutivo através do qual as nanofitas nas pilhas de grafite formam uma barreira Schottky menor ou mesmo nenhuma barreira Schottky, ou uma barreira Schottky para o portador oposto. Em uma versão de célula de barreira Schottky, o primeiro material eletricamente condutivo - tipicamente metálico - tem uma função de trabalho mais baixa que das nanofitas. Em consequência, as junções formadas entre o primeiro material eletricamente condutivo e as nanofitas se caracterizam pelo fato de formarem barreiras Schottky para elétrons. O segundo material eletricamente condutivo pode ter uma função de trabalho próxima das nanofitas, de modo que nenhuma barreira Schottky se forme na junção. Alternativamente, as junções formadas entre o segundo material eletricamente condutivo e as nanofitas se caracteriza por formar barreiras Schottky para elétrons menores que as formadas nas junções entre o primeiro material eletricamente condutivo e as nanofitas. Em ainda outra variação alternativa, as barreiras Schottky para buracos são formadas nas junções entre o segundo material eletricamente condutivo e as nanofitas. Nesta variação, o segundo material eletricamente condutivo é selecionado de modo que tenha uma função de trabalho mais alta que das nanofitas.

As células fotovoltaicas podem ser usadas para gerar eletricidade, expondo as células fotovoltaicas a uma radiação capaz de fotogerar portadores de carga em folhas de grafeno (radiação solar), por conseguinte, produzindo

eletricidade, que é transferida para um dispositivo de armazenamento ou consumo.

Descrição Resumida dos Desenhos

A figura 1a é um diagrama mostrando o confinamento de elétron em um nanotubo de carbono (1a painel superior) e em uma nanofita de carbono (1a painel inferior);

As figuras 1b a 1e são ilustrações esquemáticas de nanofitas de carbono tendo uma configuração braço-de-cadeira ("armchair") assimétrica (1b); uma configuração em zig-zag simétrica (1c); uma configuração "braço-de-cadeira" simétrica (1d); e uma configuração "zig-zag" assimétrica (1e). As faixas verticais em (1c) e (1d) indicam a retirada de uma fileira de átomos na borda direita em relação àquelas em (1a) e (1b), respectivamente;

As figuras 2a e 2b mostram um diagrama esquemático de nível de energia de um contato de titânio; uma nanofita de carbono; e um contato de ouro antes de o contato ser feito (2a), e em contato com os três materiais (2b);

A figura 3 mostra diagrama esquemático de uma vista de topo de uma célula fotovoltaica de barreira Schottky baseada em grafite. Cada linha vertical na figura representando uma pilha de nanofitas; e

A figura 4 mostra a seqüência de fabricação para produzir uma célula fotovoltaica em um substrato de grafite.

Descrição Detalhada da Invenção

A presente invenção usa pilhas de grafite modeladas litograficamente como elementos básicos de construção para células fotovoltaicas eficientes e econômicas.

O projeto básico das células fotovoltaicas baseadas em grafite inclui uma pluralidade de pilhas de grafite espacialmente separadas, cada uma delas compreendendo uma pluralidade de folhas de grafeno semicondutivas empilhadas verticalmente (nanofitas de carbono) ligando contatos eletricamente condutivos. Os materiais de contato, que tipicamente constituem dois metais diferentes, têm diferentes funções de trabalho no contato

Schottky com as nanofitas das pilhas de grafite, gerando um potencial incorporado nas nanofitas.

As atuais células fotovoltaicas são vantajosas em virtude do fato de as propriedades eletrônicas das nanofitas
5 arranjadas dependerem da direção da nanofita (quiralidade) e largura, análoga à dependência de propriedades eletrônicas de nanotubos de carbono de uma parede (SWNT) com respeito à quiralidade e diâmetro do tubo. Um nanotubo frequentemente é visto como uma peça
10 enrolada de grafeno (folha simples de grafite); e, ao invés, uma nanofita pode ser considerada como sendo um nanotubo desenrolado. O confinamento de elétrons, a origem física que dá surgimento à diferenciação entre comportamento semicondutivo e metálico, é equivalente nas
15 configurações de tubo e fita, como ilustrado na figura 1a. Em ambos casos, os elétrons são confinados para formar ondas verticais ao longo de C_r , o vetor de enrolamento de um SWNT, embora ligeiramente diferente das condições limite. Na nanofita, dois pontos nodais da onda
20 de elétron confinado devem estar na borda da fita (parte inferior da figura 1a), enquanto em um SWNT, os mesmos podem estar em qualquer lugar, i.e. condição limite periódica circunferencial, como ilustrado na parte superior da figura 1a.
25 A direção de uma nanofita determina se a mesma é metálica ou semicondutiva. Isto é particularmente relevante para aplicações fotovoltaicas, onde são necessárias nanofitas semicondutivas. A "direção" de uma nanofita pode ser provida considerando meios de cortar uma folha de
30 grafeno. Cortando uma folha de grafeno ao longo de duas fileiras de ligações C-C, nanofitas de diferentes "quiralidades" - braço-de-cadeira (figuras 1b e 1d e zig-zag (figuras 1c e 1e) - podem ser criadas dependendo dos cortes. Também para uma dada quiralidade, há duas classes
35 de nanofitas, com quer uma estrutura de borda simétrica esquerda-direita (figuras 1c e 1d com painel azul removido), ou estrutura de borda assimétrica esquerda-

