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

(21) **PI0610076-7 A2**

* B R P I 0 6 1 0 0 7 6 A 2 *

(22) Data de Depósito: 21/04/2006
(43) Data da Publicação: 25/05/2010
(RPI 2055)

(51) Int.Cl.:
H01B 1/04

(54) Título: **NANOTUBOS COMO INTERCONEXÕES DE FREQÜÊNCIA DE MICROONDA**

(30) Prioridade Unionista: 22/04/2005 US 60/673.955

(73) Titular(es): THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

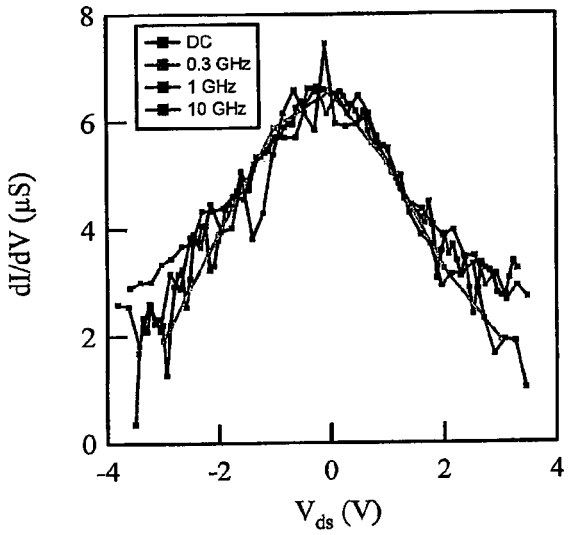
(72) Inventor(es): Peter J. Burke, Zhen Yu

(74) Procurador(es): NELLIE ANNE DANIEL SHORES

(86) Pedido Internacional: PCT US2006015055 de 21/04/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2006/116059de 02/11/2006

(57) Resumo: NANOTUBOS COMO INTERCONEXÕES DE FREQÜÊNCIA DE MICROONDA. A presente invenção fornece interconexões de nanotubo capazes de conduzir corrente em altas freqüências para uso como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta frequência. E mostrado que a condutância dinâmica ou AC de nanotubos de parede única se iguala à sua condutância DC até pelo menos 10 GHz, demonstrando que a capacidade de condução de corrente de interconexões de nanotubo pode ser estendida para dentro do regime de alta frequência (microonda) sem degradação. Assim, interconexões de nanotubo podem ser usadas como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta frequência, por exemplo, circuitos de RF e microonda, e circuitos de nanoescala de alta frequência. Em uma modalidade preferida, as interconexões de nanotubo compreendem nanotubos de parede única (SWNTs) metálicos, embora outros tipos de nanotubos também possam ser usados, por exemplo, nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWNTs), cabos de todos os nanotubos metálicos, e cabos compreendendo misturas de nanotubos semicondutores e metálicos. Aplicações para as interconexões de nanotubo incluem conjunto de circuitos eletrônicos tanto digitais como analógicos.



"NANOTUBOS COMO INTERCONEXÕES DE FREQÜÊNCIA DE MICROONDA"

INFORMAÇÃO DE GOVERNO

Esta invenção foi feita com suporte de governo de acordo com a Concessão número N66001-03-1-8914, concedida pelo Escritório de Pesquisa Naval. O Governo tem certos direitos nesta invenção.

CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção diz respeito a nanotubos e, mais particularmente, ao uso de nanotubos para conduzir correntes e tensões em altas freqüências.

ANTECEDENTES

Nanotubos são comumente feitos de carbono e compreendem folhas de grafita enroladas de forma ininterrupta em cilindros. Os nanotubos podem ser de parede única ou de paredes múltiplas. Nanotubos de parede única (SWNTs) compreendem cilindros únicos e representam quase um ideal de estruturas eletrônicas dimensionais. Nanotubos de paredes múltiplas (MWNTs) compreendem múltiplos cilindros arranjados concentricamente. Dimensões típicas são 1-3 nm para SWNTs e 20-100 nm para MWNTs.

Nanotubos podem ser tanto metálicos como semicondutores dependendo das suas estruturas. Nanotubos metálicos não são com capacidade de controle por porta, significando que as suas condutâncias não mudam com as tensões de porta aplicadas, enquanto que nanotubos semicondutores são com capacidade de controle por porta. As propriedades elétricas dos nanotubos fazem deles candidatos promissores para a rea-

lização de dispositivos eletrônicos de nanoescala menores do que os que podem ser atingidos com as técnicas litográficas atuais.

Transistores de nanotubo são preditos para ser extremamente rápidos, especialmente se os nanotubos puderem ser usados como as interconexões deles mesmos em futuros nanosistemas integrados. As mobilidades extremamente altas encontradas em nanofios e nanotubos semicondutores são importantes para operações de alta velocidade, uma das principais vantagens preditas de dispositivos em geral de nanotubo e nanofio. Os nanotubos também podem ter uma função para reproduzir as interconexões de alta freqüência no longo prazo entre transistores de nanotubo ativos ou no curto prazo entre transistores convencionais em virtude de suas capacidades para grandes densidades de corrente.

Trabalho teórico prognosticou antecipadamente dependência de freqüência significativa na impedância dinâmica de nanotubo na falta de espalhamento e resistência de contato. A origem desta dependência de freqüência predita está no movimento coletivo dos elétrons, que pode ser tal como conceito de plásmons de uma dimensão. Nossa descrição de circuito equivalente mostra que o nanotubo forma uma linha de transmissão quântica, com indutância cinética distribuída e capacitância tanto quântica como geométrica. Na ausência de amortecimento, manter ondas nesta linha de transmissão pode dar origem a freqüências ressonantes na faixa de microonda (1-10 GHz) para comprimentos de nanotubo entre 10 e 100 mm. Também propusemos um modelo de amortecimento para isto, re-

lacionando o amortecimento à resistência dc por unidade de comprimento. Até esta data não existem medições da condutância de freqüência de microonda de um SWNT.

SUMÁRIO

A presente invenção fornece interconexões de nanotubo capazes de conduzir corrente e tensão em altas freqüências para uso como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta freqüência.

É mostrado que a condutância dinâmica ou AC de nanotubos de parede única se iguala à sua condutância DC até pelo menos 10 GHz, demonstrando que a capacidade de condução de corrente de interconexões de nanotubo pode ser estendida para dentro do regime de alta freqüência (microonda) sem degradação. Assim, interconexões de nanotubo podem ser usadas como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta freqüência, por exemplo, circuitos de RF e microonda, e circuitos de nanoescala de alta freqüência. Em uma modalidade preferida, as interconexões de nanotubo compreendem nanotubos de parede única (SWNTs) metálicos, embora outros tipos de nanotubos também possam ser usados, por exemplo, nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWNTs), cabos de todos os nanotubos metálicos, e cabos compreendendo misturas de nanotubos semicondutores e metálicos.

