(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5378417号
(P5378417)

(45)発行日　平成25年12月25日(2013.12.25)　(24)登録日　平成25年10月4日(2013.10.4)

(51)Int.Cl.		F I		
H01L 29/06	(2006.01)	H01L	29/06	601N
H01L 29/786	(2006.01)	H01L	29/78	618B
H01L 21/336	(2006.01)	H01L	29/78	626C
B82B 1/00	(2006.01)	B82B	1/00	
B82B 3/00	(2006.01)	B82B	3/00	

請求項の数 25　(全 28 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願2010-545802 (P2010-545802)
(86)(22)出願日　平成20年2月5日(2008.2.5)
(65)公表番号　特表2011-518424 (P2011-518424A)
(43)公表日　平成23年6月23日(2011.6.23)
(86)国際出願番号　PCT/KR2008/000731
(87)国際公開番号　WO2009/099259
(87)国際公開日　平成21年8月13日(2009.8.13)
審査請求日　平成22年8月31日(2010.8.31)
(31)優先権主張番号　10-2008-0011398
(32)優先日　平成20年2月4日(2008.2.4)
(33)優先権主張国　韓国(KR)

(73)特許権者　501426046
エルジー　ディスプレイ　カンパニー　リミテッド
大韓民国　ソウル、ヨンドゥンポーグ、ヨウィ－テロ　１２８
(74)代理人　100110423
弁理士　曾我　道治
(74)代理人　100084010
弁理士　古川　秀利
(74)代理人　100094695
弁理士　鈴木　憲七
(74)代理人　100111648
弁理士　梶並　順
(74)代理人　100147566
弁理士　上田　俊一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】ナノデバイス、これを含むトランジスタ、ナノデバイス及びこれを含むトランジスタの製造方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
基板、
前記基板上に位置し、一つ以上の開口部を有するマスク層、及び
前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記基板上に形成され、前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びたナノチューブ
を含み、
前記基板は、
前記ナノチューブと接する第１基板部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２基板部
を含み、
前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である、ナノデバイス。
【請求項２】
前記基板の結晶構造及び前記ナノチューブの結晶構造は実質的に同一である、請求項１に記載のナノデバイス。
【請求項３】
前記ナノチューブは、酸化亜鉛（ＺｎＯ）、酸化亜鉛マグネシウム（ＭｇＺｎＯ）、酸化亜鉛マグネシウムカドミウム（ＣｄＺｎＯ）、酸化亜鉛ベリリウム（ＺｎＢｅＯ）、及

び酸化亜鉛マグネシウムベリリウム（ＺｎＭｇＢｅＯ）からなる群より選択された一つ以上の元素を含む、請求項２に記載のナノデバイス。
【請求項４】
前記基板は、シリコン、酸化アルミニウム、砒素化ガリウム、スピネル、シリコン、リン化インジウム、リン化ガリウム、リン化アルミニウム、窒化ガリウム、窒化インジウム、窒化アルミニウム、酸化亜鉛、酸化マグネシウム、シリコンカーバイド、酸化チタン、クォーツ、パイレックス（登録商標）、高分子、金属から選択された一つ以上の元素を含む、請求項２に記載のナノデバイス。
【請求項５】
前記ナノチューブを前記板面に平行な方向に切断した断面の形状は円または多角形であり、前記基板は前記空間を通して外部に露出した、請求項１に記載のナノデバイス。
【請求項６】
前記基板と前記マスク層の間に位置したシード層をさらに含み、前記ナノチューブは前記シード層に接する、請求項１に記載のナノデバイス。
【請求項７】
前記シード層は、
前記ナノチューブと接する第１シード層部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２シード層部
を含む、請求項６に記載のナノデバイス。
【請求項８】
前記シード層は、シリコン、酸化アルミニウム、砒素化ガリウム、スピネル、シリコン、リン化インジウム、リン化ガリウム、リン化アルミニウム、窒化ガリウム、窒化インジウム、窒化アルミニウム、酸化亜鉛、酸化マグネシウム、シリコンカーバイド、及び酸化チタンから選択された一つ以上の元素を含み、前記ナノチューブは窒化ガリウム及び酸化亜鉛からなる群より選択された一つ以上の素材を含む、請求項６に記載のナノデバイス。
【請求項９】
前記一つ以上の開口部は複数の開口部を含み、前記複数の開口部間の間隔は１０ｎｍ～１００μｍである、請求項１に記載のナノデバイス。
【請求項１０】
前記複数の開口部は互いに相異なる直径を有する二つ以上の開口部を含む、請求項９に記載のナノデバイス。
【請求項１１】
前記ナノデバイスは発光素子またはバイオセンサーに使用される、請求項１に記載のナノデバイス。
【請求項１２】
基板、
前記基板上に位置し、一つ以上の開口部を有するマスク層、及び
前記開口部を貫いて前記基板上に形成され、前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びたナノ壁
を含み、
前記基板は、
前記ナノ壁と接する第１基板部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２基板部
を含み、
前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である、ナノデバイス。
【請求項１３】
前記一つ以上の開口部は複数の開口部を含み、前記複数の開口部は第１開口部及び第２開口部を含み、前記第１開口部及び前記第２開口部は相互交差する、請求項１２に記載の

ナノデバイス。
【請求項１４】
前記基板と前記マスク層の間に位置したシード層をさらに含み、前記ナノ壁は前記シード層に接する、請求項１２に記載のナノデバイス。
【請求項１５】
前記シード層は、
前記ナノ壁と接する第１シード層部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２シード層部
を含む、請求項１４に記載のナノデバイス。
【請求項１６】
ソース電極、
前記ソース電極上に位置し、一つ以上の開口部を有するマスク層、
前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記ソース電極上に形成され、前記ソース電極の板面に実質的に垂直の方向に伸びた複数のナノチューブ、
前記複数のナノチューブの間に形成された絶縁層、
前記絶縁層の上部及び前記ナノチューブの表面を覆う誘電体層、
前記ナノチューブの内部に前記誘電体層を覆いつつ形成されたゲート電極、及び
前記絶縁層上に位置したドレイン電極
を含み、
前記ソース電極は、
前記複数のナノチューブと接する第１ソース電極部、及び
前記第１ソース電極部によって囲まれた第２ソース電極部
を含み、
前記第１ソース電極部の表面エネルギーは前記第２ソース電極部の表面エネルギーより大きく、前記第１ソース電極部の表面エネルギーと前記第２ソース電極部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である、トランジスタ。
【請求項１７】
基板を提供する段階、
前記基板上に一つ以上の開口部を有するマスク層を形成する段階、及び
前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記基板上にナノチューブを成長させる段階
を含み、
前記ナノチューブを成長させる段階において、前記ナノチューブは前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びて成長し、
前記ナノチューブを成長させる段階において、
前記基板は、
前記ナノチューブが接してその上で成長する第１基板部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２基板部
を含み、
前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である、ナノデバイスの製造方法。
【請求項１８】
前記基板と前記マスク層の間にシード層を形成する段階をさらに含み、前記基板上にナノチューブを成長させる段階において、前記ナノチューブは前記シード層の真上で成長する、請求項１７に記載のナノデバイスの製造方法。
【請求項１９】
前記ナノチューブを成長させる段階において、
前記シード層は、
前記ナノチューブが接してその上で成長する第１シード層部、及び

前記第１シード層部により囲まれた第２シード層部
を含む、請求項１８に記載のナノデバイスの製造方法。
【請求項２０】
基板を提供する段階、
前記基板上に一つ以上の線状開口部を有するマスク層を形成する段階、及び
前記開口部を貫いて前記基板上にナノ壁を成長させる段階
を含み、
前記ナノ壁を成長させる段階において、前記ナノ壁は前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びて成長し、
前記ナノ壁を成長させる段階において、
前記基板は、
前記ナノ壁が接してその上で成長する第１基板部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２基板部
を含み、
前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である、ナノデバイスの製造方法。
【請求項２１】
前記基板と前記マスク層の間にシード層を形成する段階をさらに含み、前記基板上にナノ壁を成長させる段階において、前記ナノ壁は前記シード層の真上で成長する、請求項２０に記載のナノデバイスの製造方法。
【請求項２２】
前記ナノ壁を成長させる段階において、
前記シード層は、
前記ナノ壁が接してその上で成長する第１シード層部、及び
前記第１シード層部により囲まれた第２シード層部
を含む、請求項２１に記載のナノデバイスの製造方法。
【請求項２３】
ソース電極を提供する段階、
前記ソース電極上に一つ以上の開口部を有するマスク層を形成する段階、
前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記ソース電極上に複数のナノチューブを成長させる段階、
前記複数のナノチューブの間に絶縁層を形成する段階、
前記絶縁層の上部及び前記ナノチューブの表面を誘電体層で覆う段階、
前記ナノチューブの内部に前記誘電体層を覆ってゲート電極を形成する段階、及び
前記ゲート電極上にドレイン電極を形成する段階
を含み、
前記複数のナノチューブを成長させる段階において、前記ナノチューブは前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びて成長し、
前記ナノチューブを成長させる段階において、
前記基板は、
前記ナノチューブが接してその上で成長する第１基板部、及び
前記第１基板部によって囲まれた第２基板部
を含み、
前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である、トランジスタの製造方法。
【請求項２４】
前記基板と前記マスク層の間にシード層を形成する段階をさらに含み、前記基板上にナノチューブを成長させる段階において、前記ナノチューブは前記シード層の真上で成長す

る、請求項２３に記載のトランジスタの製造方法。
【請求項２５】
前記ナノチューブを成長させる段階において、
前記シード層は、
前記ナノチューブが接してその上で成長する第１シード層部、及び
前記第１シード層部により囲まれた第２シード層部
を含む、請求項２３に記載のトランジスタの製造方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、ナノデバイス、これを含むトランジスタ、ナノデバイス及びこれを含むトランジスタの製造方法に関するものである。
より詳しくは、本発明は、基板に形成したパターンを利用して、所望の位置に所望の形状に製造されたナノチューブまたはナノ壁を含むナノデバイス、これを含むトランジスタ、ナノデバイス及びこれを含むトランジスタの製造方法に関するものである。
【背景技術】
【０００２】
ボトムアップ（ｂｏｔｔｏｍ－ｕｐ）方法を利用したナノ構造体の製造方法が注目を浴びている。ボトムアップ方法によって製造されたナノ構造体は基板との格子定数差にもかかわらず、非常に低い電位密度を有する優れた結晶質に成長する。したがって、光エッチング工程（ｐｈｏｔｏｌｉｔｈｏｇｒａｐｈｙ）によるトップダウン（ｔｏｐ－ｄｏｗｎ）方式で製造されたナノ構造体より優れた結晶性を有するので、電気的性質及び光学的性質に優れている。ナノ構造体には、０次元構造を有するナノ粒子、１次元構造を有するナノ棒、及び２次元構造を有するナノ壁構造体がある。例えば、炭素単原子層（ｍｏｎｏｌａｙｅｒ）であるグラフェン（ｇｒａｐｈｅｎｅ）は２次元ナノ構造体である。
ここで、２次元ナノ構造体はナノ粒子及びナノ棒に比べて広い表面積を有するのみでなく、縦横比（ａｓｐｅｃｔ－ｒａｔｉｏ）が大きくて１次元ナノ素材より素子製造及び制御が容易である。しかし、２次元ナノ構造体は所望の形状に製造することが難しい。
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００３】
本発明は、２次元ナノ素材を利用して、所望の位置に所望の形状に製造することができるナノデバイスを提供する。
また、前述のナノデバイスを含むトランジスタを提供する。
そして、前述のナノデバイスの製造方法を提供する。
また、前述のトランジスタの製造方法を提供する。
【課題を解決するための手段】
【０００４】
本発明によるナノデバイスは、基板、前記基板上に位置し、一つ以上の開口部を有するマスク層、及び前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記基板上に形成され、前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びたナノチューブを含み、前記基板は、前記ナノ前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。
また、本発明によるナノデバイスは、基板、前記基板上に位置し、一つ以上の開口部を有するマスク層、及び前記開口部を貫いて前記基板上に形成され、前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びたナノ壁を含み、前記基板は、前記ナノ壁と接する第１基板部、及び前記第１基板部によって囲まれた第２基板部を含み、前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。