direita (figuras 1b e 1e com painel azul removido).
Deve ser apreciado que todo braço-de-cadeira e um terço das nanofitas simétrica zig-zag são metálicos, e dois terços das nanofitas zig-zag são semicondutivas.

5 Acontecendo igual nos nanotubos de carbono de uma parede. Especialmente interessante para aplicações fotovoltaicas é o fato de dois terços do nanofitas zig-zag se comportarem como semicondutivas, com banda de energia finita. Isto provê uma nova classe de nanomateriais

10 (semicondutivos nanométricos) adequados para construir blocos para fabricar as atuais células fotovoltaicas. Em virtude de as bandas de energia das nanofitas aumentarem continuamente com a largura decrescente de fita, pilhas de grafite tendo uma variedade de larguras,

15 e, por conseguinte, compreendendo nanofitas de diferentes bandas de energia, podem ser incorporadas à célula fotovoltaica, provendo uma célula fotovoltaica que absorva os comprimentos de onda ao longo de todo espectro da radiação solar. Por exemplo, a célula fotovoltaica

20 pode incluir nanofitas com bandas de energia que se estendem na faixa de cerca de 0,1 eV a cerca de 2 eV. Isto pode ser feito com pilhas de grafite com diferentes larguras, de cerca de 30 nm a cerca de 1 nm (cerca de 20 nm a cerca de 2,5).

25 Outra característica interessante das nanofitas é o fato de suas funções de trabalho não serem fortemente dependentes de suas larguras. Cálculos de primeiros princípios indicam que todas nanofitas "zig-zag" e "braço-de-cadeira" têm uma função de trabalho de cerca de

30 4,58 eV, apenas ligeiramente menor que a função de trabalho de uma folha única infinita de grafeno (4,66 eV). Este comportamento é drasticamente diferente de SWNTs, onde o efeito da curvatura induz um dipolo superficial, que muda a função de trabalho de um SWNT,

35 que faz o mesmo depender do diâmetro do tubo. A independência da função de trabalho das nanofitas de carbono em relação à largura é um aspecto

tecnologicamente útil para projetar células solares baseadas em nanofitas. Quando nanofitas de carbono de diferentes tamanhos são colocadas em contato com terminal metálico, a mesma magnitude do potencial de contato (ou barreira Schottky) será gerado em todos os contatos, independente do tamanho da nanofita de carbono. Assim, para as presentes células, o mesmo potencial global será gerado fotovoltaicas de através de todas as nanofitas de carbono ligando eletricamente dois contatos condutivos em uma arquitetura de célula multi-energia.

Para efeito de ilustração, a figura 2 é um diagrama esquemático de um dispositivo de contato de Titânio - contato de Au - nanofita de carbono (Ti-CNR-Au) de acordo com a presente invenção. Neste projeto de dispositivo, um terminal metálico (Ti) tem função de trabalho (4,3eV) menor que da nanofita, e o outro terminal metálico (Au) tem função de trabalho (5,1 eV) maior que da nanofita. A figura 2a mostra os diagramas de banda de energia de cada material no dispositivo (Ti-CNR-Au) antes do contato, onde os níveis Fermi dos materiais estão desalinhados, em razão da diferença de função de trabalho. Quando os três materiais são colocados em contato (figura 2b) seus níveis Fermi devem se alinhar. Em consequência, um campo elétrico é gerado na nanofita de carbono, com um potencial incorporado (V) igual à diferença da função de trabalho entre dois terminais metálicos, como mostrado na figura 2b. Idealmente, para o caso de uma nanofita intrínseca curta, (V_{bi}) pode diminuir linearmente através de toda nanofita do contato de Au para o contato de Ti, como o nível de vácuo mostrado esquematicamente na figura 2b. Para uma nanofita muito longa e dopada, o nível de dopagem pode ser mantido constante, ou a energia Fermi da nanofita permanece constante na porção média da nanofita. Então, neste caso, as bandas de valência e condução serão planas na porção média da nanofita, mas se curvam para baixo perto do contato de Ti e para cima perto

do contato de Au, respectivamente, como ilustrado na figura 2b. O campo incorporado pode separar pares elétron-buraco gerados por fótons incidentes, e criar uma corrente.