As interconexões de nanotubo são vantajosas em relação às interconexões de cobre usadas atualmente em circuitos integrados. Interconexões de nanotubo têm condutividade muito mais alta do que interconexões de cobre, e não sofrem de espalhamento de superfície, o que pode reduzir adicional-

mente a condutividade das interconexões de cobre já que as dimensões são reduzidas para baixo de 100 nm. A maior condutividade das interconexões de nanotubo, além da sua demonstrada capacidade de condução de corrente de alta freqüência, torna-as vantajosas em relação às interconexões de cobre para aplicações de alta velocidade, incluindo circuitos de nanoescala de alta freqüência.

As mencionadas anteriormente e outras vantagens das modalidades desta invenção estarão aparentes a partir da descrição mais detalhada a seguir quando considerada em conjunto com os desenhos anexos. Pretende-se que as vantagens mencionadas anteriormente possam ser alcançadas separadamente por diferentes aspectos da invenção e que vantagens adicionais desta invenção envolvam várias combinações das vantagens independentes mencionadas acima de maneira tal que benefícios sinérgicos possam ser obtidos de técnicas combinadas.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

A Figura 1 é um gráfico mostrando características de corrente-tensão para um dispositivo A, um nanotubo de parede única (SWNT) com um espaçamento de eletrodo de 1 μm.

A Figura 2 é um gráfico mostrando condutância versus tensão de fonte-dreno para o dispositivo A nas freqüências de DC 0,6 GHz e 10 GHz.

A Figura 3 é um gráfico mostrando características de corrente-tensão para um dispositivo B, um SWNT com um espaçamento de eletrodo de 25 μm.

A Figura 4 é um gráfico mostrando a condutância

versus tensão de fonte-dreno para o dispositivo B nas freqüências de DC 0,3 GHz, 1 GHz e 10 GHz.

DESCRIÇÃO DETALHADA

A presente invenção fornece interconexões de nanotubo capazes de conduzir corrente e tensão em altas freqüências para uso como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta freqüência. A capacidade de condução de corrente e tensão das interconexões de nanotubo em altas freqüências está demonstrada pelas medições indicadas a seguir.

As primeiras medições da condutância de alta freqüência de um nanotubo de parede única (SWNT) estão apresentadas. Descobrimos experimentalmente que a condutância ac é igual à condutância dc até pelo menos 10 GHz. Isto demonstra claramente pela primeira vez que a capacidade de condução de corrente de nanotubos de carbono pode ser estendida sem degradação para dentro do regime de alta freqüência (microonda).

Em nossos resultados experimentais, nem uma marca clara de comportamento de líquido de Tomonaga-Luttinger é observada (na forma de dependência de freqüência não significante) e nem um efeito quântico específico (quantum de reflexão versus condutância clássica de nanotubos) é relatado, em contradição às predições teóricas para condutância ac em sistemas 1d que negligenciam espalhamento[10]. A fim de explicar esta discrepância entre teoria (que negligencia espalhamento) e experimento (que inclui espalhamento realístico), apresentamos um modelo de fenômeno lógico para a condutância de freqüência finita de um nanotubo de carbono que trata es-

palhamento como uma resistência distribuída. Este modelo explica porque nossos resultados nas freqüências ac não exibem dependência de freqüência. Simplesmente colocar amortecimento resistivo remove a dependência de freqüência predita.

SWNTs[13] individuais foram sintetizados por meio de deposição[14,15] de vapor químico em pastilhas de Si p-dopadas de alta resistividade oxidadas (p > 10 kΩ-cm) com uma camada de SiO_2 de 400-500 nm. Eletrodos de metal foram formados nos SWNTs usando litografia de feixe de elétrons e evaporação de metal de camada dupla de 20 nm Cr/100 nm Au. Os dispositivos não foram recozidos. Nanotubos com espaçamento de eletrodo de 1 (dispositivo A) e 25 μm (dispositivo B) foram estudados. Resistências típicas foram de ~MΩ; alguns nanotubos tiveram resistências abaixo de 250 kΩ. Neste estudo focalizamos em SWNTs metálicos (definidos pela ausência de uma resposta de porta) com resistência abaixo de 200 kΩ. Medições foram executadas em temperatura ambiente no ar.

A Figura 1 mostra a característica I-V de temperatura ambiente do dispositivo A, um SWNT com um espaçamento de eletrodo de 1 μm. Uma vez que este comprimento é comparável ao caminho livre médio para elétrons, este dispositivo está no limite quase balístico. A resistência de baixa polarização deste dispositivo foi de 60 kΩ. Esta resistência é muito provavelmente de maneira predominante devido ao contato; em campos baixos, uma vez que os elétrons são injetados o transporte é quase balístico da fonte para o dreno. O dispositivo mostra claramente saturação na corrente em cerca de 20 μA. A inserção mostra que (sobre quase toda a faixa total

de tensão aplicada) a resistência absoluta (V/I) pode ser descrita por uma simples função

$$V/I = R_0 + |V|/I_0 \qquad \text{Equação (1)}$$

onde R_0 e I_0 são constantes, tal como foi originalmente encontrado e explicado por Yao[16]. A partir da inclinação da parte linear da curva R-V, encontramos I_0 = 29 μA para este dispositivo, em boa concordância com Yao[16]. Foi mostrado que o comportamento de saturação é devido a um caminho livre médio modificado para elétrons quando o campo elétrico é suficiente para acelerar elétrons para uma energia grande o suficiente para emitir um fônon ótico. Este efeito foi estudado mais quantitativamente com conclusões similares em[17,18].

A fim de medir a impedância dinâmica em freqüências de microonda, uma sonda de microondas comercialmente disponível (adequada para calibração com um padrão de calibração aberto/baixo/carga comercialmente disponível) permitiu a transição de coaxial para fabricado litograficamente em eletrodos de microplaqueta. A geometria de eletrodo consistiu de duas pequenas almofadas de contato, uma de 50x50 μm^2 e a outra de 200x200 μm^2 (para o dispositivo A) ou de 50x200 μm^2 (para o dispositivo B). Um analisador de rede de microondas é usado para medir o coeficiente de reflexão calibrado (complexo) $S_{11}(\omega) \equiv V_{refletido}/V_{incidente}$, onde $V_{incidente}$ é a amplitude do sinal de microonda incidente no coaxial, e de forma similar para $V_{refletido}$. Este é relacionado à impedância de carga $Z(\omega)$ pela fórmula de reflexão usual: $S_{11} = [Z(\omega)-50\ \Omega]/[Z(\omega)+50\ \Omega]$. Nos níveis de potência usados (3 μW), os re-

sultados são independentes da potência usada.