また、本発明によるトランジスタは、ソース電極、前記ソース電極上に位置し、一つ以上の開口部を有するマスク層、前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記ソース電極上に形成され、前記ソース電極の板面に実質的に垂直の方向に伸びた複数のナノチューブ、前記複数のナノチューブの間に形成された絶縁層、前記絶縁層の上部及び前記ナノチューブの表面を覆う誘電体層、前記ナノチューブの内部に前記誘電体層を覆いつつ形成されたゲート電極、及び前記絶縁層上に位置したドレイン電極を含み、前記ソース電極は、前記複数のナノチューブと接する第１ソース電極部、及び前記第１ソース電極部によって囲まれた第２ソース電極部を含み、前記第１ソース電極部の表面エネルギーは前記第２ソース電極部の表面エネルギーより大きく、前記第１ソース電極部の表面エネルギーと前記第２ソース電極部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。

また、本発明によるナノデバイスの製造方法は、基板を提供する段階、前記基板上に一つ以上の開口部を有するマスク層を形成する段階、及び前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記基板上にナノチューブを成長させる段階を含み、前記ナノチューブを成長させる段階において、前記ナノチューブは前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びて成長し、前記ナノチューブを成長させる段階において、前記基板は、前記ナノチューブが接してその上で成長する第１基板部、及び前記第１基板部によって囲まれた第２基板部を含み、前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。

また、本発明によるナノデバイスの製造方法は、基板を提供する段階、前記基板上に一つ以上の線状開口部を有するマスク層を形成する段階、及び前記開口部を貫いて前記基板上にナノ壁を成長させる段階を含み、前記ナノ壁を成長させる段階において、前記ナノ壁は前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びて成長し、前記ナノ壁を成長させる段階において、前記基板は、前記ナノ壁が接してその上で成長する第１基板部、及び前記第１基板部によって囲まれた第２基板部を含み、前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。

さらに、本発明によるトランジスタの製造方法は、ソース電極を提供する段階、前記ソース電極上に一つ以上の開口部を有するマスク層を形成する段階、前記開口部の周縁に沿って前記開口部を貫いて前記ソース電極上に複数のナノチューブを成長させる段階、前記複数のナノチューブの間に絶縁層を形成する段階、前記絶縁層の上部及び前記ナノチューブの表面を誘電体層で覆う段階、前記ナノチューブの内部に前記誘電体層を覆ってゲート電極を形成する段階、及び前記ゲート電極上にドレイン電極を形成する段階を含み、前記複数のナノチューブを成長させる段階において、前記ナノチューブは前記基板の板面に実質的に垂直の方向に伸びて成長し、前記ナノチューブを成長させる段階において、前記基板は、前記ナノチューブが接してその上で成長する第１基板部、及び前記第１基板部によって囲まれた第２基板部を含み、前記第１基板部の表面エネルギーは前記第２基板部の表面エネルギーより大きく、前記第１基板部の表面エネルギーと前記第２基板部の表面エネルギーの差は０．１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。

【００１３】

本発明の一実施例によるトランジスタの製造方法は、基板とマスク層の間にシード層を形成する段階をさらに含み、基板上にナノチューブを成長させる段階において、ナノチューブはシード層の真上で成長することができる。ナノチューブを成長させる段階において、シード層は、ナノチューブが接してその上で成長する第１シード層部、及び第１シード層部により囲まれた第２シード層部を含むことができる。

【発明の効果】

【００１４】

本発明によれば、所望の形状及び大きさを有するナノチューブまたはナノ壁を所望の位置に成長させたナノデバイスを提供することができる。したがって、ナノデバイスの集積度を高めることができる。また、金属触媒を使用しないので、不純物を少なく含有する高

純度及び高品質のナノデバイスを提供することができる。そして、所望の位置に垂直に配向されたナノチューブまたはナノ壁を含むナノデバイスを大量で生産することができる。さらに、ナノデバイスは広い表面積を有するので、ナノデバイスを電子素子のみでなく生化学センサーなどの多様な素子に応用することができる。そして、ナノデバイスを利用して、３次元構造を有するナノ構造体を容易に製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１】本発明の第１実施例によるナノデバイスを含むトランジスタの概略的な立体断面図である。

【図２】図１のトランジスタの製造方法を概略的に示したフローチャートである。

【図３】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図４】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図５】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図６】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図７】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図８】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図９】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図１０】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図１１】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図１２】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図１３】図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示した図である。

【図１４】本発明の第１実施例によるナノデバイスを含む発光素子を概略的に示した図である。

【図１５】本発明の第１実施例によるナノデバイスを含むバイオセンサーを概略的に示した図である。

【図１６】本発明の第２実施例によるナノデバイスを概略的に示した図である。

【図１７】本発明の第３実施例によるナノデバイスを概略的に示した図である。

【図１８】本発明の第４実施例によるナノデバイスを概略的に示した図である。

【図１９】本発明の第５実施例によるナノデバイスを概略的に示した図である。

【図２０】シード層がマスク層を通して外部に露出した状態を示した走査電子顕微鏡写真である。

【図２１】図２０のシード層上に形成されたナノチューブの平面走査電子顕微鏡写真である。

【図２２】図２０のシード層上に形成されたナノチューブの立体走査電子顕微鏡写真である。

【図２３】シード層及びナノチューブのエピタキシャル関係を示した高分解能放射光加速器のＸ線回折グラフである。

【図２４】図２３のＸ線回折ピーク中ＸＸＩＶ部分に相当するピークを拡大して示したグラフである。

【図２５】シード層及びナノチューブのエピタキシャル関係を示した他の高分解能放射光加速器のＸ線回折グラフである。

【図２６】ナノチューブの透過電子顕微鏡分析写真である。

【図２７】ナノチューブの透過電子顕微鏡分析写真である。

【図２８】ナノチューブの透過電子顕微鏡分析写真である。

【図２９】低温及び常温の光発光分光測定によるナノチューブの発光スペクトルグラフである。

【図３０】常温の光発光分光測定によるナノチューブの発光スペクトルグラフである。

【図３１】複数のナノチューブ間の間隔を２．４μｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。

【図３２】複数のナノチューブ間の間隔を１．６μｍに調節して製造したナノデバイスの

立体走査電子顕微鏡写真である。
【図３３】複数のナノチューブ間の間隔を１．２μｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図３４】複数のナノチューブ間の間隔を０．８μｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図３５】複数のナノチューブ間の間隔を２．４μｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図３６】複数のナノチューブ間の間隔を１．６μｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図３７】複数のナノチューブ間の間隔を１．２μｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図３８】複数のナノチューブ間の間隔を０．８μｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図３９】複数のナノチューブの直径を８００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図４０】複数のナノチューブの直径を６００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図４１】複数のナノチューブの直径を４００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図４２】複数のナノチューブの直径を２００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図４３】複数のナノチューブの直径を８００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図４４】複数のナノチューブの直径を６００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図４５】複数のナノチューブの直径を４００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図４６】複数のナノチューブの直径を２００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図４７】ＰＯＳＴＥＣＨという字に形成されたナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。
【図４８】ＰＯＳＴＥＣＨという字に形成されたナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。
【図４９】発光素子に印加する電界により発光素子から放出される電流密度を示したグラフである。
【図５０】図４９をファウラーノルドハイム変換したグラフである。
【図５１】ナノチューブ間の間隔が６μｍである発光素子の放出電流密度の安定性を示したグラフである。
【図５２】暗室で撮影した発光素子の発光写真である。
【図５３】室内照明を備えた部屋で撮影した発光素子の発光写真である。
【発明を実施するための形態】
【００１６】
ある部分が他の部分の「上に」あると言及する場合、これはまさに他の部分の上にありえたりその間に他の部分が伴える。対照的に、ある部分が他の部分の「真上に」あると言及する場合、その間に他の部分が介されない。
第１、第２、及び第３などの用語は、多様な部分、成分、領域、層及び／またはセクションを説明するために使用されるが、これらに限定されないことを理解することができる。これら用語はある部分、成分、領域、層またはセクションを他の部分、成分、領域、層またはセクションと区別するためにのみ使用される。したがって、以下で説明する第１部分、成分、領域、層またはセクションは本発明の範囲を超えない範囲内で第２部分、成分