- 5 Uma típica célula fotovoltaica de barreira Schottky baseada em grafite de acordo com a invenção pode incluir bilhões (trilhões) de nanofitas dependendo da densidade e dimensões das pilhas de grafite. Uma célula fotovoltaica de nanofita de grafite pode ser projetada para conter
10 tanto quanto possível uma densidade de arranjo de fitas para aumentar a opacidade, tal como $10^8/\text{cm}^2$, com profundidade 10^4 , para prover a maior densidade de energia. A densidade de energia máxima de iluminação solar é $\sim 850 \text{ W/m}^2$ sem concentrador solar. As atuais
15 células fotovoltaicas podem prover densidades de energia de 50 W/m^2 ou mais, sem concentrador solar. Com certeza, um concentrador solar aumenta a densidade de energia. Por exemplo, com concentrador solar 100x são conseguidas densidades de 5000 W/m^2 .
- 20 Um diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica de barreira Schottky baseada em grafite é dado na figura 3. A célula inclui um grande arranjo de pilhas de grafite (cada linha na figura representa uma pilha de grafite contendo mais que $>10^4$ nanofitas verticalmente
25 empilhadas) conectadas entre os eletrodos metálicos para formar contatos Schottky. Cada pilha é contatada por dois contatos metálicos (por exemplo, um contato de Ti e um contato de Au). Cada fileira gera uma fotocorrente (fotovoltagem) e pode ser ligada para atender um uso
30 específico. Uma leitura pode servir a todas camadas de grafeno na pilha de grafite, porque as camadas de grafeno individuais são naturalmente independentes de grafite. A célula fotovoltaica de barreira Schottky resultante opera similarmemente às células fotovoltaicas típicas.
- 35 Um fóton excita um elétron a partir da banda de valência para a banda de condução. O par elétron-buraco gerado por esta ação preenche o campo estabelecido pela diferença

das funções de trabalho entre os dois contatos metálicos e a nanofita, e elétrons e buracos se separam. As células podem ser ligadas para aumentar a corrente ou voltagem, tal como em uma célula fotovoltaica convencional.

- 5 As células fotovoltaicas podem ser feitas através de técnicas de processamento de semicondutor, tal como litografia, modelagem, ataque químico (gravação), que é vantajoso, porque provê um processo paralelo barato capaz de formar muitas pilhas idênticas ou diferentes
- 10 em uma única corrida. O método básico de formar uma pluralidade de pilhas inclui modelar uma pluralidade de pilhas em um substrato de alta pureza, e então fazer a gravação no substrato a uma profundidade de centenas de microns, usando plasma de oxigênio. Por exemplo,
- 15 as pilhas de grafite podem ser preparadas a partir de tiras finas de 0,2 mm de grafite pírolítica comercialmente disponíveis (HOPG) (SPI products HOPG grau I) (podendo ser usadas camadas mais finas ou mais grossas de grafite). No entanto, desejavelmente,
- 20 o substrato de grafite deve ser suficientemente fino para ser flexível. O filme fino HOPG pode ser transferido para um substrato, tal como proposto em Novoselov et al, *Science* 306, 666 (2004). Para um dispositivo fotovoltaico, é desejável usar um substrato isolante,
- 25 tal como, um wafer de Si oxidado com filme grosso de SiO_2 (~300 nm) pode ser usado como substrato. Alternativamente, para prover uma célula flexível e menos cara pode ser usado um polímero flexível, tal como PET, como substrato. Um fotoresistor SU8 pode ser usado
- 30 para ligar a grafite ao filme PET (por exemplo, Yuan et al, *J. Appl Phys* 100, 013708 (2006)).
- A geometria desejada de nanofita pode ser preparada por nano-modelagem e gravação (ataque) do filme fino de grafite. Uma ilustração de uma sequência de fabricação é
- 35 provida na figura 4. Um filme de SiO_2 , tendo uma espessura de 200 nm (402), que serve com máscara para gravação, é primeiramente depositado em uma superfície

