

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4225716号  
(P4225716)

(45) 発行日 平成21年2月18日(2009.2.18)

(24) 登録日 平成20年12月5日(2008.12.5)

(51) Int. Cl.	F I		
HO 1 L 29/78 (2006.01)	HO 1 L 29/78	3 O 1 X	
HO 1 L 29/06 (2006.01)	HO 1 L 29/78	6 5 3 B	
HO 1 L 29/786 (2006.01)	HO 1 L 29/06	6 O 1 N	
	HO 1 L 29/78	6 1 8 B	

請求項の数 10 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2001-275089 (P2001-275089)	(73) 特許権者	000005223
(22) 出願日	平成13年9月11日 (2001.9.11)		富士通株式会社
(65) 公開番号	特開2003-86796 (P2003-86796A)		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(43) 公開日	平成15年3月20日 (2003.3.20)	(74) 代理人	100077517
審査請求日	平成16年8月24日 (2004.8.24)		弁理士 石田 敬
		(74) 代理人	100086276
			弁理士 吉田 維夫
		(74) 代理人	100092624
			弁理士 鶴田 準一
		(74) 代理人	100082898
			弁理士 西山 雅也
		(74) 代理人	100081330
			弁理士 樋口 外治

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 円筒状多層構造体による半導体装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

炭素元素から構成される円筒状の多層構造体であって内側の円筒体が半導体的性質を有し、外側の円筒体が金属的性質を有する多層構造体を含み、且つ、外側円筒体に直接又は絶縁物を介して接続する導電体を有するとともに、外側円筒体が2箇所以上で分断されていることを特徴とする半導体装置。

【請求項 2】

炭素元素から構成される円筒状の多層構造体であって内側の円筒体が半導体的性質を有し、外側の円筒体が金属的性質を有する多層構造体と、内側円筒体の両端に接続する導電体と、外側円筒体に直接又は絶縁物を介して接続する導電体とを有することを特徴とする、請求項 1 記載の半導体装置。

【請求項 3】

分断された両端部の外側円筒体にはオーム性電極がそれぞれ接触し、且つ、分断された中間の外側円筒体には整流性電極が接触している、請求項 1 又は 2 記載の半導体装置。

【請求項 4】

前記整流性電極が前記外側円筒体に直接接触している、請求項 3 記載の半導体装置。

【請求項 5】

前記整流性電極が前記外側円筒体に絶縁材料を介し間接的に接触している、請求項 3 記載の半導体装置。

【請求項 6】

前記整流性電極の前記分断された両端部の外側円筒体に面する側面に絶縁材料の側壁が設けられている、請求項 5 記載の半導体装置。

【請求項 7】

前記整流性電極の接触する連続の外側円筒体の長さが電子の平均自由行程以下である、請求項 3 から 6 までのいずれか一つに記載の半導体装置。

【請求項 8】

前記多層構造体の長手方向軸が、それが配置される基板面と平行である、請求項 1 から 7 までのいずれか一つに記載の半導体装置。

【請求項 9】

前記多層構造体の長手方向軸が、それが配置される基板面に対して垂直である、請求項 1 から 7 までのいずれか一つに記載の半導体装置。

10

【請求項 10】

前記多層構造体を複数含み、それらが外側円筒体どうしの接触によりバンドルを形成している、請求項 1 から 9 までのいずれか一つに記載の半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は半導体装置に関し、より詳しく言えば、新しい材料であるカーボンナノチューブに代表される円筒状多層構造体を利用した新しいタイプの半導体装置に関する。

【0002】

20

【従来の技術】

トランジスタは、その発明以来、様々な改良を加えられて進歩を遂げてきた。ソース及びドレインの二つの領域間に位置するチャンネル領域をキャリアの流れる電流経路とし、その電気抵抗をゲート電極の電圧により変化させて、それによりチャンネル領域を流れる電流を制御する電界効果トランジスタについて言えば、より高速・高周波動作のため、ゲート（ゲート長）の微細化やチャンネル材料の高キャリア移動度化が図られてきた。ゲートの微細化はすでに 10 nm 級に達し、それに伴い、リソグラフィのゆらぎによる加工精度の問題や、トランジスタのオフ電流増加（ショートチャンネル効果）、オン電流飽和、ゲート漏れ電流増加など、多くの課題が顕在化してきている。ゲート絶縁膜の高誘電率化が、これらのうちのいくつかを解決する有力手段として検討されている。一方、トランジスタのゲート構造自身を現在のプレーナ型から 3次元構造（例えば、サラウンドゲート構造と呼ばれるもの）にすることでゲートの電流制御能力を高めるアプローチも考えられている。

30

【0003】

サラウンドゲート構造とは、図 1 に示すように、半導体チャンネル層（この例では p 型半導体層）1 を同軸ケーブルのように外側からゲート電極 2 が囲むような構造で、ゲートからのびる電気力線がチャンネルの外に逃げだすことがないため、プレーナ型に比べて電流制御効率がよく、ショートチャンネル効果の抑制が期待できる。図 1 の半導体装置において、3 はソース電極、4 はドレイン電極であり、5 はソース電極 3 とチャンネル 1 とを接続するための、半導体基板 9 に埋め込まれた高濃度の n 型半導体層、6 はドレイン電極 4 とチャンネル 1 とを接続するための高濃度 n 型半導体層、そして 7 は絶縁材料である。

40

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、サラウンドゲート構造では、基板面から上方にのびる円筒状の半導体層が必要であり、その加工が難しいことから、トランジスタのしきい値電圧（トランジスタを流れる電流をオフするためのゲート電圧）が個々のトランジスタによってゆらぎやすく、またドーピングによる不純物濃度の制御が難しいなど、残された課題は多い。

【0005】

この例を始めとして、微細化の特に進んだ従来の電界効果トランジスタは様々な課題を抱えており、諸特性に優れたものは実現されるに至ってはいない。

【0006】

50

そこで、本発明は、これまでにない新しいタイプの半導体装置であり、特にショートチャネル効果の抑制に有効で、且つ、高速動作、高周波動作、そして高電流駆動能力等を可能にする半導体装置の提供を目的とするものである。

【0007】

【課題を解決するための手段】

本発明の半導体装置は、炭素元素から構成される円筒状の多層構造体であって内側の円筒体が半導体的性質を有し、外側の円筒体が金属的性質を有する多層構造体を含み、且つ、外側円筒体に直接又は絶縁物を介して接続する導電体を有するとともに、外側円筒体が2箇所以上で分断されていることを特徴とする半導体装置である。