O erro estatístico na medição tanto de $Re(S_{11})$ como de $Im(S_{11})$ devido ao ruído aleatório no analisador de rede é menor do que 1 parte em 10^4. Uma fonte sistemática de erro na medição devido à variação de contato a contato e à não idealidade no padrão de calibração eleva para um erro de 2 partes em 10^3 na medição de $Re(S_{11})$ e $Im(S_{11})$. Em virtude de a impedância de nanotubo ser assim grande quando comparada com 50 Ω, estes erros serão importantes, tal como discutiremos com mais profundidade a seguir.

Medimos o valor de S_{11} como uma função da freqüência e da tensão de fonte-dreno tanto para dispositivo A como para o B. Embora o valor absoluto de S_{11} a ser encontrado devesse ser 0 ± 0,02 dB sobre a faixa de freqüência estudada (o erro sistemático devido à variação de contato a contato), pequenas mudanças em S_{11} com a tensão de fonte-dreno são sistemáticas, reproduzíveis e bem-resolvidas dentro do erro estatístico de ± 0,0005 dB. A mudança em S_{11} com a tensão de fonte-dreno não é um artefato, uma vez que amostras de controle não exibem este efeito. Nossa medição mostra claramente que o valor de S_{11}, e conseqüentemente a impedância dinâmica de nanotubo, depende da tensão de polarização fonte-dreno dc, e que esta dependência é independente da freqüência sobre a faixa estudada para os dois dispositivos.

Tanto para o dispositivo A como para o B encontramos $Im(S_{11}) = 0,000 \pm 0,002$, indicando que a impedância de nanotubo propriamente dita é predominantemente real. Nosso sistema de medição não é sensível para impedâncias imaginá-

rias muito menores do que a impedância real, que é da ordem de 100 kΩ. Para todas as medições apresentadas aqui, $Im(S_{11})$ não muda com V_{ds} dentro da incerteza estatística de 1 parte em 10^4. Por outro lado, $Re(S_{11})$ muda de modo reproduzível com V_{ds}, indicando que a parte real da impedância dinâmica de nanotubo muda com V_{ds}.

Pela linearidade da relação entre S_{11} e a condutância G, pode ser mostrado que para pequenos valores de G (comparados com 50 Ω), G(mS) é $\approx$1,1 x S_{11}(dB). (Notamos que depois da calibração, um experimento de controle sem nenhum nanotubo dá 0 ± 0,02 dB, onde a incerteza é devida às variações na localização de sonda nas almofadas de contato de contato para contato). Com base neste cálculo, concluímos que o valor absoluto da condutância de alta freqüência medida é para ser encontrado como sendo 0 com um erro de ± 22 μS, o que é consistente com a condutância dc.

A fim de analisar os dados mais quantitativamente, nos concentramos na *mudança* em S_{11} com V_{ds}. O erro de medição na *mudança* na condutância ac G com tensão de polarização depende primariamente da incerteza estatística em S_{11}, a qual em nossos experimentos é 20 vezes menor do que o erro sistemático. (Uma vez que a sonda de contato permanece fixada no lugar ao mesmo tempo que se muda a tensão de porta, podemos medir de modo reproduzível e seguro pequenas mudanças em S_{11} com a tensão de fonte-dreno). Assim, embora o valor absoluto de G somente possa ser medido com uma incerteza de 20 μS, uma mudança em G pode ser medida com uma incerteza de 1 μS. Estas incertezas são um recurso geral de qualquer sistema de

medição de microonda de banda larga.

A Figura 2 traça a condutância G versus a tensão de fonte-dreno para o dispositivo A, em dc 0,6 GHz e 10 GHz. Somente conhecemos a mudança em G com V_{ds}, assim acrescentamos um deslocamento ao G_{ac} para igualar G_{dc} em $V_{ds}=0$. Discutiremos isto com mais detalhes a seguir, mas no momento fica claro que a G em ac muda com V_{ds} exatamente como ela faz em dc. Discutiremos agora o deslocamento.

Com base nos resultados medidos conhecemos o valor absoluto de G que está entre 0 e 22 μS; com base na Figura 2 conhecemos que G muda por 10 μS quando V_{ds} muda por 4 V. A condutância dinâmica provavelmente não é negativa (não existe motivo físico para este ser o caso), o que permite que o seguinte raciocínio seja feito: Desde que $G_{ac}(V_{ds}=0)-G_{ac}(V_{ds}=4V)=10$ μS (medido), e $G_{ac}(V_{ds}=4V)>0$ (em dados físicos), portanto, $G_{ac}(V_{ds}=0V)>10$ μS; nossas medições colocaram este como um limite inferior; o limite superior seria 20 μS. Portanto, nossas medições mostram pela primeira vez que, dentro de 50%, nanotubos podem conduzir correntes e tensões de microonda igualmente de forma eficiente tal como as correntes e tensões dc.

Em virtude de o dispositivo A estar no limite quase balístico, mas não se aproximar do limite inferior teórico de 6 kΩ para contatos perfeitos, a resistência de contato de nanotubo de metal provavelmente predomina na resistência total para esta amostra. A fim de focalizar de forma mais intensa a resistência de nanotubo propriamente dita, voltaremos agora ao dispositivo B.

A Figura 3 traça a curva I-V de um maior SWNT (dispositivo B), com uma folga de eletrodo de 25 μm. (O comprimento original deste nanotubo era acima de 200 μm). Este dispositivo quase certamente não está no limite balístico, mesmo para condução de baixa polarização, uma vez que o caminho livre médio é da ordem de 1 μm[15,17,18] e o comprimento de SWNT é de 25 μm. A resistência de baixa polarização deste dispositivo é 150 kΩ. Medições anteriores em nosso laboratório[15] em SWNTs de 4 mm comprimento deram uma resistência por unidade de comprimento de 6 KΩ/μm, indicando que a resistência de volume de SWNT está em torno de 150 kΩ para o dispositivo B, e que a resistência de contato é pequena quando comparada com a resistência de nanotubo intrínseca. A resistência absoluta (V/I) e a curva I-V de fonte-dreno para este dispositivo é bem descrita pela Equação (1), tal como para o dispositivo A. Encontramos I_0 = 34 μA para este dispositivo, em concordância com o dispositivo A.