、領域、層またはセクションに言及される。
ここで使用される専門用語は単に特定の実施例を言及するためのものであり、本発明を限定することを意図するものではない。ここで使用される単数形態は、文句がこれと明確に反対の意味を示していない限り、複数形態も含む。明細書で使用される「含む」の意味は、特定特性、領域、整数、段階、動作、要素及び／または成分を具体化し、他の特定特性、領域、整数、段階、動作、要素、成分及び／または群の存在や付加を除外させるわけではない。
「下」、「上」などの相対的な空間を示した用語は、図面に示された一部分の他の部分に対する関係をもう少し簡単に説明するために用いられることができる。このような用語は図面から意図した意味と共に使用中である装置の他の意味や動作を含むように意図される。例えば、図面中の装置をひっくり返せば、他の部分の「下」にあるものとして説明されたある部分は他の部分の「上」にあるものであると説明される。したがって、「下」という例示的な用語は上方及び下方を全て含む。装置は９０°回転または他の角度に回転することができ、相対的な空間を示した用語もこれに応じて解釈される。
異なるように定義してはいないが、ここに使用される技術用語及び科学用語を含む全ての用語は本発明が属する技術分野にて通常の知識を有する者が一般に理解する意味と同一な意味を有する。普通使用される辞書に定義された用語は関連技術文献と現在開示された内容に符合する意味を有するものとして追加解釈され、定義されない限り、理想的であったり非常に公式的な意味には解釈されない。
斜視図及び断面図を参照して説明された本発明の実施例は、本発明の理想的な実施例を具体的に示す。その結果、図解の多様な変形、例えば、製造方法及び／または仕様の変形が予想される。したがって、実施例は図示の領域の特定形態に限定されず、例えば、製造による形態の変形も含む。例えば、扁平であると示されたり説明された領域は一般に荒かったり／荒くて非線形である特性を有することができる。また、鋭い角度を有するものとして示された部分は丸く曲がることができる。したがって、図面に示された領域は元来ほぼ的なものに過ぎず、これらの形態は領域の正確な形態を示すように意図されたものではなく、本発明の範囲を狭めるために意図されたものではない。
明細書に記載された「ナノ」という用語はナノスケールを意味する。また、明細書に記載された「ナノチューブ」という用語はその中心が空いているナノスケールの構造体を意味する。そして、「ナノ壁」は壁形状を有するナノスケールの構造体を意味する。
【００１７】
以下、図１乃至図１９を参照して、本発明の実施例を説明する。このような実施例は単に本発明を例示するためのものであり、本発明がここに限定されるわけではない。
【００１８】
図１は、本発明の第１実施例によるナノデバイス１００を含むトランジスタ１０００を概略的に示す。また、図１にはトランジスタ１０００の立体断面構造を示す。図１のトランジスタ１０００はナノサイズを有していて実際には非常に小さいので、図１にはこれを拡大して示した。図１には４個のナノデバイス１００のみを示したが、これは単に本発明を例示するためのものであり、本発明がここに限定されるわけではない。したがって、トランジスタ１０００は複数のナノデバイスを含むことができる。
【００１９】
図１に示したように、トランジスタ１０００はナノデバイス１００、絶縁体６０、ドレイン電極７０、誘電体層８０、及びゲート電極９０を含む。ここで、ナノデバイス１００は、基板１０、マスク層４０、及びナノチューブ５０を含む。基板１０はソース電極として作用する。
基板１０の素材としては、窒化ガリウム、酸化亜鉛、単結晶サファイア、砒素化ガリウム、スピネル、シリコン、シリコンカーバイド、リン化インジウム、クォーツ、またはパイレックスを使用することができる。単結晶シリコン乃至クォーツ、パイレックスからなる基板１０を使用する場合、大面積の基板を用いることができるのでナノデバイス１００の製造費用を低くすることができる。特に、単結晶シリコン基板を使用する場合、基板１

０の電気伝導度の調節が容易であるので多様な応用デバイスを製造することができる。また、基板１０をパターニングして、一つのトランジスタ１０００に一つのソース電極を形成することができる。その結果、ソース電極は相互電気的に絶縁されるので、各々のトランジスタ１０００のソース電極に印加される電圧を調節することができる。

【００２０】

マスク層４０は基板１０の上に位置する。マスク層４０にはエッチングなどの方法によって、開口部４０１が形成される。ナノチューブ５０は開口部４０１の周縁に沿って形成される。ナノチューブ５０は基板１０の板面１０１に実質的に垂直の方向、つまり、Ｚ軸方向に伸びている。ナノチューブ５０の直径及び形状は制御される。

【００２１】

基板１０の板面１０１は第１基板部１０１１及び第２基板部１０１３を含む。第１基板部１０１１はナノチューブ５０と接する。第２基板部１０１３はナノチューブ５０と接しない部分であって、第１基板部１０１１によって囲まれる。ここで、第１基板部１０１１の表面エネルギーは第２基板部１０１３の表面エネルギーより大きい。したがって、ナノチューブ５０は第１基板部１０１１の真上にのみ形成され、第２基板部１０１３には形成されない。第１基板部１０１１の表面エネルギーと第２基板部１０１３の表面エネルギーの差はその表面の曲率半径に起因する。第１基板部１０１１はマスク層４０に接しているので、非常に小さい曲率半径を有する。反面、第２基板部１０１３は基板表面であってその曲率半径が無限であるのでその表面エネルギーが第１基板部より小さい。前述のエネルギー差により、ナノ壁またはナノチューブは基板１０と開口部４０１の境界である第１基板部１０１１に従って成長する。

ここで、第１基板部１０１１の表面エネルギーと第２基板部１０１３の表面エネルギーの差は０.１Ｊ／ｍ^{2}乃至５Ｊ／ｍ^{2}である。両基板部１０１１、１０１３の表面エネルギーが過度に小さかったり大きいとナノチューブまたはナノ壁が成長できない。

【００２２】

ナノチューブ５０は、酸化亜鉛（ＺｎＯ）、酸化亜鉛マグネシウム（ＭｇＺｎＯ）、酸化亜鉛マグネシウムカドミウム（ＣｄＺｎＯ）、酸化亜鉛ベリリウム（ＺｎＢｅＯ）、または酸化亜鉛マグネシウムベリリウム（ＺｎＭｇＢｅＯ）で製造することができる。

基板１０を窒化ガリウムで製造する場合、ナノチューブ５０は酸化亜鉛で製造することができる。また、基板１０及びナノチューブ５０を全て酸化亜鉛で製造したり全て窒化ガリウムで製造することもできる。ナノチューブ５０が基板１０の上でエピタキシャルでよく成長できる場合、基板１０の上にシード層を別途に形成しなくても良い。ナノチューブ５０は有機金属化学気相蒸着法（ｍｅｔａｌ　ｏｒｇａｎｉｃ　ｃｈｅｍｉｃａｌ　ｖａｐｏｒ　ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ、ＭＯＣＶＤ）を利用して、基板１０の上に蒸着することができる。

【００２３】

複数のナノチューブ５０の間には絶縁体６０を形成する。したがって、ナノデバイス１００は相互電気的に絶縁される。また、絶縁体６０は、ソース電極として作用する基板１０とドレイン電極７０間を電気的に絶縁させる。したがって、各々のナノデバイス１００の動作を制御することができる。ナノチューブ５０及び絶縁体６０の上にはドレイン電極７０が位置する。ドレイン電極７０及びナノチューブ５０の内部の側面には誘電体層８０が形成される。誘電体層８０は基板１０とゲート電極９０の間、そしてドレイン電極７０とゲート電極９０の間を相互電気的に絶縁させる。

【００２４】

図１のトランジスタ１０００を電源に連結する場合、ソース電極として機能する基板１０からドレイン電極７０に電子が流れる。この電子を、ゲート電極９０に電圧を印加してナノチューブ５０に電場を生成することによってチャンネルの抵抗を変化させ、多数のキャリアの流れを制御することができる。

図１のナノチューブ５０はＺ軸方向に伸びて、広いゲート面積を有するので、スイッチ性能が非常に優れたトランジスタ１０００を製造することができる。

【００２５】
以下、図２と図３乃至図１３を参照してトランジスタ１０００の製造過程を説明する。
【００２６】
図２は、図１のトランジスタ１０００の製造方法を概略的に示したフローチャートである。図３乃至図１３は、図１のトランジスタの製造方法の各段階別工程を概略的に示す。
以下、図２の各段階を図３乃至図１３を参照して共に説明する。
【００２７】
図２に示したように、段階（Ｓ１０）では基板１０を準備する。基板１０にシード層を形成することもできる。図３に示したように、基板１０の板面１０１はＺ軸方向と実質的に垂直を成す。
次に、図２の段階（Ｓ２０）では、基板１０の上にマスク層４０を形成する。マスク層４０は非晶質酸化シリコンまたは窒化シリコンで製造することができる。図４に示したように、プラズマ化学気相蒸着法（ｐｌａｓｍａ－ｅｎｈａｎｃｅｄ　ｃｈｅｍｉｃａｌ　ｖａｐｏｒ　ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ、ＣＶＤ）を使用して、基板１０の板面１０１の上にマスク層４０を形成することができる。マスク層４０の厚さは１０ｎｍ～３００ｎｍである。
図２の段階（Ｓ３０）では、マスク層４０の上にフォトレジスト層４５を形成する。フォトレジスト層４５にはＰＭＭＡ（ｐｏｌｙｍｅｔｈｙｌ　ｍｅｔｈａｃｒｙｌａｔｅ、ポリメチルメタクリレート）レジスト（ｒｅｓｉｓｔ）を使用することができる。図５に示したように、フォトレジスト層４５をマスク層４０の上にスピンコーティング法で形成した後、加熱（ｂａｋｉｎｇ）する。
【００２８】
次に、図２の段階（Ｓ４０）では、光または電子ビームをフォトレジスト層４５に照射してパターンを形成する。図６に示したように、光または電子ビームをフォトレジスト層４５に照射して所望の形状のパターンを形成することができる。
図２の段階（Ｓ５０）では、フォトレジスト層４５を現像液でエッチングして光または電子ビームに露出した部分のみを除去する。したがって、図７に示したように、マスク層４０が前述のパターンを通して外部に露出する。
次に、図２の段階（Ｓ６０）では、マスク層４０をエッチングして、前述のパターンに対応する開口部４０１を形成する。マスク層４０は、プラズマを利用した物理的エッチング方法や化学溶液を利用した化学的エッチング方法によってエッチングすることができる。次に、有機溶媒を利用してフォトレジスト層４５を除去すれば、図８に示したように、基板１０がマスク４０の開口部４０１を通して外部に露出する。
【００２９】
図２の段階（Ｓ７０）では、反応前駆体を反応器に注入して、開口部４０１にナノチューブ５０を形成する。有機金属非触媒化学蒸着法によれば、マスク層４０のためにナノチューブ５０は開口部４０１の上でのみ成長する。反応前駆体には、ＤＥＺｎ（Ｄｉｅｔｈｙｌ　Ｚｉｎｃ、ジエチル亜鉛）及び酸素（O_2）を使用することができる。反応前駆体注入時、一側ではＤＥＺｎを輸送気体に乗せて送り、他側では酸素（O_2）を吹き込む。そうすれば、図１０に示したように、ＴＭＧａのＧａとアンモニア（NH_3）のＮが反応して、ＧａＮからなるナノチューブが開口部４０１の周縁に沿って形成されることができる。
次に、図２の段階（Ｓ８０）では、複数のナノチューブ５０の間に絶縁体６０を形成する。つまり、図９に示したように、絶縁体６０を形成して、ナノチューブ５０を相互電気的に絶縁させる。また、絶縁体６０は、ソース電極として作用する基板１０とドレイン電極７０を相互電気的に絶縁させる。絶縁体６０は非導電性素材を使用して製造することができる。
図２の段階（Ｓ９０）では、絶縁体６０及びナノチューブ５０の上にドレイン電極７０を形成する。図１１に示したように、傾斜角回転蒸着方法を利用してドレイン電極７０を形成する。図１１の拡大円には、点線で示した円をｘ軸方向に沿って切断した断面を示す

。図１１の拡大円に示したように、ナノチューブ５０の上部にのみドレイン電極７０が形成される。

【００３０】

次に、図２の段階（Ｓ１００）では、ドレイン電極７０の上部及びナノチューブ５０の内部に誘電体層８０を形成する。図１２の拡大円には、点線で示した円をｘ軸方向に沿って切断した断面を示す。図１２の拡大円に示したように、ナノチューブ５０の内面及びドレイン電極７０の上部に誘電体層８０が形成される。誘電体層８０はナノチューブ５０の内部全面にかけて形成される。また、誘電体層８０はドレイン電極７０とゲート電極９０を相互絶縁させる。