【0008】

より具体的に言えば、本発明の半導体装置は、炭素元素から構成される円筒状の多層構造体であって内側の円筒体が半導体的性質を有し、外側の円筒体が金属的性質を有する多層構造体と、内側円筒体の両端に接続する導電体と、外側円筒体に直接又は絶縁物を介して接続する導電体とを有することを特徴とする半導体装置である。

【0009】

本発明の半導体装置の基本構成は上記の通りであり、それには以下において詳しく説明するように種々の態様が考えられる。

【0010】

【発明の実施の形態】

本発明では、半導体装置における少なくとも一部の半導体材料及び金属材料として、自己組織化によるナノ構造体であって炭素元素から構成される円筒状の構造体を使用する。このような構造体としては、一般にカーボンナノチューブとして知られているものが挙げられる。本発明において使用することができる炭素元素から構成される円筒状構造体（これを以下では「カーボンナノチューブ」として説明する）は、内側に半導体的性質を有する円筒体あるいはチューブが位置し、外側に金属的性質を有する円筒体あるいはチューブが存在する多層構造体である。

【0011】

カーボンナノチューブは、その独特の特性から最近注目を浴びている新しい炭素系材料である。カーボンナノチューブは、炭素原子が  $sp^2$  という最も強い結合で6員環状に組み上げられたグラファイトシートを筒状に丸めた構造を持ち、チューブの先端は5員環を含むいくつかの6員環で閉じられている。チューブの直径はサブナノメートルのオーダーまで微細化でき、最小で0.4ナノメートルである。チューブの長さは、現在のところ数10  $\mu m$  に達するものまで製作可能である。

【0012】

カーボンナノチューブには、金属的な性質を示すための条件を満たすバンド構造を取るものと、半導体的（半金属的）な性質を示すための条件を満たすバンド構造を取るものがある。カーボンナノチューブが金属的性質を示すか半導体的性質を示すかには、カーボンナノチューブのカイラリティ（チューブのネジレ方、あるいはグラファイトシートの巻き方）が関与している。図2（a）は、金属的性質を示すナノチューブのカイラリティ（アームチェア型と呼ばれる）を示しており、図2（b）は、半導体的性質を示すもの（ジグザグ型と呼ばれる）を示している。図2（c）に示した構造はカイラル型として知られるものであり、この場合には、条件により金属的性質を示すことと半導体的性質を示すことがある。カーボンナノチューブのカイラリティは、その製作方法や製作条件などに左右される。

【0013】

カーボンナノチューブは、その構造が自己組織化によってできあがることから、1本のチューブの径は通常一定である。また、チューブの中に別のチューブが入った多層ナノチューブも得ることができ、それぞれのチューブのカイラリティは異なるものが多い。この特性を利用して、内側のチューブが半導体的性質を有し、外側のチューブが金属的性質を有する多層構造体を得ることが可能である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 4 】

この材料は今まさにその物性が研究されているが、上述のとおりカイラリティによって電気伝導率が半導体的にも金属的にもなること以外に、既にダイヤモンド以上の熱伝導率や、電流密度が1平方センチメートル当たり $10^6$ アンペアまで流せること、ヤング率が高いこと、水素などの吸蔵効率が高い可能性があるなど、魅力的な物性を備えていることが報告されている。

## 【 0 0 1 5 】

カーボンナノチューブの作製には、従来はアーク放電やレーザーアブレーションが用いられてきたが、最近の研究でプラズマCVDや熱CVDによっても作製可能との報告がある。アーク放電などによる方法は高純度のナノチューブの生産を可能にする方法ではあるが、半導体装置の製造には不向きである一方、CVDによる方法は、半導体装置への応用にとって有効なものと言える。

10

## 【 0 0 1 6 】

本発明では、このカーボンナノチューブを微細トランジスタのチャンネル及びゲートに適用することを特徴としている。

その基本的な構成の態様を図3に示す。この図の半導体装置10は、カーボンナノチューブの多層構造体12を含み、これは内側のチューブ14と外側のチューブ16から構成され、内側チューブ14は半導体的性質を有し、外側チューブ16は金属的性質を有する。内側チューブ14と外側チューブ16のそれぞれは、同じ性質（半導体的性質又は金属的性質）のチューブを複数含む多層構造を備えることもできる。これらのチューブはおのこの、図2に例示したように炭素元素の編み目構造体により形成されているが、図3（及び以下の説明で参照する図）では、簡単にするため単純な円筒状として表されている。

20

## 【 0 0 1 7 】

図3の半導体装置10は更に、内側チューブ14の先端14a、14bに接続する導電体18、20と、外側チューブに電圧を印加する手段22を含む。この半導体装置10では、半導体的性質を示す内側チューブ14と金属的性質を示す外側チューブ16とが半導体-金属接合を形成しており、従って内側チューブ14がトランジスタのチャンネルとして働き、そして外側チューブ16がゲートとして働くことができる。この場合、例えば導電体18から、半導体的性質の内側チューブ14を通して導電体20へと流れる電流を、外部から電圧印加手段22により印加される電圧に応じて制御することができる。内側チューブ14の先端14a、14bは、図3では外側チューブ16の両端16a、16bから伸び出しているが、導電体18、20と接合するのにそれらの導電体が金属的性質の外側チューブ16と接触しない限りは、外側チューブの両端16a、16bと同じ面に位置しても差し支えない。

30

## 【 0 0 1 8 】

この半導体装置10においては、チャンネルに相当する内側チューブ14をゲートに相当する外側チューブ16が取り囲んでおり、この構造は図1に示したサラウンドゲート構造になっていることが分かる。この半導体装置10では、外側のナノチューブ16に正の電圧を加えることで内側ナノチューブ14内の正孔密度が減少して、チャンネルを流れる電流が減少する。そしてこの構造は、ゲートからのびる電気力線がチャンネルの外に逃げだすことがないことから、ショートチャンネル効果の抑制に特に有効であり、良好なオフ特性をもたらすことができる。

40

## 【 0 0 1 9 】

導電体18、20は、内側チューブ14と電氣的に接続することができる限り、どのような材料のものでもよい。例えば、プローブ状に加工した金属でよく、あるいは金属的性質を示すカーボンナノチューブでもよい。内側チューブ14との接続の仕方も、図3に示したような内側チューブの先端14a、14bと導電体18、20の先端どうしの接合に限らない。例えば、外側チューブの両端16a、16bの外側に伸び出して露出された内側チューブ14の側面に導電体18、20を接続してもよい。後に説明する態様におけるように、多層カーボンナノチューブの外側チューブを分断し、分断した外側チューブのうち