A Figura 4 traça a condutância G versus a tensão de fonte-dreno para o dispositivo B, em dc 0,3 GHz, 1 GHz e 10 GHz. Tal como para o dispositivo A, somente conhecemos a mudança em G com V_{ds}, assim acrescentamos um deslocamento à G_{ac} para igualar G_{dc} em V_{ds}=0. Está claro a partir deste gráfico, que a condutância dinâmica de nanotubo muda com a tensão de polarização exatamente tal como a condutância dc muda. Usando raciocínios similares tal como para o dispositivo A, nossas medições para o dispositivo B mostram que a condutância ac e dc são iguais dentro de 50% sobre a faixa de freqüência total estudada.

Agora voltaremos para uma discussão de nossos resultados. Em DC, os efeitos de espalhamento em nanotubos têm sido bem estudados[16-18]. A resistência dc é dada por[19]

$$R_{dc} = (h/4e^2)(L_{nanotubo}/l_{m.f.p.}) \qquad \text{Equação (2)}$$

onde $l_{m.f.p.}$ é o caminho livre médio. Em sistemas balísticos, a resistência de contato de amostra predomina e a resistência dc tem um limite inferior dado por $h/4e^2 = 6$ kΩ, o que é possível somente se injeção de elétrons pelos eletrodos for sem reflexão. A Equação (2) é verdadeira em freqüências finitas? A resposta para esta questão em geral não é conhecida.

Para o simples caso de um nanotubo contatado de forma ôhmica de comprimento L, temos predito que a primeira ressonância ocorreria em uma freqüência dada por $v_F/(4Lg)$, onde v_F é a velocidade de Fermi, L o comprimento e g o "fator g" de líquido de Luttinger, um parâmetro que caracteriza a intensidade da interação elétron-elétron. Tipicamente g é ~0,3. Para L = 25 μm, a primeira ressonância na impedância dependente de freqüência ocorreria em 24 GHz, além da faixa de freqüências estudada aqui. Entretanto, nosso nanotubo para o dispositivo B era originalmente de comprimento acima de 200 μm. Depois da deposição de eletrodos, o nanotubo se estendeu sob os dois eletrodos por uma distância de pelo menos 150 μm em um lado, e por 50 μm no outro. Se estes segmentos do nanotubo permanecessem intactos, corresponderia às ressonâncias de plásmon nas freqüências de 4 e 8 GHz. Não observamos claramente qualquer comportamento ressonante forte nestas ou em quaisquer outras freqüências. Acreditamos que

isto deve ser graças ao amortecimento destes plásmons, tal como discutiremos a seguir.

Embora isto não seja rigorosamente justificado, assumimos que a Equação (2) descreve uma resistência distribuída do nanotubo que é independente de freqüência, igual à resistência dc medida por unidade de comprimento de 6 kΩ/μm de nanotubos de comprimentos similares desenvolvidos em nosso laboratório[15]. Em nosso trabalho[11] de modelagem anterior, descobrimos que (sob tais condições intensas de amortecimento) a impedância dinâmica de nanotubo é predita para ser igual à sua resistência dc para freqüências menores do que $1/(2\pi R_{dc}C_{total})$, onde C_{total} é a capacitância total do nanotubo (quântica e eletrostática). Embora nossas medições apresentadas aqui estejam em cima de um plano de base de condução pobre (alto Si de resistividade), e o trabalho de modelagem anterior tenha sido para um substrato altamente condutor, podemos usar a modelagem como um guia qualitativo. Para o dispositivo B, estimamos C_{total} = 1 fF, de maneira que a impedância ac seria predita para ser igual à resistência dc para freqüências baixas em torno de ~1 GHz. Isto é consistente qualitativamente com o que observamos experimentalmente.

Em altas tensões de polarização, os elétrons têm energia suficiente para emitir fônons óticos, reduzindo dramaticamente o caminho livre médio e modificando a Equação (2) para a Equação (1) mais geral. Nossas medições mostram claramente que a Equação (1) ainda é válida até 10 GHz. Uma explicação teórica para isto é necessária nesta hora, embora

ela seja intuitivamente esperada pelo seguinte motivo: a freqüência de espalhamento de elétron-fônon na região de alta polarização é de aproximadamente 1 THz[18]. Portanto, no tempo-escala do período de campo elétrico, a freqüência de espalhamento é instantânea. Trabalho teórico adicional é necessário para clarificar este ponto.

Medições até freqüências mais altas de ordenar o taxa de espalhamento de elétron-fônon (~50 GHz em baixos campos elétricos[18]) devem permitir que mais informação seja descoberta a respeito de espalhamento de elétron-fônon em nanotubos; medições dependentes de temperatura igualmente levariam em conta mais informação, tal como a impedância de nanotubo intrínseca em baixas taxas de espalhamento.

Portanto, tem sido verificado experimentalmente que a impedância dinâmica de SWNTs metálicos é predominantemente real e a freqüência é independente de dc para pelo menos 10 GHz. Em decorrência disso, a alta capacidade de condução de corrente de SWNTs metálicos não degrada no regime de alta freqüência (microonda), permitindo que SWNTs sejam usados como interconexões de alta velocidade em aplicações de alta velocidade. Na modalidade preferida, as interconexões de nanotubo compreendem SWNTs metálicos, embora outros tipos de nanotubos também possam ser usados, por exemplo, MWNTs, cabos de todos os nanotubos metálicos, e cabos compreendendo misturas de nanotubos semicondutores e metálicos. SWNTs metálicos podem ter uma densidade de corrente muito alta (da ordem de 10^9 A/cm^2). Um SWNT metálico da ordem de 1-3 nm em diâmetro pode conduzir correntes e tensões de até

25 μA ou mais altas.

Portanto, interconexões de nanotubo podem ser usadas como interconexões de alta velocidade em uma variedade de aplicações de alta freqüência. Por exemplo, interconexões de nanotubo podem ser usadas para fornecer interconexões de alta velocidade em processadores de computadores operando em altas freqüências de relógio de 1 GHz ou mais altas. Interconexões de nanotubos também podem ser usadas para fornecer interconexões de alta velocidade em rádio freqüência (RF) e circuitos de microonda operando em freqüências até 10 GHz ou mais altas, tal como em telefones celulares e sistemas de rede sem fio. As interconexões de nanotubo podem ser usadas para interligar dispositivos ativos (por exemplo, transistores), dispositivos passivos, ou uma combinação de dispositivos ativo e passivo em circuitos operando em altas freqüências na faixa de GHz. As interconexões de nanotubo também podem ser usadas para interligar dispositivos de nanoescala para concretizar circuitos de nanotubo completos de alta freqüência. Por exemplo, as interconexões de nanotubo podem ser usadas para interligar transistores de efeito de campo (FETs) de nanotubo, nos quais nanotubos semicondutores são usados para os canais do FETs de nanotubo. As interconexões de nanotubo também podem ser usadas para interligar dispositivos de maior escala, por exemplo, transistores convencionais, para aplicações de alta velocidade ou para interligar uma combinação de dispositivos de nanoescala e de maior escala em um circuito. Uma interconexão de nanotubo pode compreender um único nanotubo ou compreender mais de um nanotu-

bo arranjados em paralelo em um arranjo-N, onde N é o número de nanotubos.