HOPG (404) com deposição química de vapor acelerada com plasma (PECVD). A superfície HOPG é suportada por um substrato 400. Um material resistor 406, como polimetacrilato (PMMA), é revestido sobre uma máscara para gravação (etapa A). Uma técnica litográfica de alta resolução, tal como litografia de nano-impressão ou nanolitografia de interferência laser UV ou EUV, então é usada para criar um modelo no resistor, que vai prover um arranjo (array) de pilhas de grafite espacialmente separadas. O óxido exposto então é removido por gravação a seco anisotrópico (i.e. SiO_2 de gravação a seco) para obter uma parede lateral fortemente inclinada, i.e. impedir o rebaixo que ocorre em uma gravação a seco (etapa B). O filme de grafite então é gravado usando plasma de oxigênio para formar trilhas de profundidade apropriada (etapa C). As larguras das trilhas podem ser selecionadas para as energias de banda desejadas das nanofitas. Uma vez as trilhas formadas no filme de grafite, um processo de evaporação de feixe de elétrons, ou uma outra técnica de deposição metálica adequada, pode ser usado para depositar Ti 410 e Au 412 (etapa D) e procedimentos avançados podem ser usados para definir os contatos (etapa E). Opcionalmente, os espaços (por exemplo, trilhas) ao longo do comprimento das nanofitas podem ser preenchidos com um polímero passivador, para impedir que as bordas das nanofitas reajam com oxigênio ou outros vapores do ambiente (por exemplo, H_2O , N_2 , etc.).

O uso de técnicas litográficas para formar pilhas de grafite é vantajoso, porque permite uma formação seletiva de nanofitas semicondutivas ao invés de nanofitas metálicas. A formação seletiva de nanofitas semicondutivas pode ser feita usando a direção apropriada de modelagem para prover folhas de grafeno tendo configurações "zig-zag" simétricas ou assimétricas, ou uma combinação destas. Dependendo da técnica litográfica usada, pode ser impraticável ou impossível formar pilhas

de grafite que não tenham nenhuma nanofita "zig-zag" metálica. Nestas situações, as nanofitas metálicas podem ser eliminadas em uma etapa separada. Por exemplo, as nanofitas metálicas podem ser convertidas em nanofitas semicondutivas, queimando de maneira similar àquela usada em nanotubos de carbono (por exemplo, Collins *et al*, Science 292, 703 (2001)). Neste método, uma pilha de grafite é processada para tornar as nanofitas semicondutivas não-condutivas, e uma corrente é aplicada às pilhas para "queimar" as nanofitas metálicas até que seu tamanho seja suficientemente reduzido para deixá-las semicondutivas. Alternativamente, as bordas das nanofitas metálicas podem ser dopadas para deixá-las semicondutivas.

Assim, em algumas configurações pode ser desejável que parte ou toda as nanofitas nas pilhas de grafite seja seletivamente dopada. Por exemplo, uma junção p-n pode ser criada dopando com diferentes dopantes dois diferentes segmentos de uma nanofita. Um meio efetivo para dopar nanofitas é manipular suas bordas com diferentes terminações. Por exemplo, as nanofitas seriam dopadas tipo-n, se terminadas com elementos grupo V, tal como Fósforo (P) e Arsênico (As) e dopadas tipo-p se terminadas com elementos do grupo III, como Boro (B) e Gálio (Ga). A terminação de nanofita pode ser modificada fazendo fluir precursores moleculares, contendo o átomo dopante requerido, tal como Fosfina (Hidreto de Fósforo) (PH₃) para dopante P, e Arsina (Hidreto de Arsênio) (AsH₃) para dopante As, para uma nanofita nua.

As dimensões típicas para pilhas definidas litograficamente incluem uma altura de cerca de 100 μm a cerca de 300 μm, uma largura de cerca de 2nm a cerca de 30 nm, e um comprimento de cerca de 0,1 μm a cerca de 1000 μm. Densidades típicas de pilha em um substrato correspondem à cerca de 10⁶ à cerca de 10¹² pilhas/cm². Células fotovoltaicas que usem estas dimensões de pilha podem conter 10¹² folhas de grafeno per cm².

Em uma pilha de grafite definida litograficamente se constata algumas pequenas variações nas larguras das nanofitas verticalmente empilhadas. A variação depende dos limites de processos de modelagem e gravação
5 usados. Assim, as nanofitas em uma pilha de largura não-uniforme tendo larguras não-uniformes, sendo que tal não uniformidade é criada pelas limitações da técnica litográfica, serão consideradas como de "larguras substancialmente idênticas" e, portanto, "bandas de
10 energia substancialmente idênticas". Por exemplo, pilhas de grafite ou nanofitas serão consideradas como tendo "larguras substancialmente idênticas", se as suas larguras variarem menos que cerca de 0,2 nm.