50

のゲートとして働くものに直接接触しないものを、導電体 18、20として用いることも可能である。

【0020】

外側チューブ 16 に電圧を印加する手段 22 は、一般に導電体でよい。この電圧印加手段 22 は、図 3 に模式的に示したように外側チューブ 16 に直接つないでもよく、あるいは外側チューブ 16 と電圧印加手段 22 との間に挿入した絶縁物（図示せず）を介して外側チューブ 16 に電圧を印加するようにしてもよい。

【0021】

次に、本発明のもう一つの態様の半導体装置を説明する。図 4 (a) の平面図及び図 4 (b) の断面図に示したように、この態様の半導体装置は、多層構造のカーボンナノチューブ 32 のうちの 2 箇所に、電気的性質の外側チューブがなく半導体的性質の内側チューブ 34 だけが存在する部分があり、それによりこの半導体装置は、ソース領域 S、ドレイン領域 D、及びチャンネル領域 C に電気的に絶縁・分離されている。ソース領域 S では、金属的性質の外側チューブ 36 S にオーム性電極としてのソース電極 38 がオーミック接続しており、ドレイン領域 D では、やはり外側チューブ 36 D にオーム性電極としてのドレイン電極 40 がオーミック接続している。一方、チャンネル領域 C においては、金属的性質の外側チューブ 36 C に整流性電極としてのゲート電極 42 が接続（この接続自体はオーミック接続）して、それによりゲートを構成しており、そしてこのゲートと内側チューブ 36 C との整流性の接触によりチャンネル領域 C の内側チューブ 34 を通過する電流を制御している。このように、この半導体装置もサラウンドゲート構造になっており、従ってやはり良好なオフ特性を有する。また、この半導体装置は、金属と半導体とのショットキー接合をゲートに用いる電界効果トランジスタに相当するものであり、そのため特に、高周波動作の半導体装置として利用するのに好適である。

【0022】

ソース電極 38、ドレイン電極 40 は、一般に、低コンタクト抵抗を得るために Ni、Ti、Pt、Pt-Au 合金などの金属材料から形成することができる。一方、ゲート電極 42 は、Al や W 等の金属材料、又は多結晶シリコンなどから形成することができる。ソース電極 38、ドレイン電極 40、及びゲート電極 42 は、図 4 (a) 及び 4 (b) においてはカーボンナノチューブ 32 の外側チューブ 36 S、36 D、36 C の側面の全長と接触するように描かれているが、それらの一部と接触するようにすることもできる。

【0023】

図 4 (b) によりはっきりと示したように、カーボンナノチューブ 32 は一般に任意の絶縁体層 44 上に配置される。絶縁体層 44 は絶縁材料の単一基板であってもよく、あるいは別の材料の基板 46 上に設けた絶縁材料層であってもよい。また、伝導率の低い半導体層でもよい。

【0024】

本発明の更にもう一つの態様の半導体装置を、図 4 (b) と同様の断面図の図 5 を参照して説明する。図 5 において、図 4 (a) 及び 4 (b) で説明した部材と同じものはそれらと同じ番号で表示されており、それらについての説明は重複を避けるため省くことにする。

【0025】

図 5 に示した半導体装置では、ゲート電極 42 とチャンネル領域 C の外側チューブ 36 C との間、及びゲート電極 42 の側面に沿って、絶縁体 52 が配置されている。これを除けば、この半導体装置は図 4 (a) 及び 4 (b) で説明したものと同様である。この構造の半導体装置では、ソース-ゲート間、ゲート-ドレイン間に絶縁体 52 が挿入されることから、ゲート容量を低下させることができる。そのため、この半導体装置は高速スイッチング動作、高集積用に特に好適である。

【0026】

本発明の別の態様を、図 6 (a) の平面図と図 6 (b) の断面図に示す。先に説明したいずれの態様でも、カーボンナノチューブ 32 の長手方向軸は基板 46 の面と平行であった

10

20

30

40

50

のに対し、これから説明する態様では、カーボンナノチューブの長手方向軸は基板面に対して垂直になっており、この態様の半導体装置は豎型の半導体装置となっている。

【0027】

図6(a)及び6(b)において、下方のソース電極62と上方のドレイン電極64との間に、複数のカーボンナノチューブ66が垂直方向に配列されている。これらのカーボンナノチューブ66は先に説明した多層構造のものであり、金属的性質の外側チューブ68は2箇所切断・分離されて、半導体的性質の内側チューブ70を露出させている。中央の外側チューブの残された部分(チャンネル領域に相当する)に隣接して、ゲート電極72が配置されている。図6(a)と6(b)に示されたそのほかの部分は、絶縁材料で形成されている。なお、図に示した半導体装置ではナノチューブ66とゲート電極72との間に絶縁材料が存在しているが、ゲート電極72は、先に説明したように、多層構造のナノチューブの外側チューブと接触することもできる。

10

【0028】

図6(a)及び6(b)に示した半導体装置には、多層構造のカーボンナノチューブ66が複数含まれていて、図6(a)に模式的に示したバンドル(束)76を形成している。この半導体装置における多層構造のカーボンナノチューブは、1本であってもよいが、図に示したように複数のチューブのバンドルを利用することによって、次に説明する特別な利点を得られる。カーボンナノチューブのバンドルを有する半導体装置では、チャンネル部分の複数の多層ナノチューブのバンドルでも、外側の金属的性質のナノチューブ68が残されているため、ゲートの電位はこれら金属面が互いに接触することで等電位に維持されている。通常チャンネルの直径を太くするとしきい値電圧が高くなってしまいが、この半導体装置では、各チューブごとにゲート(金属的性質の外側チューブ)が巻きついているため、チューブ直径が均一であれば、しきい値電圧はチューブ本数によらず変化しないという特長がある。従って、チャンネルとなるナノチューブを複数本束ねることによって、より多くの電流を流せるようになり、電流駆動能力が更に高くなる。

20

【0029】

次に、先に示した半導体装置の製造を説明することにする。

図4(a)と4(b)で説明した半導体装置は、例えば次のようにして製造することができる。図7(a)に示したように、n型シリコン基板102の表面にシリコン酸化膜104を100nm堆積し、そしてその上にカーボンナノチューブを配置し、レジストパターン(図示せず)を利用してカーボンナノチューブの露出した両端部分を酸素プラズマアッシングし、レジストパターンを除去して、必要な長さのカーボンナノチューブ106を用意する。次に、図7(b)に示したように、基板102上のナノチューブ106をフラーレン(C60)含有雰囲気さらして、フラーレン108をナノチューブ106の強い吸引力によりその内部に注入し、いわゆるピーポッドを作製する。このピーポッド構造のカーボンナノチューブ106(図7(b))を1200℃でアニールすることにより、多層カーボンナノチューブ110(図7(c))を作製する。