A invenção também fornece um método útil para modelar interconexões de nanotubo em programas de simulação de circuito usados para projetar circuitos de alta freqüência. Em uma modalidade, um programa de simulação de circuito modela a impedância dinâmica de interconexões de nanotubo em circuitos de alta freqüência como sendo igual à sua resistência dc. Em outras palavras, os programas de simulação de circuito assumem que a resistência dc da interconexão de nanotubo predomina em altas freqüências e que a impedância dinâmica não é sensível às impedâncias imaginárias (indutâncias e capacitâncias).

As interconexões de nanotubo são vantajosas em relação às interconexões de cobre usadas atualmente em circuitos integrados. Quando dimensionada pelo diâmetro de 1,5 nm, a resistência por unidade de comprimento de um nanotubo que medimos dá uma condutividade de resistividade de 1 μΩ-cm, que é menor do que aquela de volume do cobre. Além do mais, interconexões de cobre tipicamente sofrem de espalhamento de superfície aumentado à medida que as dimensões são reduzidas para baixo de 100 nm, de maneira que mesmo a condutividade de volume do cobre não é concretizada nessa escala de comprimento. Além do mais, a densidade de corrente de nanotubos de carbono supera aquela do cobre. Assim, por unidade de largura, nanotubos de carbono são materiais superiores ao cobre como interconexões em circuitos integrados.

Nossa descrição de circuito equivalente mostra que

o nanotubo forma uma linha de transmissão quântica, com indutância cinética distribuída e capacitância tanto quântica como geométrica. A indutância cinética para um nanotubo individual está em torno de 4 nH/μm. Numericamente isto dá elevação para uma impedância indutiva de iωL, onde L é a indutância. Entretanto, a resistência por unidade de comprimento está em torno de 6 kΩ/μm. Isto significa que a impedância resistiva predominará sobre a impedância indutiva em freqüências abaixo em cerca de 200 GHz para um nanotubo de parede única. Portanto, durante a consideração das aplicações de nanotubos como interconexões em freqüências de microonda, a resistência deve ser a consideração predominante.

Entretanto, a condutividade de nanotubos é maior do que a do cobre. Arranjar nanotubos leva em conta fiação com menor resistência por unidade de comprimento do que o cobre da mesma área seccional transversal total. Além do mais, a indutância cinética de um arranjo-N de nanotubos é N vezes menor do que a indutância cinética de um nanotubo individual.

Em resumo, para nanotubos resistência é o componente de circuito predominante (como o oposto à indutância), e esta resistência é menor do que a de fios de cobre das mesmas dimensões. Portanto, indutância cinética não é um "entrave" principal para o uso de nanotubos como interconexões. Além do mais, não existe manifestação transversal entre nanotubos devido à indutância cinética. Isto é ao contrário da indutância magnética no cobre, que induz manifestação transversal. Portanto, considerando todos estes fato-

res, nanotubos de carbono são superiores ao cobre em todos os aspectos de desempenho de circuito.

Embora a invenção esteja sujeita a várias modificações e formas alternativas, exemplos específicos da mesma foram mostrados nos desenhos e estão descritos neste documento detalhadamente. Deve ser entendido, entretanto, que a invenção não é para ser limitada às formas ou métodos particulares revelados, mas ao contrário, a invenção é para abranger todas as modificações, equivalências e alternativas que se incluam no espírito e escopo das reivindicações anexas.

REFERÊNCIAS

[1] P. L. McEuen, M. S. Fuhrer, and H. K. Park, "Single-walled carbon nanotube electronics", Ieee T Nanotechnol 1 (1), 78-85 (2002).

[2] M. Bockrath, D. H. Cobden, J. Lu, A. G. Rinzler, R. E. Smalley, T. Balents, and P. L. McEuen, "Luttinger-liquid behaviour in carbon nanotubes", Nature 397 (6720), 598-601 (1999); M.P.A. Fisher and L.I. Glazman, in *Mesoscopic Electron Transport*, edited by Lydia L. Sohn, Leo P. Kouwenhoven, Gerd Schèon et al. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht ; Boston, 1997).

[3] A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom, and H. J. Dai, "Ballistic carbon nanotube field-effect transistors", Nature 424 (6949), 654-657 (2003).

[4] H. W. C. Postma, T. Teepen, Z. Yao, M. Grifoni, and C. Dekker, "Carbon nanotube single-electron transistors at room temperature", Science 293 (5527), 76-79 (2001).

[5] K. Tsukagoshi, B. W. Alphenaar, and H. Ago, "Coherent transport of electron spin in a ferromagnetically contacted carbon nanotube", Nature 401 (6753), 572-574 (1999).

[6] P.J. Burke, "AC Performance of Nanoelectronics: Towards a THz Nanotube Transistor", Solid State Electronics 40 (10), 1981-1986 (2004); S. Li, Z. Yu, S. F. Yen, W. C. Tang, and P. J. Burke, "Carbon nanotube transistor operation at 2.6 GHz", Nano Lett 4 (4), 753-756 (2004).

[7] Y. Cui, Z. H. Zhong, D. L. Wang, W. U. Wang, and C. M. Lieber, "High performance silicon nanowire field effect transistors", Nano Lett 3 (2), 149-152 (2003).

[8] T. Durkop, S. A. Getty, E. Cobas, and M. S. Fuhrer, "Extraordinary mobility in semiconducting carbon nanotubes", Nano Lett 4 (1), 35-39 (2004).

[9] "International Technology Roadmap for Semiconductors, http://public.itrs.net/", (2003).