最後に、図２の段階（Ｓ１１０）では、ナノチューブ５０の内部にゲート電極９０を形成する。図１３に示したように、ゲート電極９０を形成することによってトランジスタ１０００を製造することができる。図１３の拡大円には、点線で示した円をｘ軸方向に沿って切断した断面を示す。図１３の拡大円に示したように、ゲート電極９０及びドレイン電極７０を使用してトランジスタ１０００を製造することができる。基板１０を電源に連結すれば、基板１０を通して複数のキャリアが流入してドレイン電極７０に移動する。複数のキャリアのソース電極及びドレイン電極７０の間の電流は、ゲート電極９０に印加される電圧によって制御される。

【００３１】

図１４は、本発明の第１実施例によるナノデバイス１００を含む発光素子２０００を概略的に示す。図１４の発光素子２０００の構造は図１のトランジスタ１０００の構造と類似しているので、同一の部分には同一図面符号を使用し、その詳細な説明は省略する。

図１４に示したように、複数のナノチューブ５０の間に絶縁体６０を形成する。複数のナノチューブ５０の上に電極１２を形成することによって、電極１２が複数のナノチューブ５０と接する。したがって、電極１２及び基板１０に電源１４を連結し、電圧を印加するとナノチューブ５０から光が放出される。電子はＺ軸方向に長く伸びたナノチューブ５０を通して移送されるので、その移送効率に優れている。

ナノチューブ５０は外面５０１及び内面５０３を含むので、その表面積が非常に広い。したがって、ナノチューブ５０の表面に異種構造または量子ウエル構造の発光層を製造すれば、発光層の面積が広くなって発光効率が非常に高まる。また、ナノチューブ５０の下端部５０５のみが基板１０と接しているので、その接触面積が非常に小さい。したがって、発光素子２０００に同一な電圧を印加しても電流密度が大きくなり、小さい電力でも光出力を最大化することができる。また、発光素子２０００の電力消耗が少ないので、発光素子２０００のエネルギー効率が非常に高い。前述のような同一な原理を利用して、発光ダイオード（ｌｉｇｈｔ　ｅｍｉｔｔｉｎｇ　ｄｉｏｄｅ、ＬＥＤ）を製造することができる。

【００３２】

図１５は、本発明の第１実施例によるナノデバイス１００を含むバイオセンサー３０００を概略的に示す。図１５のバイオセンサー３０００の構造は図１４の発光素子２０００の構造と類似しているので、同一の部分には同一図面符号を使用し、その詳細な説明は省略する。

図１５に示したように、ナノチューブ５０の外面５０１に、特定酵素にのみ反応する反応性物質１６を形成することができる。反応性物質１６は酵素と反応して、ナノチューブ５０に電圧変化を誘導する。ナノチューブ５０の上に形成された電極１２と基板１０は表示部１８に連結されているので、ナノチューブ５０の電圧変化は表示部１８に表示される。前述の原理を利用して、特定酵素にのみ反応するバイオセンサー３０００を製造することができる。特に、ナノチューブ５０が広い表面積を有するので、検出効率が非常に優れている。その結果、ナノチューブ５０をバイオセンサー３０００に使用するのに適している。

【００３３】

図１６は、本発明の第２実施例によるナノデバイス２００を概略的に示す。図１６の拡

大円には、ナノデバイス２００の内部断面を拡大して示した。図１６のナノデバイス２００の構造は図１のトランジスタ１０００に含まれているナノデバイス１００の構造と類似しているので、同一の部分には同一図面符号を使用し、その詳細な説明を省略する。

【００３４】

図１６に示したように、ナノデバイス２００は、基板１０、バッファー層２０、シード層３０、マスク層４０、及びナノチューブ５２を含む。基板１０には１１１結晶面を有する単結晶シリコンを使用することができる。シード層３０の結晶性を調節するためにまたはバッファー層２０乃至シード層３０を使用しないために、基板１０を多様な素材で製造することができる。基板１０はｘｙ平面方向に平行な板面１０１を有する。

【００３５】

バッファー層２０は基板１０の上に形成される。バッファー層２０は真上に形成されるシード層３０と基板１０との格子定数差による応力を相互緩衝させる。バッファー層２０は、例えば、窒化アルミニウムで製造することができる。

【００３６】

バッファー層２０の上にはシード層３０を形成する。シード層３０は、化学気相蒸着法（ｃｈｅｍｉｃａｌ ｖａｐｏｒ ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ、ＣＶＤ）、有機金属化学気相蒸着法（ｍｅｔａｌ ｏｒｇａｎｉｃ ｃｈｅｍｉｃａｌ ｖａｐｏｒ ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ、ＭＯＣＶＤ）、スパッタリング（ｓｐｕｔｔｅｒｉｎｇ）、電子ビーム真空蒸着法（ｅｌｅｃｔｒｏｎ ｂｅａｍ ｅｖａｐｏｒｉｚａｔｉｏｎ）、加熱式真空蒸着法（ｔｈｅｒｍａｌ ｅｖａｐｏｒｉｚａｔｉｏｎ）、パルスレーザー真空蒸着法（ｐｕｌｓｅｄ ｌａｓｅｒ ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ）、分子ビーム蒸着法（ｍｏｌｅｃｕｌａｒ ｂｅａｍ ｅｐｉｔａｘｙ）、化学ビーム真空蒸着法（ｃｈｅｍｉｃａｌ ｂｅａｍ ｅｖａｐｏｒｉｚａｔｉｏｎ）、または水熱合成法（ｈｙｄｒｏｔｈｅｒｍａｌ ｓｙｎｔｈｅｓｉｓ）などを使用して蒸着されることができる。シード層３０は、例えば、窒化ガリウムエピタキシャル薄膜（ｅｐｉｔａｘｉａｌ ｔｈｉｎ ｆｉｌｍ）で製造することができる。

【００３７】

図２に示した方法と同一な方法を利用して、シード層３０の上にマスク層４０及びフォトレジスト層（図示せず）を形成及びエッチングすることによって、マスク層４０に四角形形態の開口部４０２を形成する。フォトレジスト層（図示せず）は開口部４０２を形成した後で除去される。マスク層４０は酸化シリコンを蒸着して製造することができ、その厚さは数ｎｍ～数十μｍである。マスク層４０は、ナノチューブ５２に対して選択成長特性を有する素材で製造することができる。

【００３８】

次に、反応前駆体を反応器に注入して、開口部４０２を通してＺ軸方向に伸びたナノチューブ５２を形成する。反応前駆体として、ジメチル亜鉛（ＤＥＺｎ）及びO_2を反応器に注入する。ジメチル亜鉛は亜鉛ソースに作用するので、亜鉛及びO_2が反応して酸化亜鉛からなるナノチューブ５２がシード層３０の上に生成される。ナノチューブ５２は選択成長特性を示しつつシード層３０の特定の部分のみで成長する。シード層３０の異方的表面エネルギーを利用して、シード層３０の特定の部分のみでナノチューブ５２を成長させられる。したがって、ナノチューブ５２は、基板１０の板面１０１に垂直の方向に成長する。

窒化ガリウム及び酸化亜鉛の結晶構造は相互同一であり、酸化亜鉛の

【００３９】

【数１】

$$\{10\bar{1}0\}$$

【００４０】

結晶面と

【００４１】
【数２】

$$\{11\bar{2}0\}$$

【００４２】
結晶面の表面エネルギーは{０００１}の表面エネルギーより低い。したがって、酸化亜鉛からなるナノチューブ５２の非触媒成長は、繊維亜鉛鉱（ｗｕｒｔｚｉｔｅ）結晶構造の表面エネルギーの異方性が大きいことに起因する。このような表面エネルギーの異方性は、酸化亜鉛からなるナノチューブ５２を［０００１］方向に成長させる。シード層３０の素材である窒化ガリウムとナノチューブ５２の素材である酸化亜鉛はその結晶構造が相互実質的に同一であり、格子定数の差が１．９％程度に小さい。したがって、高品質のエピタキシャルで製造されて、単結晶性を有するナノデバイスを製造することができる。
前述のように、窒化ガリウムからなるシード層３０と酸化亜鉛からなるナノチューブ５２を備えたナノデバイスを製造することができるが、これは単に本発明を例示するためのものであり、本発明がここに限定されるわけではない。したがって、他の素材を利用してシード層及びナノチューブを各々製造することもできる。前述のナノチューブはナノ壁からなっているので、ナノ壁と呼ばれることもできる。
ナノチューブ５２はシード層３０とのエピタキシャル関係によりＺ軸方向に伸びているので、シード層３０によって堅固に支持される。したがって、ナノチューブ５２を安定的に製造することができる。ナノチューブ５２は開口部４０２の周縁に沿ってシード層３０の上に形成される。その結果、ナノチューブ５２は四角形形状を有する。
【００４３】
図１６の拡大円に示したように、ナノチューブ５２はシード層３０の上で成長する。ナノチューブ５２の外部側面はマスク層４０２に接する。開口部４０２を通して外部に露出したシード層３０は、第１シード層部３０１及び第２シード層部３０３を含む。ここで、第１シード層部３０１は、ナノチューブ５２の直下に位置する部分を意味する。第１シード層部３０１はマスク層４０と隣接する。また、第２シード層部３０３は、第１シード層部３０１によって囲まれた部分を意味する。
第１シード層部３０１はマスク層４０に隣接して位置するので、第１シード層部３０１の表面エネルギーは第２シード層部３０３の表面エネルギーより大きい。これは開口部４０２が一つ以上の辺を有することに起因する。したがって、ナノチューブ５２は表面エネルギーが高い第１シード層部３０１の上にのみ形成される。
【００４４】
図１７は、本発明の第３実施例によるナノデバイス３００を概略的に示す。図１７のナノデバイス３００の構造は、ナノチューブ５３を除いては図１６のナノデバイス２００の構造と類似しているので、同一の部分には同一図面符号を使用し、その詳細な説明を省略する。
図１７に示したように、三角柱形状を有するナノチューブ５３を製造する。開口部４０３を三角形形状に形成する場合、開口部４０３の周縁に沿ってナノチューブ５３が成長するので、三角柱形状を有する複数のナノチューブ５３が製造される。
前述のように、開口部の形状を円や多角形に形成することによって所望の形状のナノチューブを自由に製造することができる。したがって、所望の形状のナノチューブを製造して、ナノチューブを各種素子に適用することができる。そして、複数のナノチューブの間の距離も所望の通りに調節することができるので、各種素子に適用するのに適している。
これと対照的に、従来は、ナノチューブの形状及び配置を所望の通りに調節することができなかったので、素子応用に限界があった。反面、本発明の実施例では、ナノチューブを所望の形状に形成及び配置することができるので、前述の問題点を簡単に解決することができる。
【００４５】