30

【0030】

次に、多層ナノチューブ110及びその下層の酸化膜104を覆って、ソース・ドレイン電極用の開口部を備えたレジストパターン(図示せず)を形成し、ソース・ドレイン電極用の金属としてPt-Au合金を蒸着後、リフトオフによりレジストパターン開口部以外の金属を除去し、ソース電極112及びドレイン電極114を形成する(図8(a))。ナノチューブ110の中央部分に開口を持つレジストパターン(図示せず)を使ってゲート金属(W)を堆積させ、同様にリフトオフによりゲート電極116(図8(b))を形成する。次いで、金属電極112、114、116をマスクに酸素プラズマエッチングを所定の時間行い、露出された多層ナノチューブ110の外側チューブだけを除去し、先に図4(a)と4(b)を参照して説明した構造の半導体装置100を得る(図8(c))。

40

【0031】

外側チューブの除去は、上で説明した酸素プラズマエッチングを利用する方法のほかの方

50

法で行うこともできる。例えば、図 8 ( b ) に示したようにソース、ドレイン、ゲート電極 1 1 2、1 1 4、1 1 6 を形成した段階で、ゲート - ソース間及びゲート - ドレイン間にそれぞれ電流を通じることにより、外側チューブだけを除去することが可能である。この場合、金属的性質を示す外側チューブの方が半導体的性質で抵抗の高い内側チューブより電流が流れやすいことから、電極金属に覆われていない部分の外側チューブを構成している炭素が先に消失して、内側チューブだけを残すことができる。

#### 【 0 0 3 2 】

図 7 ( c ) で説明した多層ナノチューブ 1 1 0 の作製後に、多層ナノチューブ 1 1 0 及びその下層の酸化膜 1 0 4 を覆う絶縁膜 ( シリコン窒化膜あるいは酸化膜 ) ( 図示せず ) を形成することにより、図 8 ( c ) の半導体装置 1 0 0 においてゲート電極 1 1 6 とその下のナノチューブ 1 1 0 との間に絶縁膜を備えた半導体装置を製造することも可能である。その製造方法は次のとおりである。

10

#### 【 0 0 3 3 】

図 9 ( a ) に示したように、多層ナノチューブ 1 1 0 及びその下層の酸化膜 1 0 4 を覆うシリコン窒化膜 1 2 2 ( あるいはシリコン酸化膜でもよい ) を 2 nm 形成する。次に、窒化膜 1 2 2 上にレジストパターン ( 図示せず ) を形成し、窒化膜 1 2 2 をエッチングして、図 9 ( b ) に示したようにナノチューブ 1 1 0 の両端が露出するように絶縁膜 1 2 4 を残す。続いて、先に図 8 ( a ) ~ 8 ( c ) を参照して説明したのと同様に、ソース電極 1 1 2、ドレイン電極 1 1 4 を形成し、更に絶縁膜 1 2 4 の上にゲート電極 1 1 6 を形成し ( 図 9 ( c ) )、そして露出部分の絶縁膜 1 2 4 をエッチング後、酸素プラズマアッシングによりナノチューブ 1 1 0 の外側チューブを除去して、図 9 ( d ) に示したとおりのゲート絶縁膜 1 2 6 を備えた半導体装置 1 0 0 ' を得る。

20

#### 【 0 0 3 4 】

図 5 に図示したゲート電極の側面に絶縁材料の側壁を備えた半導体装置は、次のように製造することができる。

図 9 ( c ) に示した絶縁膜 1 2 4 上のゲート電極 1 1 6 の形成までの工程を終えてから、100 nm のシリコン窒化膜 ( 図示せず ) の形成とエッチングを行うことにより、図 1 0 ( a ) に示したように、ゲート電極 1 1 6 の側面に窒化物の側壁 1 3 2 を形成する ( このとき、ナノチューブ 1 1 0 上の露出されていた窒化膜 1 2 4 ( 図 9 ( c ) ) も一緒にエッチングされる )。続いて、金属電極 1 1 2、1 1 4、1 1 6 と窒化物の側壁 1 3 2 をマスクに酸素プラズマエッチングを所定の時間行い、露出された多層ナノチューブ 1 1 0 の外側チューブだけを除去して、先に図 5 を参照して説明したとおりの構造の半導体装置 1 0 0 " を得る ( 図 1 0 ( b ) )。

30

#### 【 0 0 3 5 】

次に、先に図 6 ( a ) と 6 ( b ) を参照して説明した縦型構造の半導体装置の製造を説明する。

図 1 1 ( a ) に示したように、As イオンを注入して p<sup>+</sup>領域 2 0 4 を形成した n 型シリコン基板 2 0 2 上に、シリコン窒化膜 ( 5 0 nm ) 2 0 6、シリコン酸化膜 ( 5 0 nm ) 2 0 8、ポリシリコンゲート金属膜 ( 2 0 nm ) 2 1 0、シリコン酸化膜 ( 5 0 nm ) 2 1 2、及びシリコン窒化膜 ( 5 0 nm ) 2 1 4 を順次形成する。次に、レジストパターン ( 図示せず ) を形成してから、それをマスクに各膜 2 1 4、2 1 2、2 1 0、2 0 8 及び 2 0 6 を順次選択エッチングして、図 1 1 ( b ) に示したように底部に p<sup>+</sup>領域 2 0 4 の露出した開口 2 1 6 を形成し、続いて Ni ( あるいは Fe、もしくは Co ) を全面に堆積させてから、リフトオフ法により開口 2 1 6 底部のみに 1 ~ 1 0 nm の金属膜 ( 図示せず ) を残す。この金属膜の Ni を触媒として、CVD により開口 2 1 6 内にカーボンナノチューブ 2 2 0 ( 図 1 1 ( c ) ) を垂直方向に成長させ、酸素プラズマ処理によりナノチューブ 2 2 0 の先端を除去する。CVD 成長法としてプラズマ CVD を用いた場合には、Ar スパッタリング法で触媒金属を除去する。熱 CVD の場合には、触媒は膜 2 1 0 底部に残るので、この工程は不要となる。次いで、先に説明したようにフラーレン含有雰囲気処理してナノチューブ内にフラーレン ( 図示せず ) を注入してピーボッドを作製し、アニ