[10] Y. M. Blanter, F. W. J. Hekking, and M. Buttiker, "Interaction constants and dynamic conductance of a gated wire", Phys Rev Lett 81 (9), 1925-1928 (1998); V. V. Ponomarenko, "Frequency dependences in transport through a Tomonaga-Luttinger liquid wire", Phys Rev B 54 (15), 10328-10331 (1996); V. A. Sablikov and B. S. Shchamkhalova, "Dynamic conductivity of interacting electrons in open mesoscopic structures", Jetp Lett+ 66 (1), 41-46 (1997); G. Cuniberti, M. Sassetti, and B. Kramer, "Transport and elementary excitations of a Luttinger liquid", J Phys-Condens Mat 8 (2), L21-L26 (1996); G. Cuniberti, M. Sassetti, and B. Kramer,

"ac conductance of a quantum wire with electron-electron interactions", Phys Rev B 57 (3), 1515-1526 (1998); I. Safi and H. J. Schulz, "Transport in an inhomogeneous interacting one-dimensional system", Phys Rev B 52 (24), 17040-17043 (1995); V. A. Sablikov and B. S. Shchamkhalova, "Dynamic transport of interacting electrons in a mesoscopic quantum wire", J. Low Temp Phys 118 (5-6), 485-494 (2000); R. Tarkiainen, M. Ahlskog, J. Penttila, L. Roschier, P. Hakonen, M. Paalanen, and E. Sonin, "Multiwalled carbon nanotube: Luttinger versus Fermi liquid", Phys Rev B 64 (19), art. no.-195412 (2001); C. Roland, M. B. Nardelli, J. Wang, and H. Guo, "Dynamic conductance of carbon nanotubes", Phys Rev Lett 84 (13), 2921- 2924 (2000).

[11] P. J. Burke, "An RF Circuit Model for Carbon Nanotubes", Ieee T Nanotechnol 2 (1), 55-58 (2003); P. J. Burke, "Luttinger liquid theory as a model of the gigahertz electrical properties of carbon nanotubes", Ieee T Nanotechnol 1 (3), 129-144 (2002).

[12] P. J. Burke, I. B. Spielman, J. P. Eisenstein, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "High frequency conductivity of the high-mobility two-dimensional electron gas", Appl Phys Lett 76 (6), 745-747 (2000).

[13] M. J. Biercuk, N. Mason, J. Martin, A. Yacoby, and C. M. Marcus, "Anomalous conductance quantization in carbon nanotubes", Phys Rev Lett 94 (2), - (2005); (De forma similar, embora seja possível estarmos medindo pequenos cabos ou tubos de parede dupla, muito provavelmente temos um tubo metálico único. Imagens TEM de nanotubos desenvolvidos

sob condições similares mostraram somente nanotubos de parede única).

[14] J. Kong, H. T. Soh, A. M. Cassell, C. F. Quate, and H. J. Dai, "Synthesis of individual single-walled carbon nanotubes on patterned silicon wafers", Nature 395 (6705), 878-881 (1998); Zhen Yu, Shengdong Li, and P. J. Burke, "Synthesis of Aligned Arrays of Millimeter Long, Straight Single Walled Carbon Nanotubes", Chemistry of Materials 16 (18), 3414-3416 (2004).

[15] Shengdong Li, Zhen Yu, and P. J. Burke, "Electrical properties of 0.4 cm long single walled carbon nanotubes", Nano Lett 4 (10), 2003-2007 (2004).

[16] Z. Yao, C. L. Kane, and C. Dekker, "High-field electrical transport in single-wall carbon nanotubes", Phys Rev Lett 84 (13), 2941-2944 (2000).

[17] A. Javey, J. Guo, M. Paulsson, Q. Wang, D. Mann, M. Lundstrom, and H. J. Dai, "High-field quasiballistic transport in short carbon nanotubes", Phys Rev Lett 92 (10), - (2004).

[18] J. Y. Park, S. Rosenblatt, Y. Yaish, V. Sazonova, H. Ustunel, S. Braig, T. A. Arias, P. W. Brouwer, and P. L. McEuen, "Electron-phonon scattering in metallic single-walled carbon nanotubes", Nano Lett 4 (3), 517-520 (2004).

[19] Supriyo Datta, *Electronic transport in mesoscopic systems*. (Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1995), pp.xv, 377 p.

REIVINDICAÇÕES

1. Circuito de alta freqüência, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

primeiro e segundo dispositivos eletrônicos; e

uma interconexão de nanotubo conectando os primeiro e segundo dispositivos, em que a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em altas freqüências.

2. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o primeiro dispositivo é configurado para enviar sinais elétricos para o segundo dispositivo por meio da interconexão de nanotubo em altas freqüências.

3. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o primeiro dispositivo é configurado para enviar sinais elétricos por meio da interconexão de nanotubo em freqüências de pelo menos 0,8 GHz.

4. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o primeiro dispositivo é configurado para enviar sinais elétricos por meio da interconexão de nanotubo em freqüências de pelo menos 2 GHz.

5. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que cada um dos primeiro e segundo dispositivos compreende um transistor de nanotubo.

6. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a intercone-

xão de nanotubo compreende um nanotubo de carbono de parede única (SWNT) metálico.

7. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 6, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a interconexão de nanotubo compreende mais de um SWNT arranjados em um arranjo em paralelo.

8. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 6, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a interconexão de nanotubo não compreende nanotubos semicondutores.

9. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é 25 μA ou mais alta.

10. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em freqüências de pelo menos 1 MHz a 0,8 GHz.

11. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em freqüências de pelo menos 2 GHz.

12. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em freqüências de pelo menos 5 GHz.

13. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em freqüências de pelo menos 10 GHz.

14. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o circuito é um processador de computador operando em uma freqüência de relógio de pelo menos 1 GHz e a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em freqüências de pelo menos 1 GHz.

15. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o circuito é um processador de computador operando em uma freqüência de relógio de pelo menos 2 GHz e a interconexão de nanotubo é capaz de conduzir corrente em freqüências de pelo menos 2 GHz.

16. Circuito de alta freqüência, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o circuito é um circuito de rádio freqüência (RF) operando em uma alta freqüência de pelo menos 0,8 GHz.

17. Método, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende as etapas de:

acoplar uma fonte de energia a um circuito de alta freqüência tendo interconexões de nanotubo, e

conduzir corrente através das interconexões de nanotubo em altas freqüências.

18. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que as interconexões de nanotubo interconectam transistores de nanotubo.

19. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que as interconexões de nanotubo compreendem nanotubos de carbono de parede única (SWNTs) me-

tálicos.

20. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que as interconexões de nanotubo não compreendem nanotubos semicondutores.

21. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é 25 μA ou mais alta.

22. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é em uma freqüência de pelo menos 1 MHz a 0,8 GHz.

23. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é em uma freqüência de pelo menos 2 GHz.

24. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é em uma freqüência de pelo menos 5 GHz.

25. Método, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é em uma freqüência de pelo menos 10 GHz.

26. Programa de computador armazenado em uma mídia de armazenamento para simular um circuito de alta freqüência tendo interconexões de nanotubo, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

uma instrução para simular impedâncias dinâmicas das interconexões de nanotubo por configurar a impedância dinâmica de cada interconexão de nanotubo substancialmente igual a uma resistência dc da respectiva interconexão de nanotubo; e

uma instrução para simular corrente através das interconexões de nanotubo em altas freqüências com base nas impedâncias dinâmicas simuladas das interconexões de nanotubo.

27. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 26, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é simulada em uma freqüência de pelo menos 0,8 GHz.

28. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 27, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é simulada em uma freqüência de pelo menos 2 GHz.

29. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 27, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a corrente é simulada em uma freqüência de pelo menos 10 GHz.

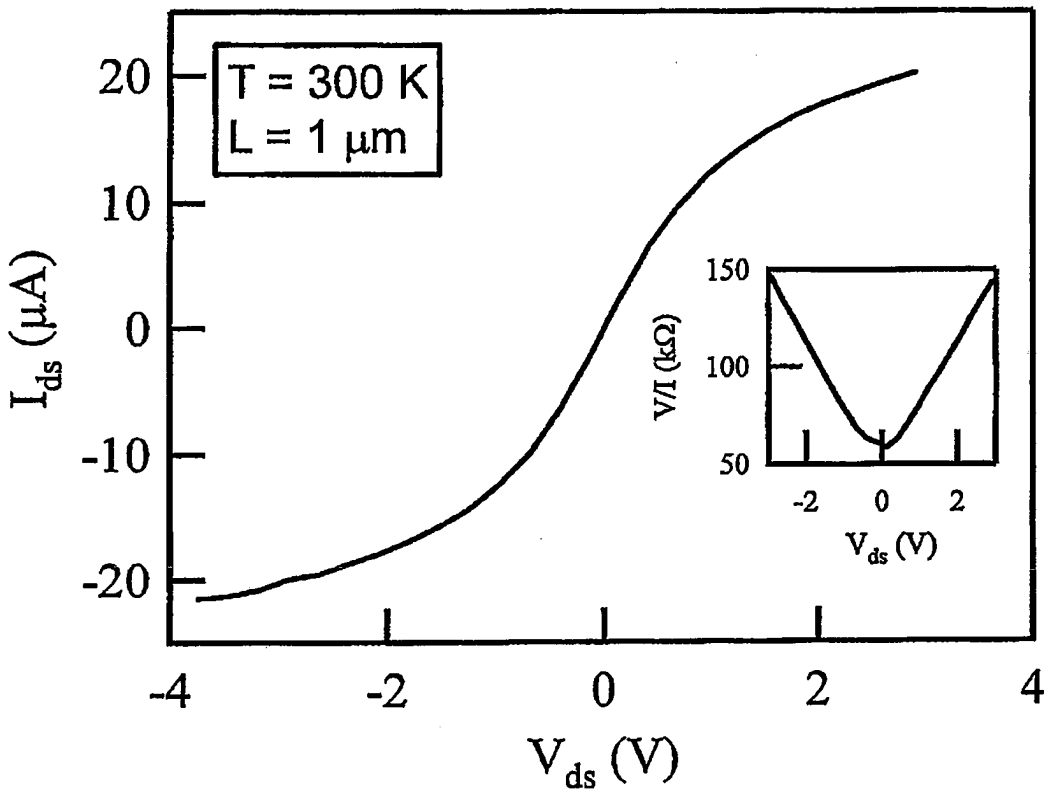

T = 300 K
L = 1 μm
20
10
0
-10
-20
I_{ds} (μA)
-4
-2
0
2
4
V_{ds} (V)
150
100
50
V/I (kΩ)
-2
0
2
V_{ds} (V)