As pilhas de grafite podem ser providas em um substrato de grafite em um arranjo ou modelo regular. É desejável
15 incluir pilhas de grafite de diferentes larguras nas células fotovoltaicas, para produzir células que absorvam radiação em diferentes comprimentos de onda. As larguras desejavelmente são selecionadas para prover
20 uma célula que absorva comprimentos de onda através do espectro solar (de cerca de 0,1 eV a cerca de 2 eV). Por exemplo, uma célula fotovoltaica pode incluir uma pluralidade de regiões (três ou mais), onde a região é definida como uma pluralidade de pilhas de grafite de
25 larguras idênticas ou substancialmente idênticas. As pilhas de grafite em cada região podem ser espacialmente agrupadas ou separadas por pilhas de grafite de outras regiões. As diferentes regiões podem ser ligadas em série para formar uma célula fotovoltaica.

30 Uma vez que uma pluralidade um arranjo de pilhas tenha sido formada em um substrato de Au e Ti (ou um outro material condutivo apropriado), os contatos sendo depositados em trilhas. Em virtude de as nanofitas serem muito mais compridas que largas, a modelagem e deposição
35 de metal podem ser executadas por técnicas convencionais de deposição. Os contatos resultantes conectarão as nanofitas em todas camadas de uma dada pilha de grafite.

Como usado aqui, a menos que expressamente indicado de outra forma, "um" ou "uma" significa "um ou mais". Todas as Patentes, Pedidos de Patente, Referências, e Publicações citadas nesta foram incorporadas por
5 referência em sua totalidade, na mesma extensão em que foram individualmente incorporadas por referência.

Como aqueles habilitados na técnica deverão entender, para todos propósitos, em particular com respeito à descrição escrita, todas as faixas descritas nesta
10 englobam quaisquer e todas possíveis sub-zonas e combinações de sub-faixas da mesma. Qualquer faixa listada pode ser facilmente reconhecida como suficientemente descrevendo e possibilitando a divisão desta mesma faixa em pelo menos metades, terças partes,
15 quartas partes, etc. iguais Como deve ser entendido por aqueles habilitados na técnica, todos os termos, tal como "até", "pelo menos", "maior que", "menor que", etc. incluem o número indicado e se referem às faixas que poderão vir a ser subseqüentemente divididas em sub-
20 faixas, como mostrado acima. Finalmente, como deve ser entendido, por aqueles habilitados na técnica, as faixas incluem cada membro individual.

Deve ser entendido que a invenção não se limita às configurações particulares estabelecidas aqui em caráter
25 ilustrativo, mas, ao invés, engloba todas formas incluídas dentro do escopo das reivindicações que se seguem.

REIVINDICAÇÕES

- 1- Célula fotovoltaica, caracterizada pelo fato de compreender:
- a- um primeiro contato compreendendo um primeiro material de contato eletricamente condutivo;
- b- um segundo contato compreendendo um segundo material de contato eletricamente condutivo; e
- c- uma pluralidade de pilhas de grafite espacialmente separadas ligando os primeiro e segundo contatos, cada pilha de grafite compreendendo uma pluralidade de folhas de grafeno semicondutivas verticalmente empilhadas;
- sendo que as junções entre o primeiro material eletricamente condutivo e as folhas de grafite formam barreiras Schottky para elétrons ou buracos.
- 2- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de as pilhas de grafite terem larguras não maiores que 50 nm.
- 3- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de as pilhas de grafite terem larguras não maiores que 30 nm.
- 4- Célula, de acordo com a reivindicação 3, caracterizada pelo fato de as pilhas de grafite terem larguras de cerca de 2 μm a cerca de 25 μm .
- 5- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de as pilhas de grafite terem alturas de cerca de 100 μm a cerca de 300 μm .
- 6- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de a densidade das pilhas de grafite ser pelo menos 1000 pilhas/ cm^2 .
- 7- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de pelo menos algumas das folhas de grafeno serem dopadas.
- 8- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de todas, ou substancialmente todas, folhas de grafeno serem semicondutivas.
- 9- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de as pilhas de grafite definirem

uma pluralidade de regiões, cada região compreendendo uma pluralidade de pilhas de grafite de larguras substancialmente idênticas e folhas de grafeno tendo bandas de energia substancialmente idênticas, onde cada
5 região é conectada em série com pelo menos uma outra região.