40

50

ール処理して複数の多層ナノチューブ220a(図12(a))を形成する。次に、TiSiでドレイン電極用の金属膜(図示せず)を形成し、レジストパターン(図示せず)を使ってこれをエッチングして、図12(a)に示したドレイン電極222を形成する。

【0036】

続いて、図12(b)に示したように、ドレイン電極222をマスクに窒化膜214(図12(a))を異方性エッチングし、更にこのエッチングした窒化膜214'の下の酸化膜を等方性エッチングで除去する。次いで、図12(c)に示したように、ゲート金属膜210(図12(b))を異方性ドライエッチングしてゲート電極224を形成し、このゲート電極224の下の酸化膜を等方性エッチングして除去する。酸化膜の除去により露出された多層カーボンナノチューブ220a(図12(c))を酸素プラズマ処理して、露出部分の外側チューブだけを除去し、図13(a)に図示したように半導体的性質の内側ナノチューブ226を露出させる。

10

【0037】

続いて、図13(b)に示したように、全面にシリコン酸化膜228を200nm形成する。次いで、図14(a)に示したように、レジストパターン230を形成し、これをマスクに酸化膜228と窒化膜206をエッチングして電極コンタクトホール232、234を形成する。ソース・ドレイン金属としてPt-Au合金を堆積させ、リフトオフによりコンタクトホール232、234内のみ金属を残して、ソース236とドレイン238を形成する(図14(b))。こうして、図6(a)と6(b)を参照して説明したのと同様の堅型構造の半導体装置が得られる。

20

【0038】

図15は、図11(a)~図14(b)の工程を経て製造した半導体装置の平面図である。この半導体装置においては、酸化物の絶縁膜228の開口部に、ソース236とドレイン238の一部がそれぞれ露出しており、ドレイン238の下方にチャンネルとなる多層カーボンナノチューブ220a(図14(a))のバンドル240が位置している。このナノチューブのバンドル240を取り囲んでゲート電極224が位置し、そしてその一部は、絶縁膜228の別の開口部に露出している。ゲート電極224の露出用の開口部は、例えば図13(b)で酸化膜228を形成後に行うことができる。

【0039】

複数の多層カーボンナノチューブの集合体であるバンドルを利用した半導体装置は、上で説明した堅型構造のものに限らず、ナノチューブの長手方向軸が基板面と平行である横型構造のものであってもよいことは、言うまでもない。

30

【0040】

カーボンナノチューブの特徴の一つに、ナノチューブ内ではキャリアである電子が無散乱で(コヒーレントな状態で)走行することが挙げられる。このような電子の伝導では、電流経路の長さにかかわらず、電気抵抗は一定になる。このような現象が認められるのは、電流経路の長さが電子の平均自由行程以下の場合である。従って、本発明の半導体装置においてゲートにより流れる電流を制御するチャンネル部分の長さ、言い換えれば、ゲート電極が直接、又は絶縁層を介して間接的に接触する、連続の外側チューブの長さが、電子の平均自由行程以下の場合に、本発明の半導体装置は特に、高速・高周波動作や、高電流駆動が可能となり、また低雑音特性を獲得する。

40

【0041】

また、カーボンナノチューブは、その構造が自己組織化によりできあがることから、それ自体の構造的ゆらぎ(ばらつき)が極端に少ない。また、本発明で使用する多層構造のカーボンナノチューブにおいても、外側と内側のナノチューブ間隔は0.34nmで極めて均一である。従って、カーボンナノチューブを利用して半導体装置を構成すれば、リソグラフィの限界を越えた微細化が可能である。

【0042】

これまで、ゲート電極は一つとして説明してきたが、いわゆる「ダブルゲート」タイプの半導体装置のように、本発明の半導体装置は2以上のゲート電極を持つこともできる。こ

50



の場合には、ソース・ドレイン間のカーボンナノチューブ部分に、ゲートの数に対応した互いに分断された独立の外側チューブが存在することになる。より具体的に言えば、図3を参照して説明した一番簡単な構造の半導体装置の場合、ゲートの数が一つならば外側チューブは一つの連続体でよく、ゲートの数が二つならば外側チューブは1箇所分断された不連続体となる。一方、例えば図4(a)と4(b)を参照して説明したようにゲート・ソース電極間、及びゲート・ドレイン間に分断部分を持つ外側チューブを有する半導体装置の場合、外側チューブは、ゲートの数が一つならば2箇所分断され、ゲートの数が二つならば3箇所分断されることになる。

【0043】

本発明は、以上説明したとおりであるが、その特徴を種々の態様とともに付記すれば、次のとおりである。

10

(付記1) 炭素元素から構成される円筒状の多層構造体であって内側の円筒体が半導体的性質を有し、外側の円筒体が金属的性質を有する多層構造体を含み、この多層構造体の内側円筒体の電気伝導度を外側円筒体に印加する電圧により制御することを特徴とする半導体装置。

(付記2) 炭素元素から構成される円筒状の多層構造体であって内側の円筒体が半導体的性質を有し、外側の円筒体が金属的性質を有する多層構造体と、内側円筒体の外側円筒体をはさんで相対する側にそれぞれ接続する導電体と、外側円筒体に電圧を印加する手段とを有することを特徴とする、付記1記載の半導体装置。

(付記3) 前記外側円筒体が分断なしの連続構造体であり、且つ、前記内側円筒体が分断なしの連続構造体である、付記1又は2記載の半導体装置。

20

(付記4) 前記外側円筒体が分断された不連続の構造体であり、且つ、前記内側円筒体が分断なしの連続構造体である、付記1又は2記載の半導体装置。

(付記5) 前記外側円筒体に整流性電極が直接接触している、付記3記載の半導体装置。

(付記6) 前記外側円筒体に整流性電極が絶縁材料を介し間接的に接触している、付記3記載の半導体装置。

(付記7) 前記外側円筒体が1箇所分断され、分断された各外側円筒体に整流性電極が直接接触している、付記4記載の半導体装置。

(付記8) 前記外側円筒体が1箇所分断され、分断された各外側円筒体に整流性電極が絶縁材料を介し間接的に接触している、付記4記載の半導体装置。

30

(付記9) 前記外側円筒体が2箇所以上分断され、分断された両端部の外側円筒体にはオーム性電極がそれぞれ接触し、且つ、分断された中間の外側円筒体には整流性電極が接触している、付記4記載の半導体装置。