FIG. 1

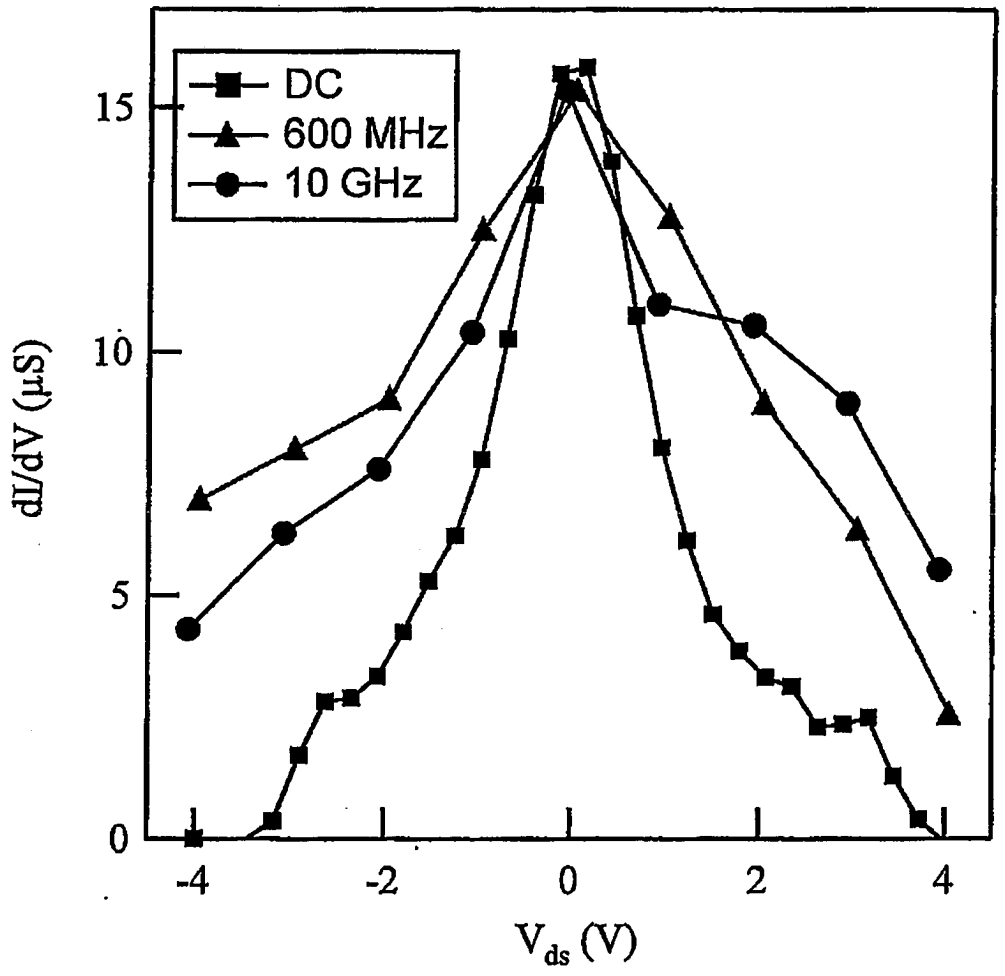


FIG. 2

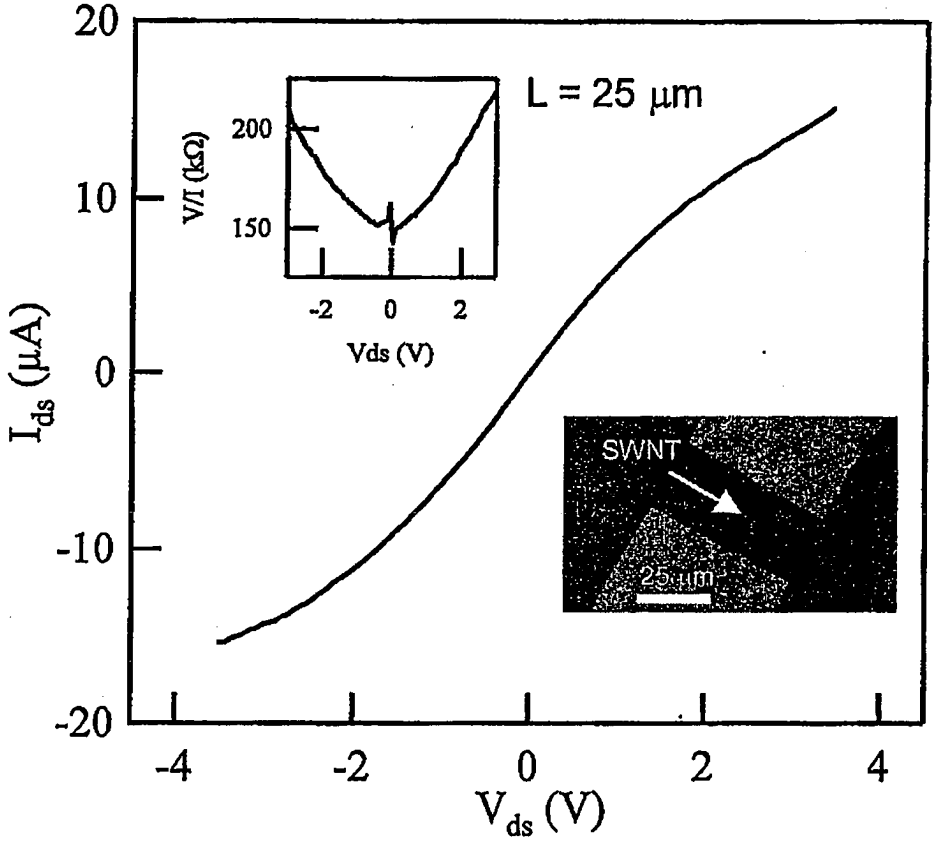

20
10
0
-10
-20
-4
-2
0
2
4
I_{ds} (μA)
V_{ds} (V)
L = 25 μm
V/I (kΩ)
200
150
-2
0
2
Vds (V)
SWNT
25 μm

FIG. 3

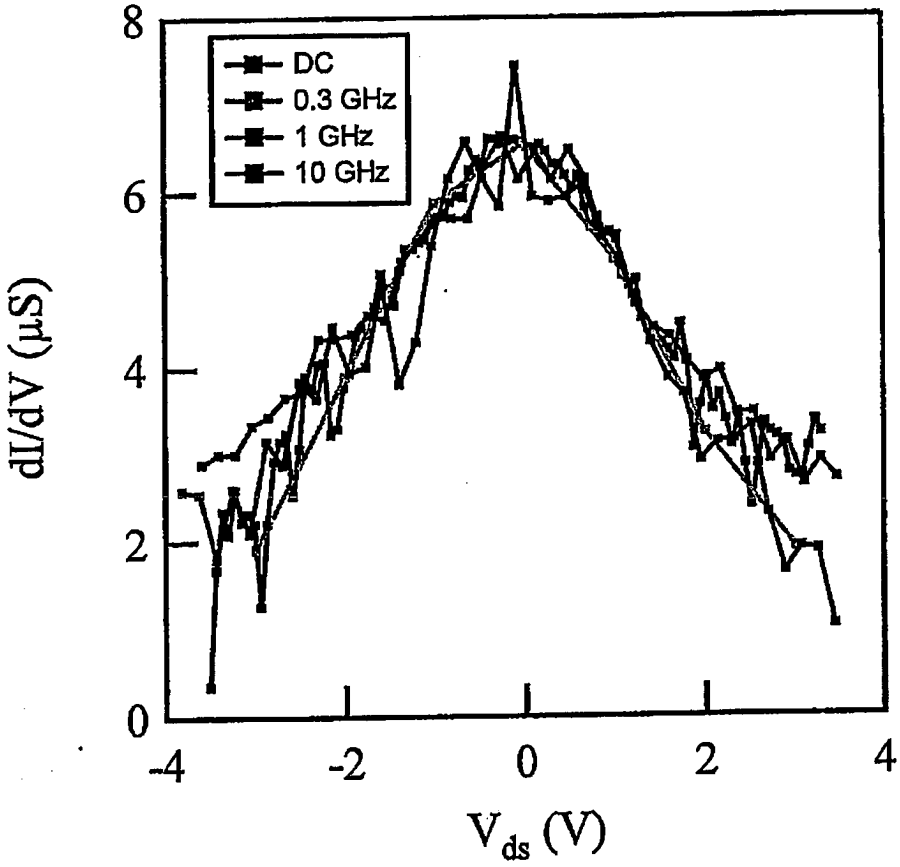


FIG. 4

PI 0610076-7

RESUMO

"NANOTUBOS COMO INTERCONEXÕES DE FREQÜÊNCIA DE MICROONDA"

A presente invenção fornece interconexões de nanotubo capazes de conduzir corrente em altas freqüências para uso como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta freqüência. É mostrado que a condutância dinâmica ou AC de nanotubos de parede única se iguala à sua condutância DC até pelo menos 10 GHz, demonstrando que a capacidade de condução de corrente de interconexões de nanotubo pode ser estendida para dentro do regime de alta freqüência (microonda) sem degradação. Assim, interconexões de nanotubo podem ser usadas como interconexões de alta velocidade em circuitos de alta freqüência, por exemplo, circuitos de RF e microonda, e circuitos de nanoescala de alta freqüência. Em uma modalidade preferida, as interconexões de nanotubo compreendem nanotubos de parede única (SWNTs) metálicos, embora outros tipos de nanotubos também possam ser usados, por exemplo, nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWNTs), cabos de todos os nanotubos metálicos, e cabos compreendendo misturas de nanotubos semicondutores e metálicos. Aplicações para as interconexões de nanotubo incluem conjunto de circuitos eletrônicos tanto digitais como analógicos.