10- Célula, de acordo com a reivindicação 9, caracterizada pelo fato de as pilhas de grafite, em cada região, serem espacialmente agrupadas.

10 11- Célula, de acordo com a reivindicação 9, caracterizada pelo fato de as folhas de grafeno terem bandas de energia que se estendem na faixa de cerca de 0,1 eV a cerca de 2 eV.

12- Célula, de acordo com a reivindicação 9,
15 caracterizada pelo fato de compreender pelo menos três regiões.

13- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de as junções entre o primeiro material de contato eletricamente condutivo e as folhas
20 de grafeno formarem barreiras Schottky para elétrons, e de as junções entre o segundo material eletricamente condutivo e as folhas de grafeno não formarem barreiras Schottky para elétrons.

14- Célula, de acordo com a reivindicação 1,
25 caracterizada pelo fato de as junções entre o primeiro material eletricamente condutivo e as folhas de grafeno formarem barreiras Schottky para elétrons, e de as junções entre o segundo material eletricamente condutivo e as folhas de grafeno formarem barreiras
30 Schottky para elétrons.

15- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de as junções entre o primeiro material eletricamente condutivo e as folhas de grafeno formarem barreiras Schottky para elétrons, e de
35 as junções entre o segundo material eletricamente condutivo e as folhas de grafeno formarem barreiras Schottky para buracos.

- 16- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de ser capaz de produzir uma densidade de energia de pelo menos cerca de 50 W/m^2 , sem concentrador solar.
- 5 17- Célula, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de ser capaz de produzir uma densidade de energia de pelo menos cerca de 5000 W/m^2 , com concentrador solar de 100x.
- 10 18- Método para gerar eletricidade, caracterizado pelo fato de compreender expor a célula fotovoltaica, conforme definida na reivindicação 1, a uma radiação capaz de fotogerar portadores de carga nas folhas de grafeno, produzindo eletricidade.
- 15 19- Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de a radiação ser radiação solar.