(付記10) 前記整流性電極が前記外側円筒体に直接接触している、付記9記載の半導体装置。

(付記11) 前記整流性電極が前記外側円筒体に絶縁材料を介し間接的に接触している、付記9記載の半導体装置。

(付記12) 前記整流性電極の前記分断された両端部の外側円筒体に面する側面に絶縁材料の側壁が設けられている、付記11記載の半導体装置。

(付記13) 前記整流性電極の接触する連続の外側円筒体の長さが電子の平均自由行程以下である、付記5～12のいずれかに記載の半導体装置。

40

(付記14) 前記多層構造体の長手方向軸が、それが配置される基板面と平行である、付記1～13のいずれかに記載の半導体装置。

(付記15) 前記多層構造体の長手方向軸が、それが配置される基板面に対して垂直である、付記1～13のいずれかに記載の半導体装置。

(付記16) 前記多層構造体を複数含み、それらが外側円筒体どうしの接触によりバンドルを形成している、付記1～15のいずれかに記載の半導体装置。

(付記17) 前記多層構造体が複数のカーボンナノチューブから形成されている、付記1～16のいずれかに記載の半導体装置。

【0044】

50

【発明の効果】

以上説明したように、カーボンナノチューブをトランジスタのゲートとチャネルに適用した本発明の半導体装置は、ショートチャネル効果の抑制に特に有効であるサラウンドゲート構造をとることができるので、高速動作が可能となる。また、本発明によれば、高周波動作の可能な半導体装置や、電流駆動能力の高い半導体装置の利用も可能となる。

【0045】

ゲート電極が直接、又は絶縁層を介して間接的に接触する、分断されていない外側チューブの存在する部分のナノチューブの長さを電子の平均自由行程以下とすることにより、本発明の半導体装置は、特に高速動作、高周波動作、あるいは高電流駆動の、低雑音特性のものとなる。