図１８は、本発明の第４実施例によるナノデバイス４００を概略的に示す。図１８のナノデバイス４００は、ナノ壁５４を除いては図１６のナノデバイス２００と類似しているので、同一の部分には同一図面符号を使用し、その詳細な説明を省略する。

図１８に示したように、マスク層４０をシード層３０の上に形成した後、線状開口部４０４をマスク層４０に形成する。したがって、有機金属化学気相蒸着法を使用する場合、ナノ壁５４は開口部４０４を通してのみ成長する。その結果、ナノ壁５４を容易に製造することができる。ここで、開口部４０４はＸ字形態を有するので、Ｘ字形態のナノ壁５４を製造することができる。

【００４６】

図１９は、本発明の本発明の第５実施例によるナノデバイス５００を概略的に示す。図１９のナノデバイス５００は、ナノ壁５５を除いては図１８のナノデバイス４００と類似しているので、同一の部分には同一図面符号を使用し、その詳細な説明を省略する。

図１９に示したように、開口部４０５を波形態の線状に形成することによっての波形状を有するナノ壁５５を製造する。したがって、開口部４０５の形状を所望の通りに調節して多様な形状のナノ壁５５を形成することができる。また、ナノ壁５５の配置形態を所望の通りに調節する。したがって、ナノ壁５５間の間隔を所望の通りに調節することができる。

これと対照的に、従来は、ナノ壁５５の形状及び配置を所望の通りに調節することができなかったので、素子応用に限界があった。反面、本発明の実施例では、ナノ壁５５を所望の形状に形成及び配置することができるので、このような問題点がない。

【実施例】

【００４７】

以下、実験例を通して本発明をより詳細に説明する。このような実験例は単に本発明を例示するためのものであり、本発明がここに限定されるわけではない。

【００４８】

［実験例１］

単結晶シリコン基板上に窒化ガリウムからなるシード層を形成した。有機金属化学気相蒸着法を利用して窒化ガリウムエピタキシャルシード層を製造するために、バッファー層として窒化アルミニウムを１０ｎｍ～５０ｎｍで形成した。次に、シード層をバッファー層上に形成した。

シード層をパターニングするために、マスク層として非晶質酸化シリコン（SiO_2）または窒化シリコン（ＳｉＮｘ）をシード層の上に蒸着した。この場合、プラズマ化学気相蒸着法（ｐｌａｓｍａ－ｅｎｈａｎｃｅｄ　ｃｈｅｍｉｃａｌ　ｖａｐｏｒ　ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ）を使用した。その結果、約２０ｎｍ～３００ｎｍ厚さのマスク層がシード層上に形成された。マスク層の上にスピンコーティング法で感光樹脂を形成した後ベーキングした。感光樹脂にはＰＭＭＡ（ｐｏｌｙｍｅｔｈｙｌ　ｍｅｔｈａｃｒｙｌａｔｅ、ポリメチルメタクリレート）レジスト（ｒｅｓｉｓｔ）を使用した。

感光樹脂をマスク層上に形成した後、加熱した。そして、感光樹脂を光または電子ビームに所望のパターンで露出させた。次に、感光樹脂を現像液でエッチングし、光に露出した部分のみを除去することによって、マスク層の一部を外部に露出させた。そして、外部に露出したマスク層をエッチングして、感光樹脂のパターンそのままマスク層をエッチングして、シード層を外部に露出させた。次に、有機溶媒を使用して、感光樹脂を除去した。

【００４９】

図２０は、シード層がマスク層を通して所望のパターンの通りに外部に露出した状態を示した走査電子顕微鏡写真である。ここで、黒色はマスク層を示し、灰色はシード層である。

図２０に示したように、黒色のマスク層の開口部を通して三角形、四角形、及び円形のシード層が外部に露出された。上下に大きさが異なる三角形、四角形、及び円形のシード層を形成した。次に、有機金属化学気相蒸着法を利用して、シード層上に酸化亜鉛からな

るナノチューブを形成した。

【００５０】

図２１及び図２２は、各々、図２０のシード層上に形成されたナノチューブの平面走査電子顕微鏡写真及び立体走査電子顕微鏡写真を示す。

図２１及び図２２に示した通り、開口部の周縁に沿って三角形、四角形、及び円形のナノチューブが形成された。開口部の大きさを調節することによって相互大きさが異なる三角形、四角形、及び円形のナノチューブを製造することができる。したがって、実験例１では、ナノチューブの大きさを所望の通りに調節することができる。

【００５１】

図２３乃至図２５は、シード層及びナノチューブのエピタキシャル関係を示す高分解能放射光加速器のＸ線回折グラフである。ここで、Ｘ線として１.５４Åの単色光を使用した。

図２３に示したように、ω－２θ回折スキャンによるＸ線強度を分析した。この場合、シリコンからなる基板が１１１方向のピークを示し、窒化アルミニウムからなるバッファー層が（０００２）方向のピークを示した。そして、窒化ガリウム（ＧａＮ）からなるシード層と酸化亜鉛（ＺｎＯ）からなるナノチューブが全て（０００４）結晶面のピークを示した。したがって、シード層及びナノチューブが同一な方向に配向されたということが分かった。

図２４は、図２３のＸ線回折ピークのうちＸＸＩＶ部分に相当するピークを拡大して示したグラフである。

図２４に示したように、窒化ガリウム（ＧａＮ）からなるシード層のピークと酸化亜鉛（ＺｎＯ）からなるナノチューブのピークがよく分離されて示された。

図２５は、シード層及びナノチューブのエピタキシャル関係を示した方位角（Φ）スキャン回折強度である。

図２５に示したように、窒化ガリウムからなるシード層の（１０１２）回折ピークで方位角を３６０°回転させた場合、

【００５２】

【数３】

$$\{10\bar{1}2\}$$

【００５３】

に相当するピーク６個が観察された。そして、ナノチューブの（１０１２）回折ピークで方位角を３６０°回転させた場合、同一なΦ位置で回折ピークが観察された。これはナノチューブがシード層上でエピタキシャルに成長したことを意味する。

【００５４】

図２６乃至図２８は、各々、ナノチューブの透過電子顕微鏡分析写真である。図２６はナノチューブの透過電子顕微鏡写真であり、図２７はナノチューブの電子回折パターンを示した透過電子顕微鏡分析写真であり、図２８は高分解能の透過電子顕微鏡拡大写真である。

図２６に示したように、ナノチューブの約１５ｎｍの均一な厚さを有して、一方向に成長した。また、図２７に示したナノチューブの電子回折パターンは図２６で得られた回折パターンであって、規則的な回折パターンを示し、ナノチューブが単結晶で成長したことを証明する。図２７の回折パターンには代表的な結晶面の回折パターンを示した。図２６及び図２７は、ナノチューブが［０００１］結晶方向で単結晶として成長したことを示す。そして、図２８に示したように、ナノチューブには電位または積層欠陥などが観察されなかったので、結晶欠陥がないナノチューブが製造されたことを示した。

【００５５】

図２９は、低温及び常温光発光分光（ｐｈｏｔｏｌｕｍｉｎｅｓｃｅｎｃｅ　ｓｐｅｃｔｒｕｍ）測定によるナノチューブの発光スペクトルグラフを示す。ここで、低温は１０

Ｋ程度を意味する。
図２９に示したように、１０Ｋの低温光発光分光によって、３．２９ｅＶ（図３０に図示）、３．３１７ｅＶ、３．３５８ｅＶ、及び３．４５１ｅＶの光子エネルギー位置で主要ピークが観察された。ここで、３．２９ｅＶ及び３．３１７ｅＶの発光ピークは、ドナー－アクセプター双遷移（ｄｏｎｏｒ－ａｃｃｅｐｔｏｒ　ｐａｉｒ　ｔｒａｎｓｉｔｉｏｎ）による発光に対応する。また、３．３５８ｅＶの発光ピークは、酸化亜鉛ナノチューブのニュートラルドナーに結合された励起子による発光に対応する。そして、３．４５１ｅＶの発光ピークは、窒化ガリウムシード層でニュートラルドナーに結合された励起子の発光に対応する。
酸化亜鉛ナノチューブの発光有効体積は窒化ガリウムシード層の発光有効体積の約７／１０００であるにもかかわらず、その発光強度が高くて光学的特性が非常に優れていた。これは高純度の前駆体及び気体を用いた非触媒有機金属化学気相蒸着法によって、高純度単結晶を有する高い品質のナノチューブが製造されたことを示す。
【００５６】
図３０は、常温の光発光分光結果である。３．２９ｅＶでＮＢＥ（Ｎｅａｒ－ｂａｎｄ－ｅｄｇｅ）発光が明確に観察された。また、結晶欠陥によって発光する２．２ｅＶの発光が観察されなかったので、優れた結晶性を有するナノチューブであることが立証された。
【００５７】
［実験例２］
実験例２では、前述の実験例１の方法と同一な方法を利用して複数のナノチューブを形成した。実験例２では、開口部の間隔を各々、２．４μｍ、１．６μｍ、１．２μｍ、及び０．８μｍに調節して、円形断面を有する複数のナノチューブを製造した。
図３１乃至図３４は、複数のナノチューブ間の間隔を各々、各々、２．４μｍ、１．６μｍ、１．２μｍ、及び０．８μｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。また、図３５乃至図３８は、複数のナノチューブ間の間隔を各々、各々、２．４μｍ、１．６μｍ、１．２μｍ、及び０．８μｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。したがって、図３１は図３５に対応し、も３２は図３６に対応し、図３３は図３７に対応し、図３４は図３８に対応する。
図３１乃至図３８に示したように、本発明の実験例２では複数のナノチューブ間の間隔を所望の通りに調節することができた。したがって、複数のナノチューブを規則的に配列することによって集積度の高いナノ素子を製造することができる。
【００５８】
［実験例３］
実験例３では、前述の実験例２の方法と同一な方法を利用して複数のナノチューブを形成した。実験例３では、ナノチューブの直径を各々、２００ｎｍ、４００ｎｍ、６００ｎｍ、及び８００ｎｍに調節して、円形断面を有する複数のナノチューブを製造した。
図３９乃至図４２は、複数のナノチューブの直径を各々、２００ｎｍ、４００ｎｍ、６００ｎｍ、及び８００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの立体走査電子顕微鏡写真である。また、図４３乃至図４６は、複数のナノチューブの直径を各々、２００ｎｍ、４００ｎｍ、６００ｎｍ、及び８００ｎｍに調節して製造したナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真である。したがって、図３９は図４３に対応し、図４０は図４４に対応し、図４１は図４５に対応し、図４２は図４６に対応する。
図３９乃至図４６に示したように、本発明の実験例３では複数のナノチューブの直径を所望の通りに調節することができた。したがって、複数のナノチューブの直径を調節することによって性能が多様なナノ素子を製造することができる。
【００５９】
［実験例４］
本発明の実験例４では、前述の本発明の実験例１の方法と同一な方法を使用してナノデバイスを製造した。ただし、開口部を線状乃至曲線状に形成して、シード層の上にナノ壁