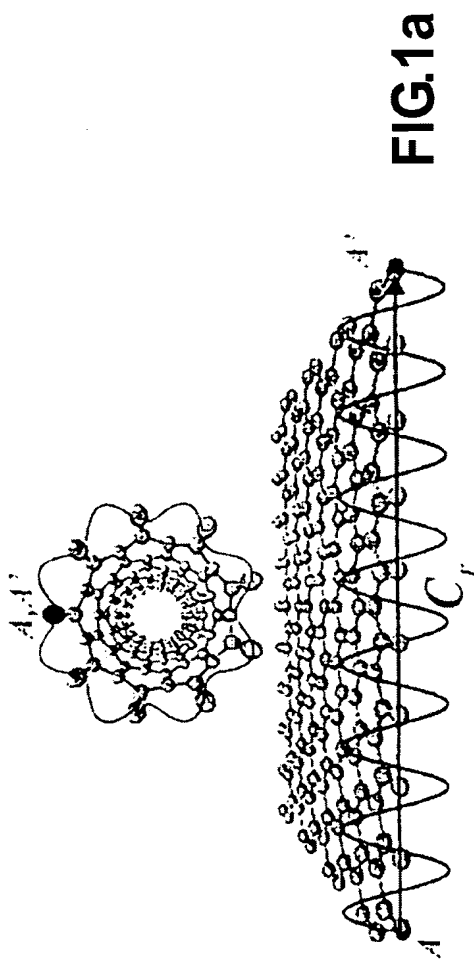


FIG.1a

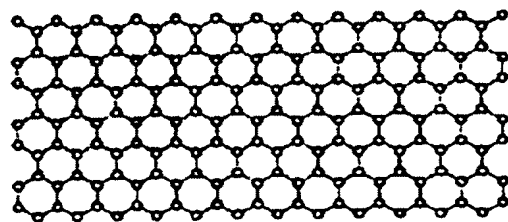


FIG.1b

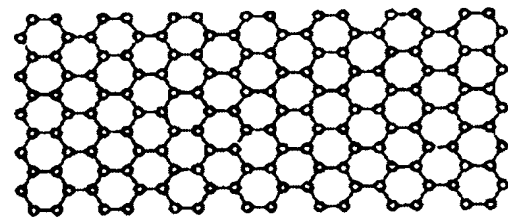


FIG.1c

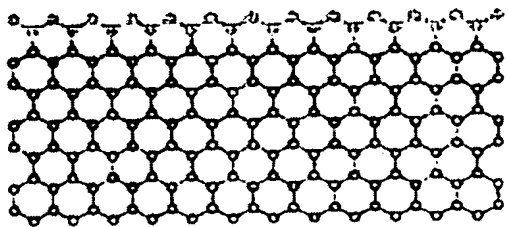


FIG.1d

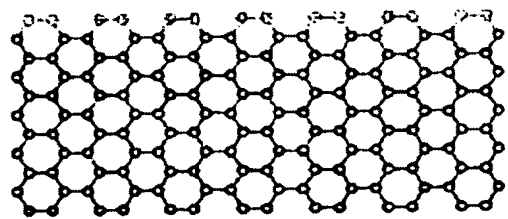


FIG.1e

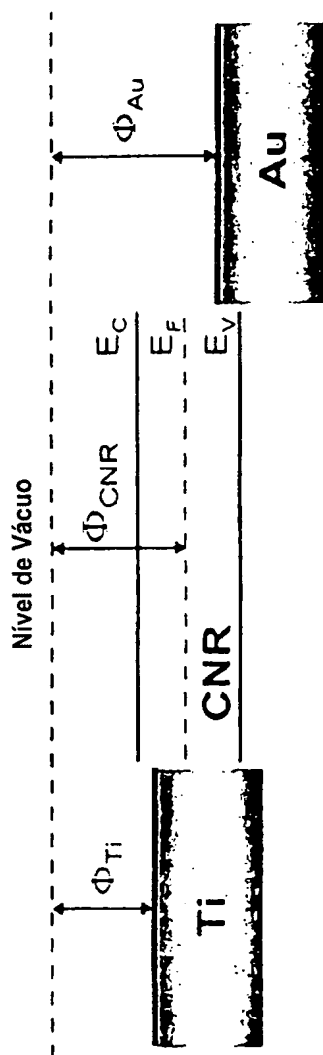


FIG.2a

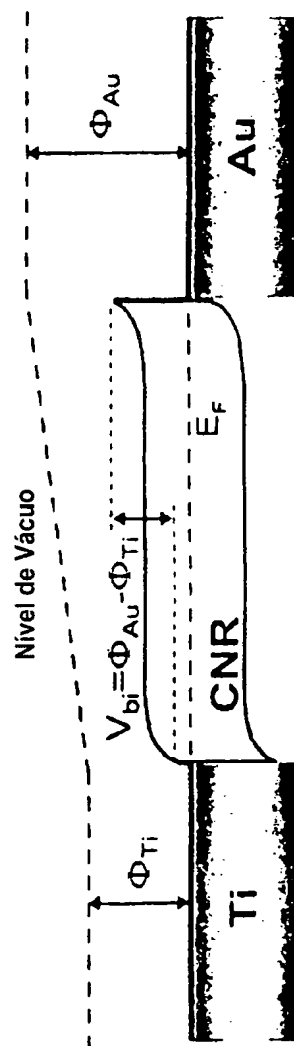


FIG.2b

3/4

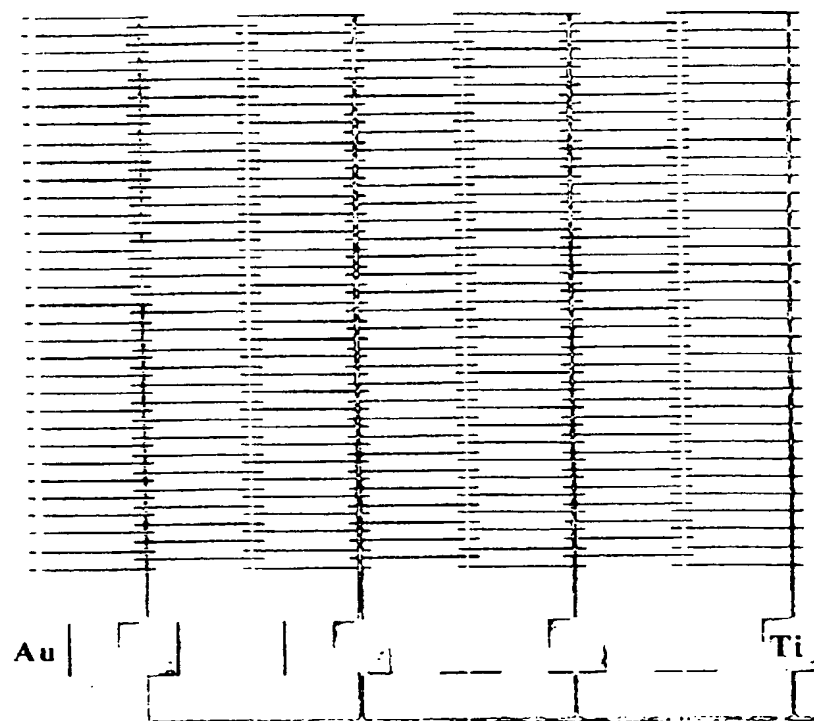


FIG.3

4/4

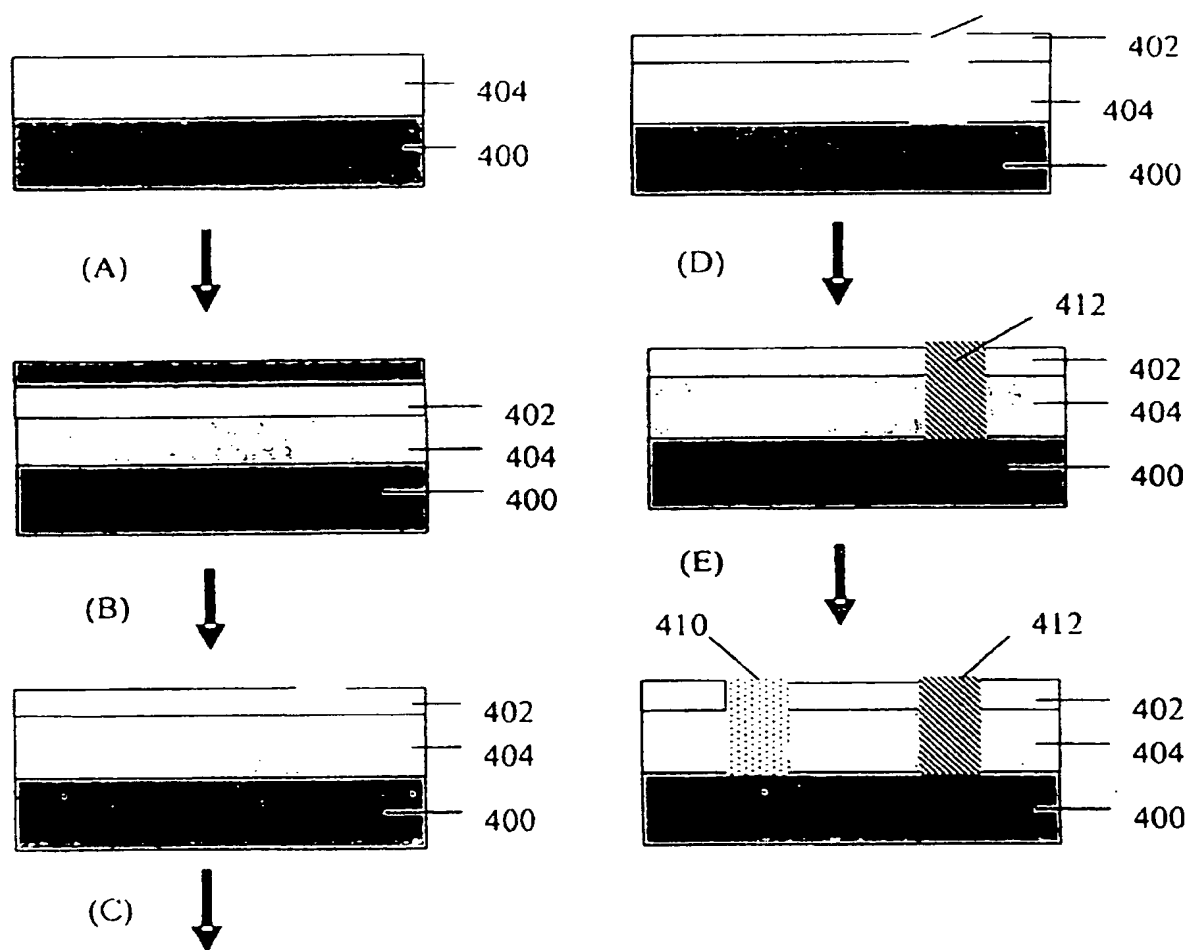


FIG.4

RESUMO

"CÉLULA FOTOVOLTAICA E MÉTODO PARA GERAR ELETRICIDADE".

A presente invenção usa pilhas de grafite arranjadas litograficamente como elemento básico para fabricação de
5 uma célula fotovoltaica eficiente e econômica. O projeto básico das células fotovoltaicas baseadas em grafite inclui uma pluralidade de pilhas de grafite espacialmente separadas, cada uma delas incluindo uma pluralidade de
folhas de grafeno semicondutivas verticalmente empilhadas
10 (nanofitas de carbono) ligando contatos eletricamente condutivos.