10

【0046】

更に、カーボンナノチューブの使用は、リソグラフィの限界を越えた微細な半導体装置の提供を可能にする。

【図面の簡単な説明】

【図1】サラウンドゲート構造の半導体装置を説明する図である。

【図2】カーボンナノチューブのカイラリティを説明する図である。

【図3】本発明の半導体装置の基本的な構成の態様を説明する図である。

【図4】本発明の半導体装置のもう一つの態様を説明する図である。

【図5】本発明の半導体装置の更にもう一つの態様を説明する図である。

【図6】本発明の半導体装置の別の態様を説明する図である。

20

【図7】図4に示した半導体装置の製造の前半を説明する図である。

【図8】図4に示した半導体装置の製造の後半を説明する図である。

【図9】ゲート電極とカーボンナノチューブとの間に絶縁膜の介在する半導体装置の製造を説明する図である。

【図10】図5に示したゲート電極の側面に絶縁材料の側壁を備えた半導体装置の製造を説明する図である。

【図11】図6に示した半導体装置の製造を説明する第1の図である。

【図12】図6に示した半導体装置の製造を説明する第2の図である。

【図13】図6に示した半導体装置の製造を説明する第3の図である。

【図14】図6に示した半導体装置の製造を説明する第4の図である。

30

【図15】図11～14の工程で製造した半導体装置の平面図である。

【符号の説明】

1 ...チャネル

2 ...ゲート電極

3 ...ソース電極

4 ...ドレイン電極

10、100、100'、100" ...半導体装置

12、32、66、110、220a ...多層構造カーボンナノチューブ

14、34、70、226 ...内側チューブ

16、36C、36D、36S、68 ...外側チューブ

40

18、20 ...導電体

22 ...電圧印加手段

38、62、112、236 ...ソース電極

40、64、114、222、238 ...ドレイン電極

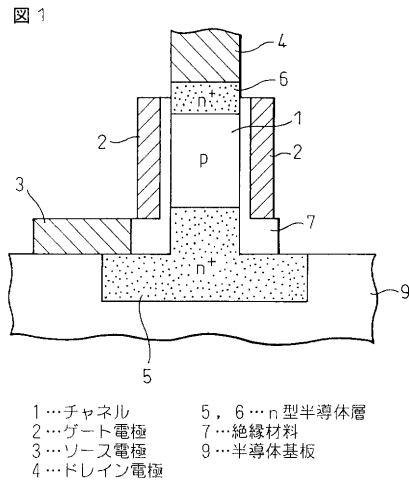
42、72、116、224 ...ゲート電極

52、124、228 ...絶縁体

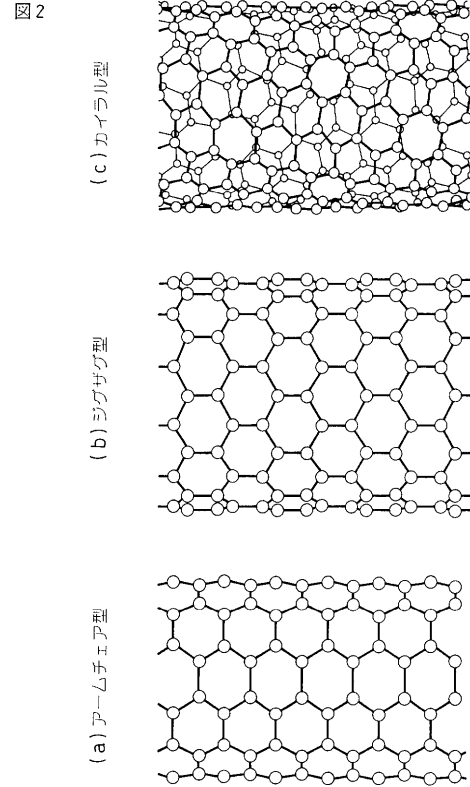
76、240 ...ナノチューブのバンドル

132 ...側壁

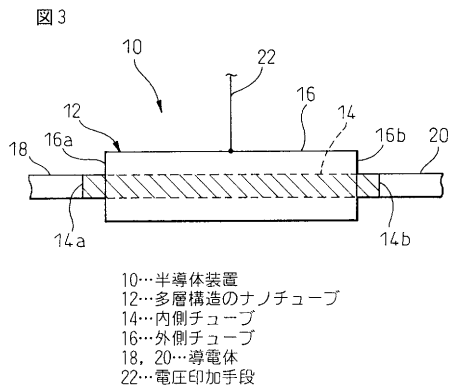
【図1】



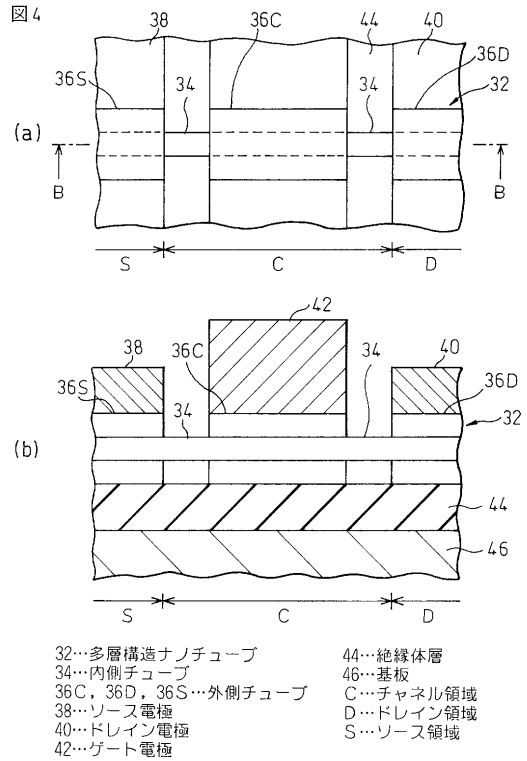
【図2】



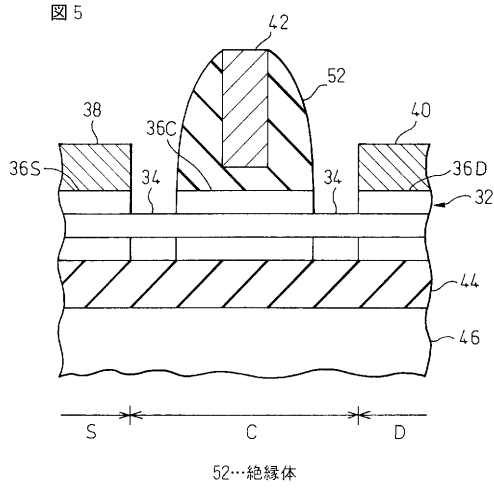
【図3】



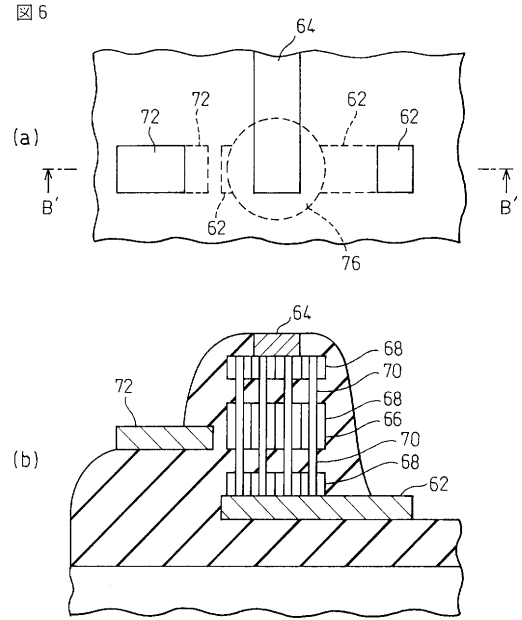
【図4】



【図5】

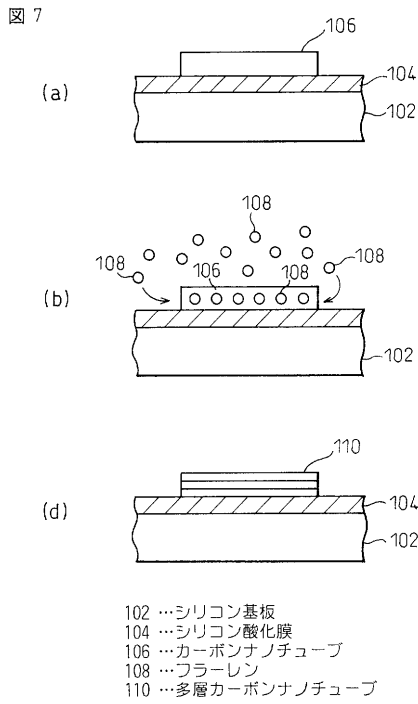


【図6】



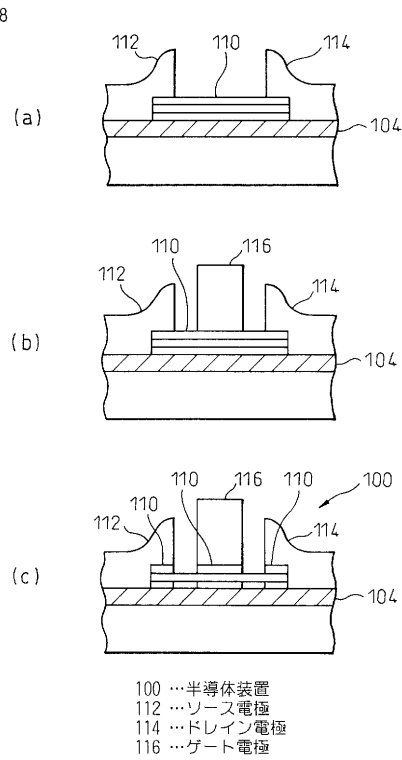
62...ソース電極                      70...内側チューブ  
 64...ドレイン電極                72...ゲート電極  
 66...多層構造ナノチューブ      76...ナノチューブのバンドル  
 68...外側チューブ

【図7】



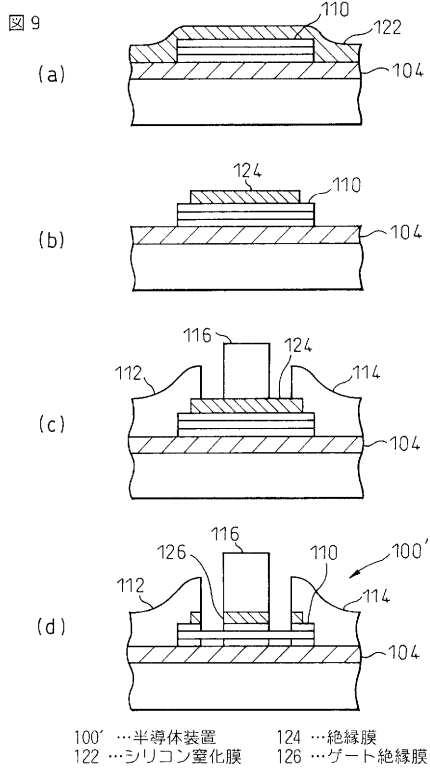
102 ...シリコン基板  
 104 ...シリコン酸化膜  
 106 ...カーボンナノチューブ  
 108 ...フラーレン  
 110 ...多層カーボンナノチューブ