を製造した。

図４７及び図４８は、各々、ＰＯＳＴＥＣＨという字に形成されたナノデバイスの平面走査電子顕微鏡写真及び立体走査電子顕微鏡写真である。図４７及び図４８に示したように、開口部を多様な線形態に形成することによって所望の形状を有するナノ壁を形成することができる。したがって、本発明の実験例４ではナノ壁の位置及び形状を所望の通りに調節することができた。

【００６０】

［実験例５］

前述の実験例１乃至実験例３と同一な方法を利用してナノデバイスを製造した。８００μｍ×８００μｍ大きさの基板に約２００μｍの直径及び約２.８μｍの長さを有する複数のナノチューブを製造した。ここで、複数のナノチューブ間の間隔を各々、１μｍ、２μｍ、３μｍ、６μｍ、９μｍ、及び１２μｍにして、六角形形態に配列した。このような方法を利用して製造したナノチューブの上端に電極を設置し、電極及び基板を電源に連結した。したがって、ナノチューブに電界を印加する場合、ナノチューブから光が放出される発光素子を製造した。ここで、発光素子の構造は図１４の発光素子の構造と同一であった。

【００６１】

図４９は、発光素子に印加する電界により発光素子から放出される電流密度を示したグラフである。

図４９に示したように、複数のナノチューブ間の間隔が大きくなるほど放出電流密度が増加することが分かった。したがって、複数のナノチューブ間の間隔が６μｍになるまでは放出電流密度が増加した。しかし、複数のナノチューブ間の間隔がより大きくなれば放出電流密度は減少した。

【００６２】

図５０は、図４９をファウラーノルドハイム（Ｆｏｗｌｅｒ－Ｎｏｒｄｈｅｉｍ）変換したグラフである。

図５０に示したように、複数のナノチューブ間の間隔が大きくなることに伴ってベータ値が増加した。ここで、ベータ値は、ナノチューブに印加される局部電界を示す尺度である。ベータ値が高くなるほど放出電流密度は高くなる。したがって、ナノチューブ間の間隔が大きくなれば発光素子の電界放出性能が向上する。したがって、ナノチューブの位置を調節して発光効率の高い電界放出発光素子を製造できるということが立証された。

【００６３】

図５１は、ナノチューブ間の間隔が６μｍである発光素子の放出電流密度の安定性を示したグラフである。

図５１は、図５０のｘ軸で約１０Ｖ／μｍの電界を印加した時の放出電流密度を時間に従って測定した結果を示す。図５１に示したように、約４０００秒間の発光素子の放出電流密度は一定に維持された。したがって、発光素子の放出電流密度がほとんど変わらないので、発光素子が安定的に作動することを確認することができた。

【００６４】

図５２及び図５３は、各々、暗室及び室内照明を備えた部屋で撮影した発光素子の発光写真である。

図５２に示したように、発光素子は暗室で光をよく放出した。また、図５３に示したように、発光素子は室内照明を備えた部屋でも光を十分に放出した。したがって、発光素子が場所に構わずに光をよく放出するので、発光素子をディスプレイ装置に使用することができる。

【符号の説明】

【００６５】

１０　基板

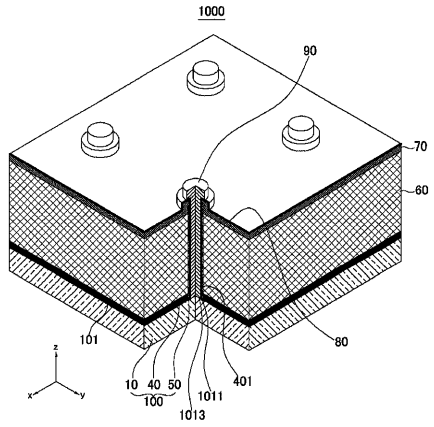
１２　電極

１４　電源

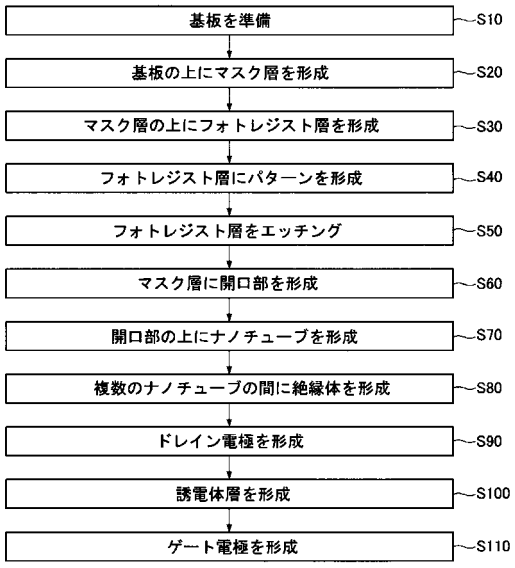
１６　反応性物質
１８　表示部
２０　バッファー層
３０　シード層
４０　マスク層
４５　フォトレジスト層
５０、５２、５３　ナノチューブ
５４、５５　ナノ壁
６０　絶縁体
７０　ドレーン電極
８０　誘電体層
９０　ゲート電極
１００、２００、３００、４００、５００　ナノデバイス
１０１　基板の板面
３０１　第１シード層部
３０３　第２シード層部
４０１、４０２、４０３、４０４、４０５　開口部
５０１　ナノチューブの外面
５０２　ナノチューブの内面
５０５　ナノチューブの下端部
１０００　トランジスタ
１０１１　第１基板部
１０１３　第２基板部
２０００　発光素子
３０００　バイオセンサー

【図１】

[FIG. 1]

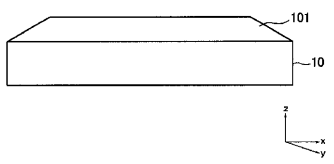


【図２】



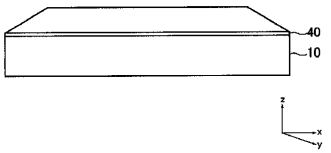
【図３】

[FIG. 3]



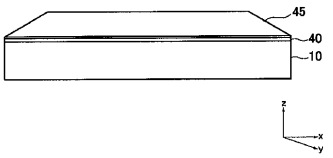
【図４】

[FIG. 4]



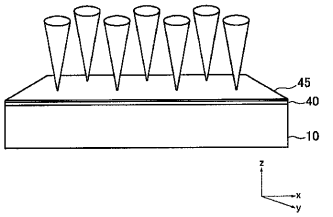
【図５】

[FIG. 5]



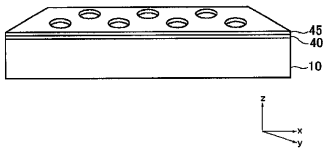
【図６】

[FIG. 6]



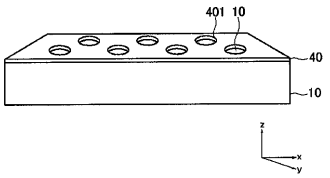
【図７】

[FIG. 7]



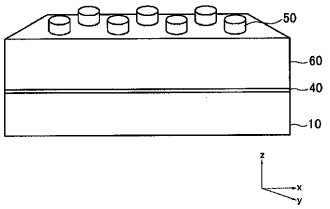
【図８】

[FIG. 8]



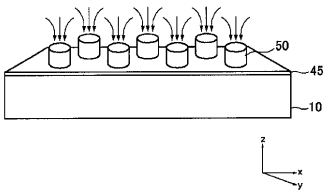
【図９】

[FIG. 9]



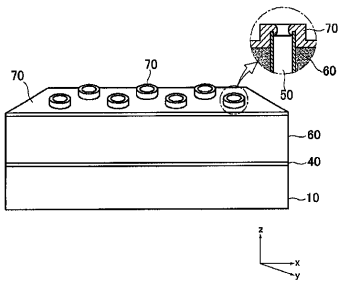
【図１０】

[FIG. 10]



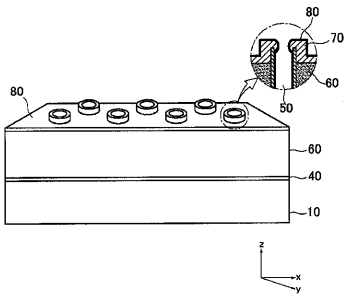
【図１１】

[FIG. 11]



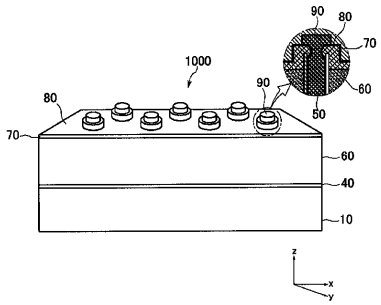
【図１２】

[FIG. 12]



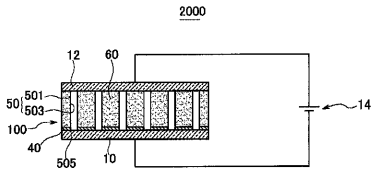
【図１３】

[FIG. 13]



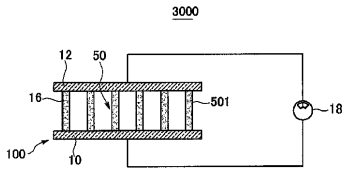
【図１４】

[FIG. 14]



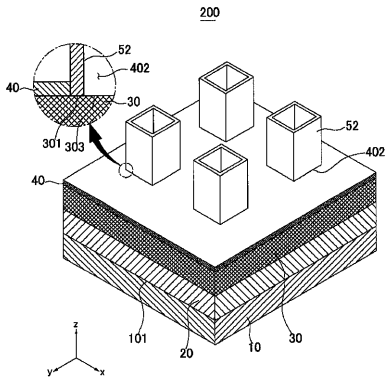
【図１５】

[FIG. 15]



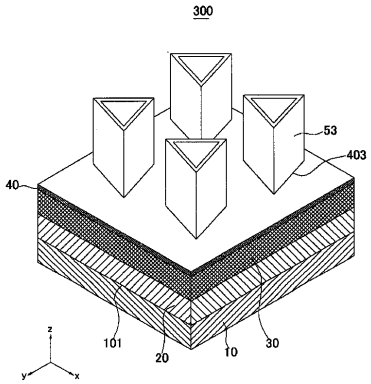
【図１６】

[FIG. 16]



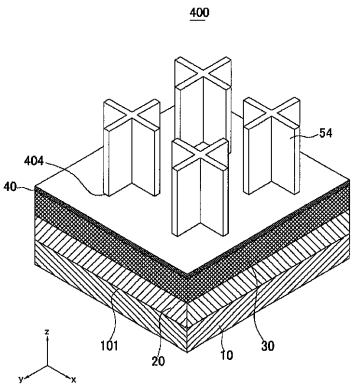
【図１７】

[FIG. 17]



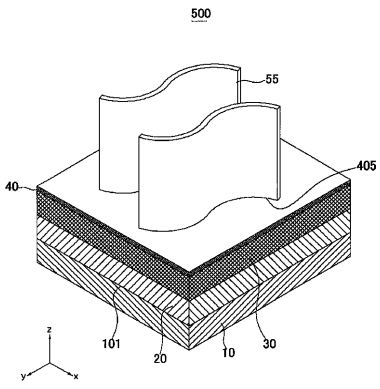
【図１８】

[FIG. 18]



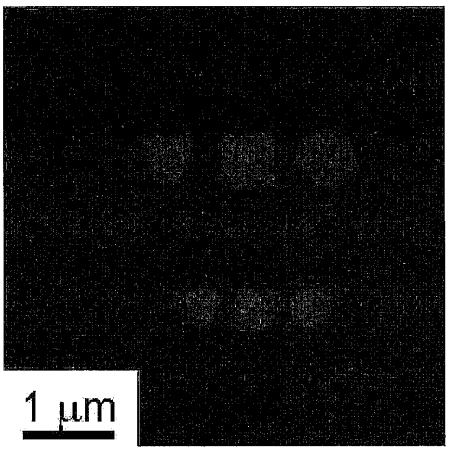
【図１９】

[FIG. 19]



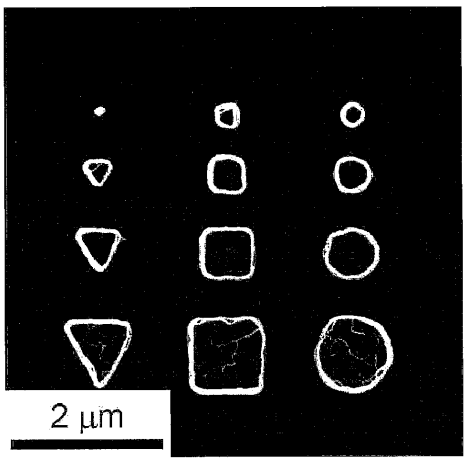
【図２０】

[FIG. 20]



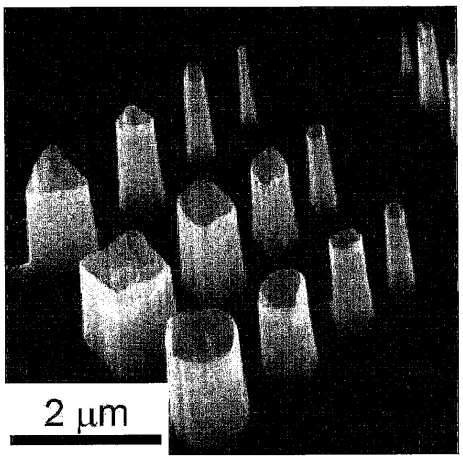
【図２１】

[FIG. 21]

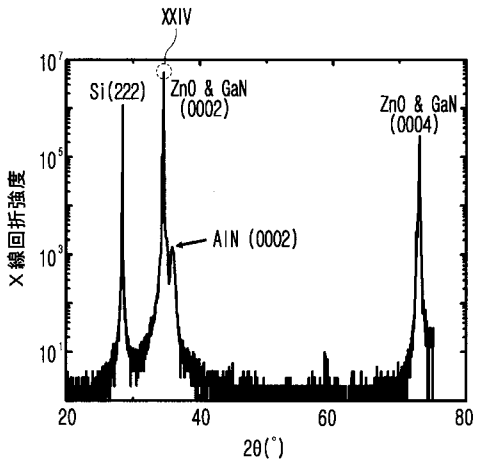


【図２２】

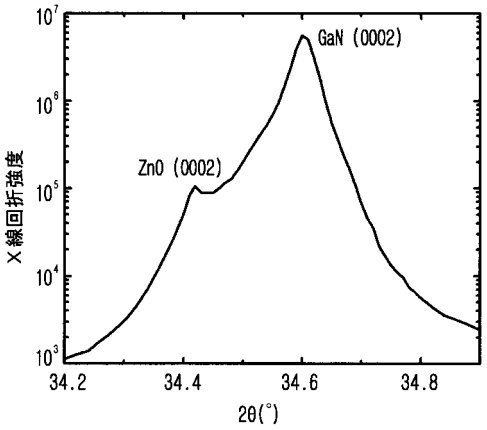
[FIG. 22]



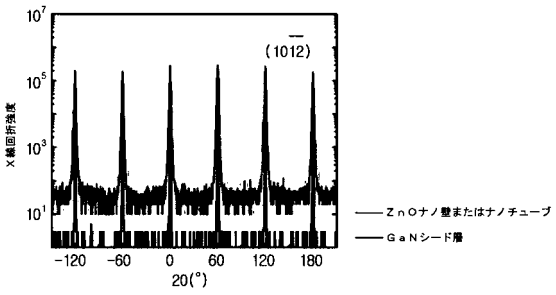
【図２３】



【図２４】

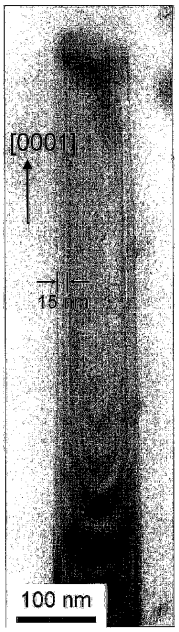


【図２５】



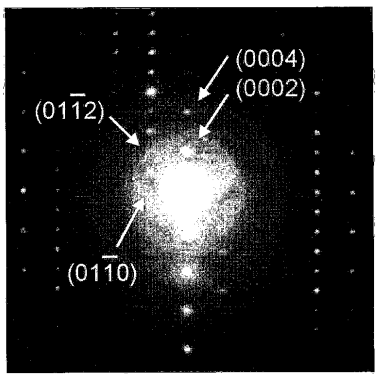
【図２６】

[FIG. 26]



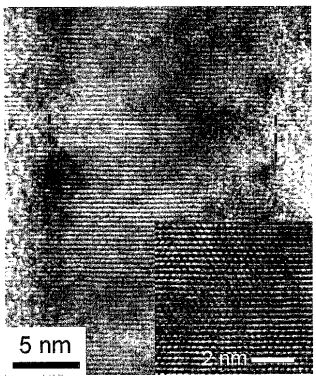
【図２７】

[FIG. 27]

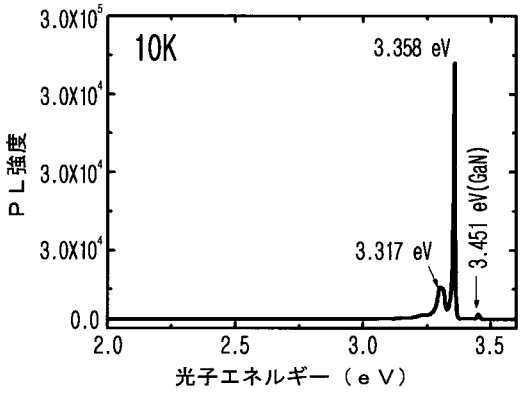


【図２８】

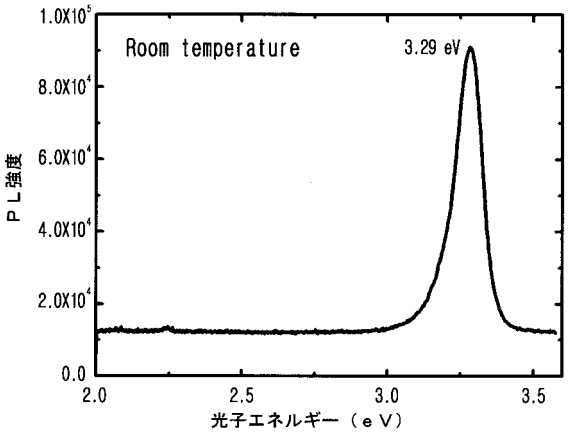
[FIG. 28]



【図２９】

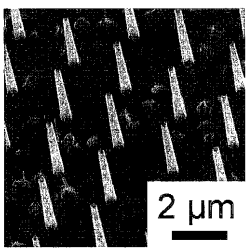


【図３０】



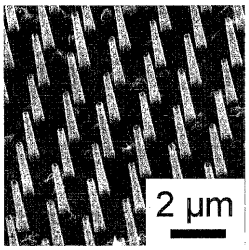
【図３１】

[FIG. 31]



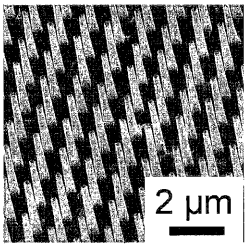
【図３２】

[FIG. 32]



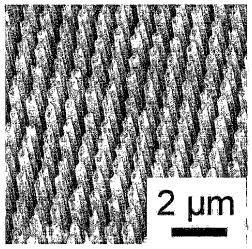
【図３３】

[FIG. 33]



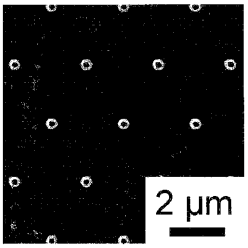
【図３４】

[FIG. 34]



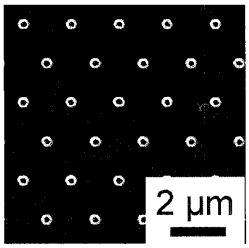
【図３５】

[FIG. 35]



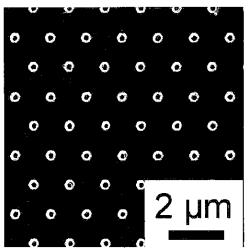
【図３６】

[FIG. 36]



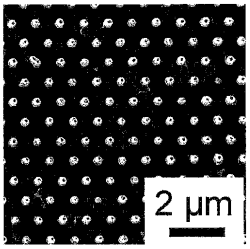
【図３７】

[FIG. 37]



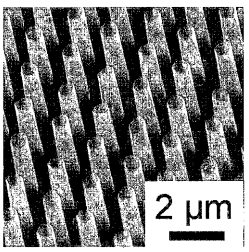
【図３８】

[FIG. 38]



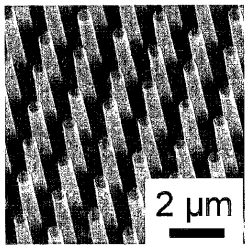
【図３９】

[FIG. 39]



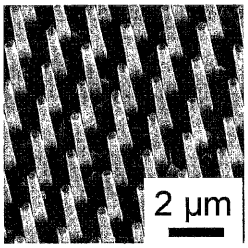
【図４０】

[FIG. 40]



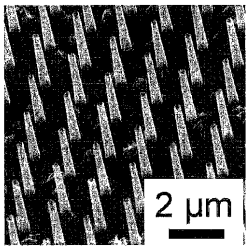
【図４１】

[FIG. 41]



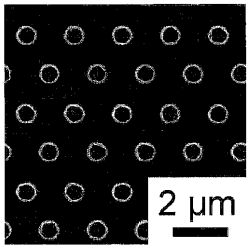
【図４２】

[FIG. 42]