【図8】

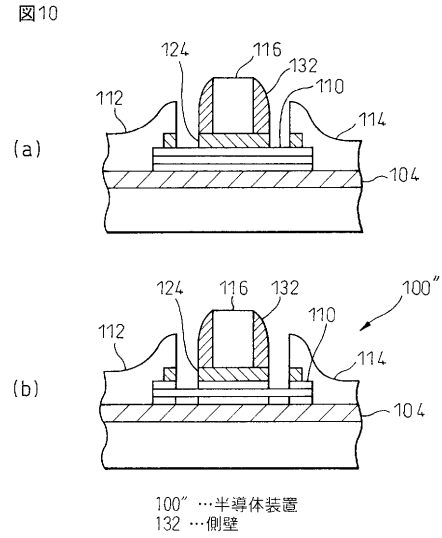


100 ...半導体装置  
 112 ...ソース電極  
 114 ...ドレイン電極  
 116 ...ゲート電極

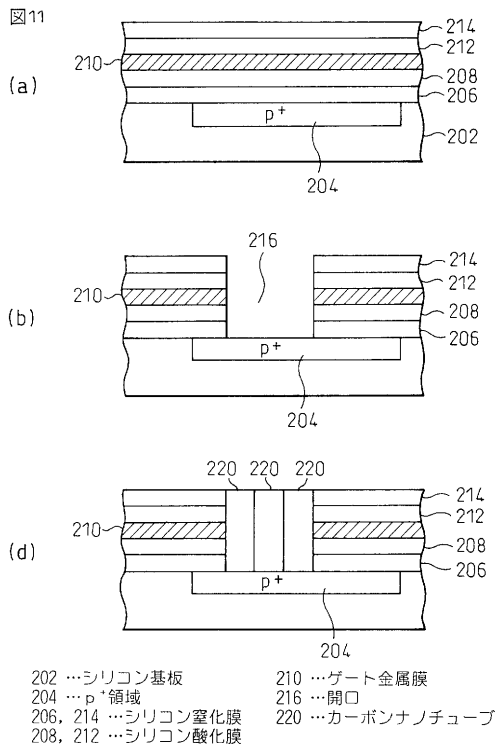
【図9】



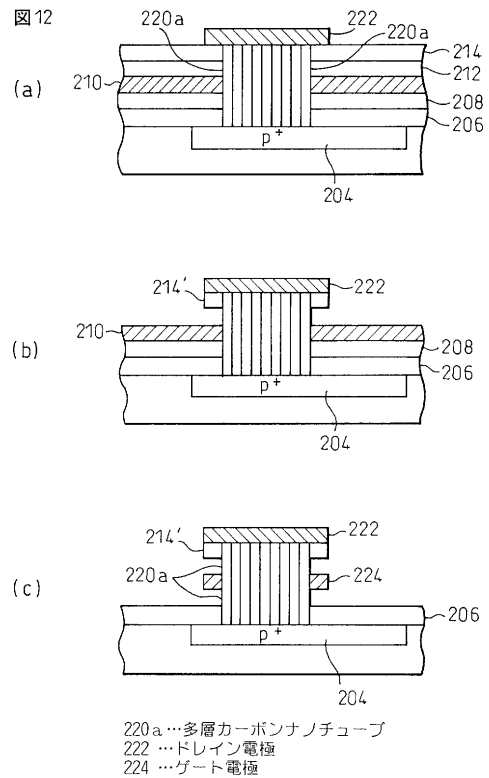
【図10】



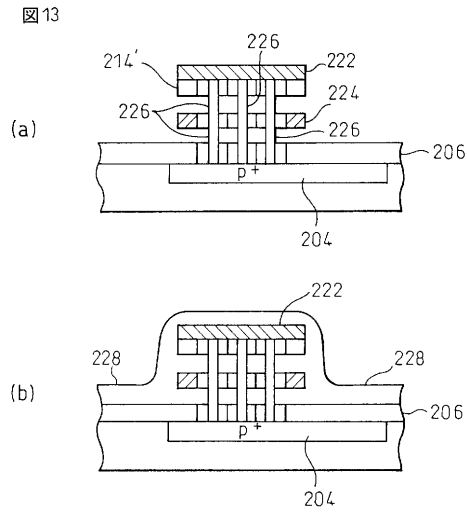
【図11】



【図12】

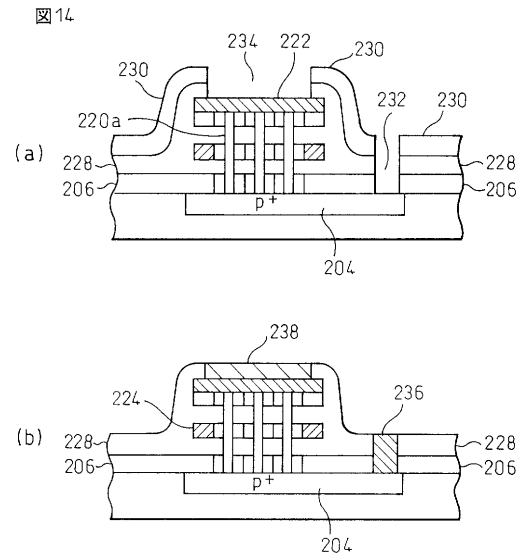


【図13】



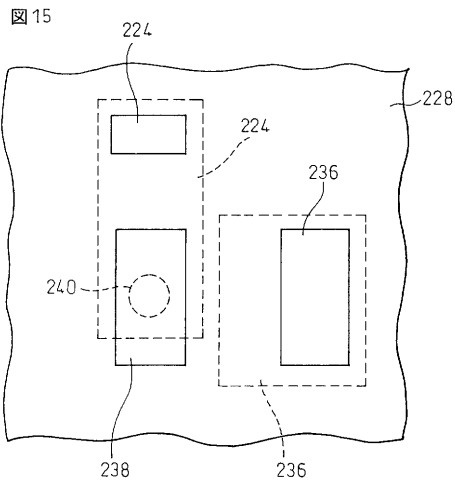
226 …内側ナノチューブ  
 228 …シリコン酸化膜

【図14】



230 …レジストパターン  
 232, 234 …電極コンタクトホール  
 236 …ソース  
 238 …ドレイン

【図15】



240 …ナノチューブのバンドル

---

フロントページの続き

(72)発明者 栗野 祐二

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

審査官 村岡 一磨

(56)参考文献 特表2004-503097(JP,A)  
国際公開第02/063693(WO,A1)  
特開2002-329723(JP,A)  
特開2002-031465(JP,A)  
国際公開第00/051186(WO,A1)  
特開平07-029462(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 29/78

H01L 29/06

H01L 29/786