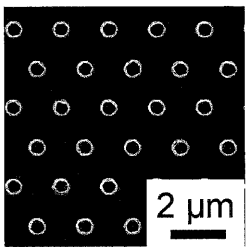
【図４３】

[FIG. 43]



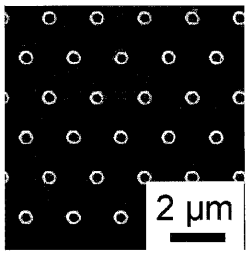
【図４４】

[FIG. 44]



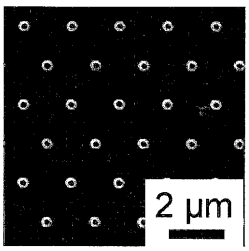
【図４５】

[FIG. 45]



【図４６】

[FIG. 46]



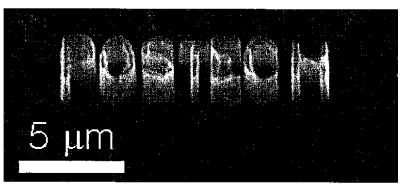
【図４７】

[FIG. 47]

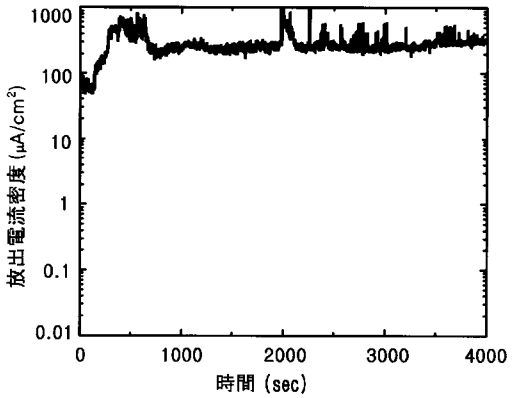


【図４８】

[FIG. 48]

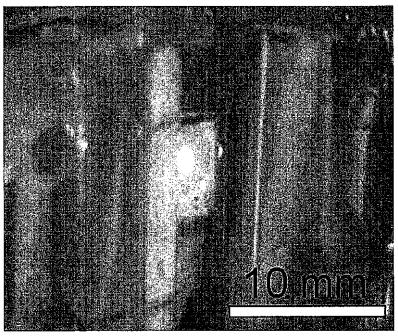


【図５１】



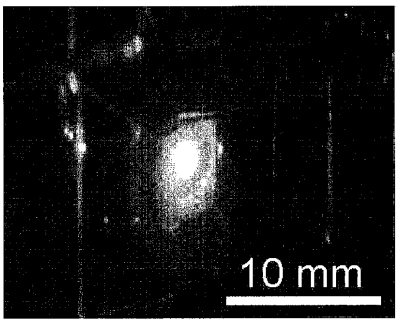
【図５３】

[FIG. 53]

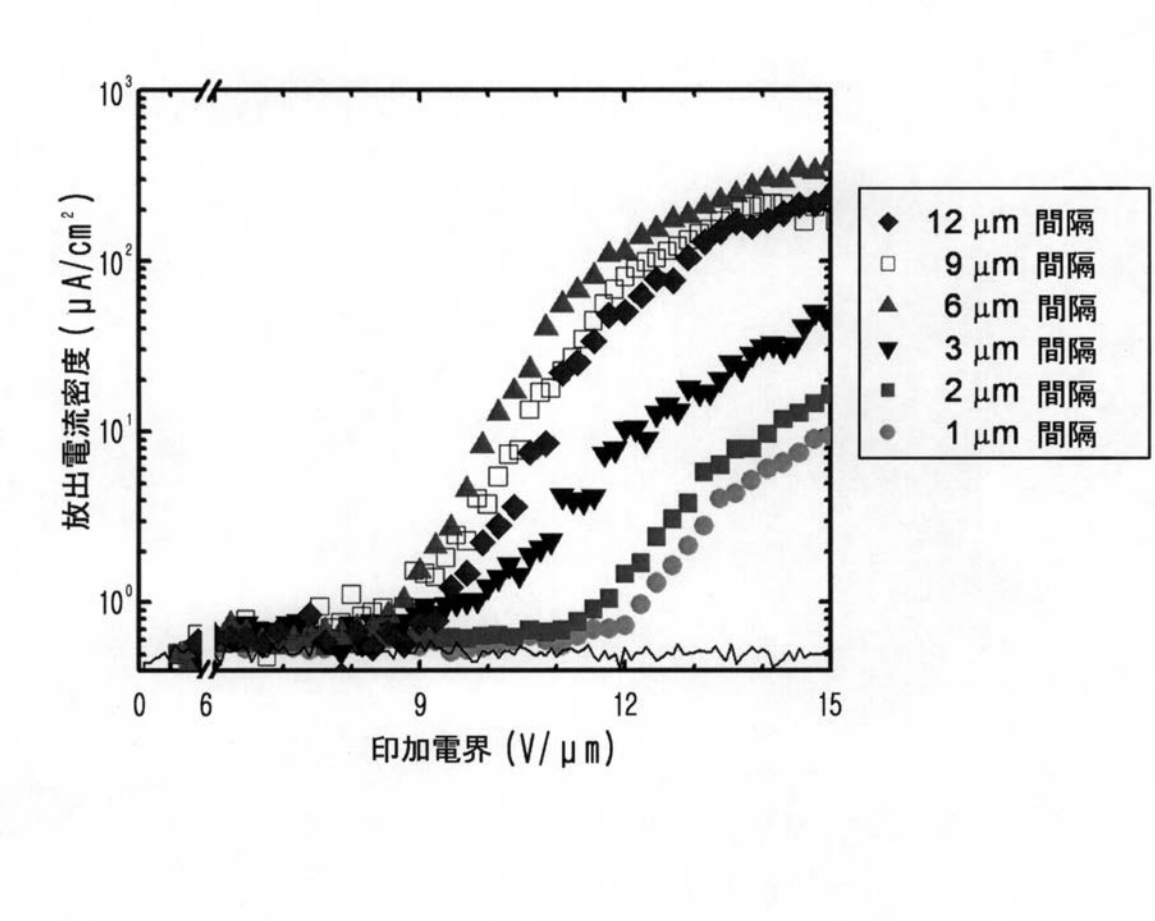


【図５２】

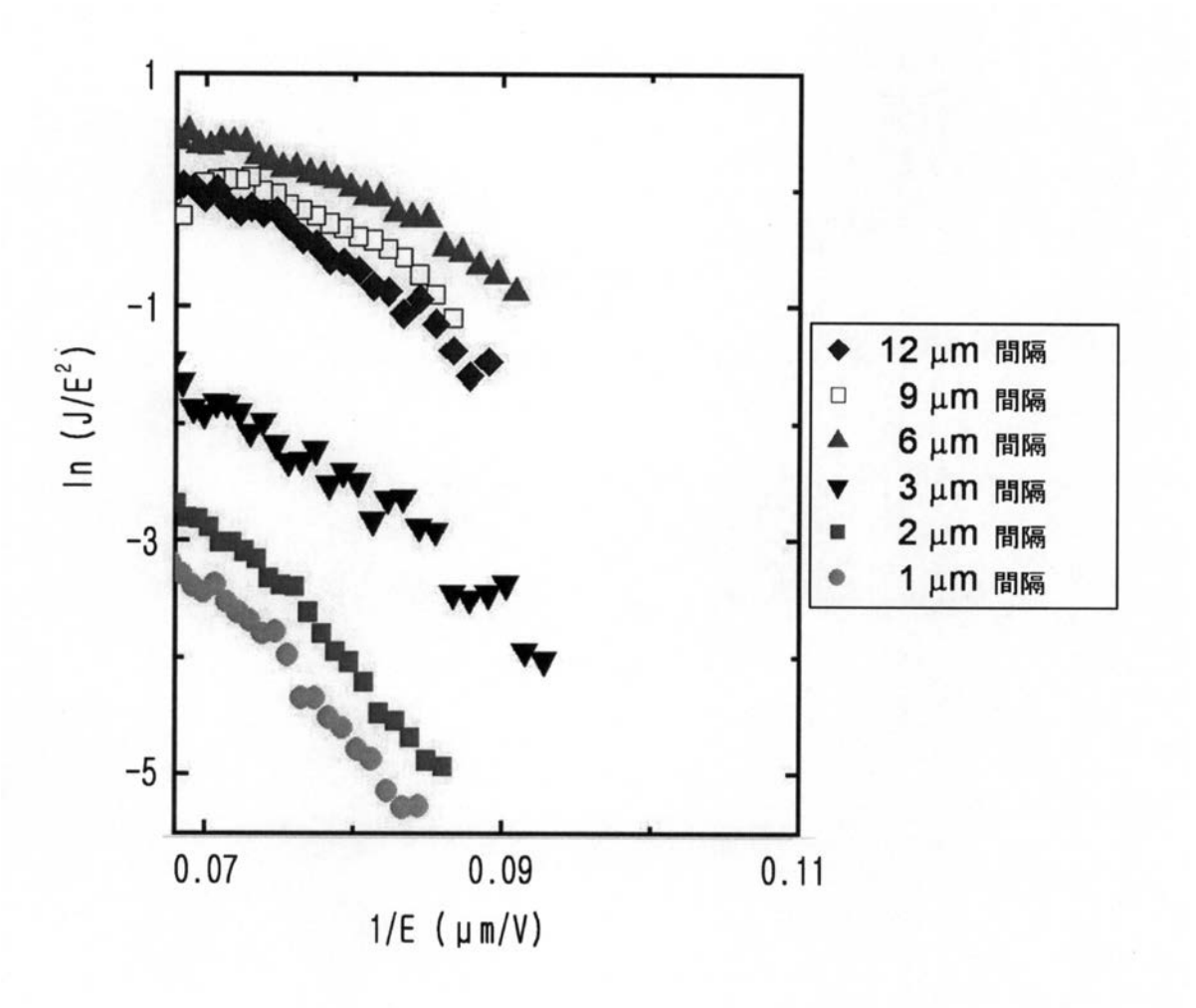
[FIG. 52]



【図４９】



【図５０】


1
-1
-3
-5
ln (J/E²)
0.07
0.09
0.11
1/E (μm/V)
12 μm 間隔
9 μm 間隔
6 μm 間隔
3 μm 間隔
2 μm 間隔
1 μm 間隔

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H01L 33/06 (2010.01) H01L 33/00 112

(72)発明者 ホン，ヨンージュン
大韓民国，キョンギード ４４８－１４０，ヨンインーシ，スチーグ，ソンボクードン，エルジービレッジ ３ チャ ３１１－２０３
(72)発明者 イ，ギューチョル
大韓民国，キュンサンブクード ７９０－７５１，ポハンーシティ，ナムーク，ジゴクードン，７５６，ファクルティ アパートメント，９－２２０２

審査官 行武 哲太郎

(56)参考文献 国際公開第２００４／１０５１４０（WO，A1）
特表２００９－５３９７５６（ＪＰ，A）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｌ ２９／００－２９／３８
Ｈ０１Ｌ ２９／６６