

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4334246号
(P4334246)

(45) 発行日 平成21年9月30日(2009.9.30)

(24) 登録日 平成21年7月3日(2009.7.3)

(51) Int.Cl.		F I		
HO 1 L 29/06	(2006.01)	HO 1 L 29/06	GO 1 D	
HO 1 L 29/66	(2006.01)	HO 1 L 29/66	S	
HO 1 L 29/80	(2006.01)	HO 1 L 29/80	A	

請求項の数 10 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2003-51177 (P2003-51177)	(73) 特許権者	000005223 富士通株式会社
(22) 出願日	平成15年2月27日(2003.2.27)		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(65) 公開番号	特開2004-260078 (P2004-260078A)	(74) 代理人	100087479 弁理士 北野 好人
(43) 公開日	平成16年9月16日(2004.9.16)	(74) 代理人	100114915 弁理士 三村 治彦
審査請求日	平成17年8月11日(2005.8.11)	(72) 発明者	宋 海智 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	小川 将之

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子半導体装置及びその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板上に形成され、二次元キャリアガスが形成された第1の半導体層と、
前記第1の半導体層上に形成された量子ドットと、
前記第1の半導体層上に、前記量子ドットを埋め込むように形成された第2の半導体層と、
前記第2の半導体層表面における前記量子ドット上の位置に形成されたドット状の構造体と、
前記ドット状の構造体の両側における前記第2の半導体層表面に形成された酸化物層とを有することを特徴とする量子半導体装置。

【請求項2】

請求項1記載の量子半導体装置において、
前記量子ドットは、S-Kモードにより自己形成された三次元成長島より成ることを特徴とする量子半導体装置。

【請求項3】

請求項1又は2記載の量子半導体装置において、
前記ドット状の構造体は、S-Kモードにより自己形成された三次元成長島より成ることを特徴とする量子半導体装置。

【請求項4】

請求項1乃至3のいずれか1項に記載の量子半導体装置において、

前記酸化物層の存在により、前記第1の半導体層のうちの前記酸化物層の下方領域に空乏化領域が形成されており、
前記空乏化領域により、チャネル領域が画定されている
ことを特徴とする量子半導体装置。

【請求項5】

請求項4記載の量子半導体装置において、
前記チャネル領域の両端に接続されたソース/ドレイン領域を更に有する
ことを特徴とする量子半導体装置。

【請求項6】

請求項1乃至5のいずれか1項に記載の量子半導体装置において、
前記ドット状の構造体の少なくとも一部が酸化されている
ことを特徴とする量子半導体装置。

10

【請求項7】

基板上に、二次元キャリアガスが形成された第1の半導体層を形成する工程と、
前記第1の半導体層上に、量子ドットを形成する工程と、
前記量子ドットを埋め込むように第2の半導体層を形成する工程と、
前記量子ドットの存在により前記第2の半導体層表面に生ずる歪により、前記第2の半導体表面における前記量子ドットの上方の位置に、ドット状の構造体を形成する工程と、
前記ドット状の構造体を目印として、前記ドット状の構造体の両側における前記第2の半導体層の表面に酸化物層を形成する工程と
を有することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

20

【請求項8】

請求項7記載の量子半導体装置の製造方法において、
前記酸化物層を形成する工程の後に、前記酸化物層を目印として、ソース/ドレイン領域を形成する工程を更に有する
ことを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【請求項9】

請求項7又は8記載の量子半導体装置の製造方法において、
前記量子ドットを形成する工程では、S-Kモードにより自己形成することにより、三次元成長島より成る前記量子ドットを形成する
ことを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

30

【請求項10】

請求項7乃至9のいずれか1項に記載の量子半導体装置の製造方法において、
前記ドット状の構造体を形成する工程では、S-Kモードにより自己形成することにより、三次元成長島より成る前記ドット状の構造体を形成する
ことを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、量子半導体装置及びその製造方法に係り、特に量子ドットを有する量子半導体装置及びその製造方法に関する。

40

【0002】

【従来の技術】

近年、MOSトランジスタ等の半導体装置の微細化が、急速に進められている。

【0003】

しかし、MOSトランジスタ等の半導体装置の微細化には限界がある。例えば、MOSトランジスタにおいてゲート長を短くしすぎると、正常にスイッチングすることができなくなってしまう。

【0004】

そこで、更なる微細化を実現しうるデバイスとして、単一電子デバイスが提案されている

50

。単一電子デバイスは、消費電力が非常に小さいため、低消費電力化の観点からも大きな注目を集めている。

【0005】

例えば、特許文献1では、二次元電子構造を有する半導体上に複数に分割された第1のゲート電極が形成され、第1のゲート電極により囲まれた領域上に絶縁膜を介して第2のゲート電極が形成された単一電子トランジスタが提案されている。このような単一電子トランジスタでは、第1のゲート電極に電圧を印加することにより生じる空乏層により、電子閉じ込め領域が形成される。そして、第2の電極に電圧を印加することにより、単一の電子の移動を制御することが可能となる。

【0006】

また、特許文献2では、量子線を用いて単一電子トランジスタを構成することが提案されている。

【0007】

また、特許文献3では、半導体表面に形成された凹部内に量子箱を形成することにより構成された単一電子トランジスタが提案されている。

【0008】

しかしながら、上記のような提案されている単一電子デバイスは、比較的大きな領域に電子を閉じ込めるものであるため、離散的なエネルギー準位を得ることができず、クーロンブロックのような古典的な効果しか得られなかった。しかも、温度を十分に低く設定しなければ、クーロンブロックを起こすことができなかった。

【0009】

比較的高温においてクーロンブロックを起こすためには、量子ドットを微小に形成することが必要である。微小な量子ドットにおいては離散的なエネルギー準位が得られるため、比較的高温においてもクーロンブロックを起こすことが可能となる。例えば、室温においてクーロンブロックを起こすためには、量子ドットのサイズを10nm程度以下に設定する必要がある。

【0010】

特許文献4では、基板に形成された段差の側壁部に微小な量子ドットが形成され、量子ドットを覆うようにゲート電極が形成された単一電子デバイスが提案されている。特許文献4では、微小な量子ドットが用いられているため、比較的高温における動作が可能となる。

【0011】

【特許文献1】

特開平6-196720号公報

【特許文献2】

特表2002-518851号公報

【特許文献3】

特開平10-303408号公報

【特許文献4】

特開平11-150261号公報

【特許文献5】

特開平05-211342号公報

【特許文献6】

特開2000-91451号公報

【特許文献7】

特開2001-7315号公報

【非特許文献1】

Keyser et al., Appl. Phys. Lett. 76, 457 (2000)

【非特許文献2】

T. Fujisawa et al., Phys. Rev. B63, 081304R (2001)

10

20

30

40

50

【 0 0 1 2 】

【 発明が解決しようとする課題 】

しかしながら、特許文献 4 において提案されている単一電子デバイスは、動作が極めて複雑であり、実用化が困難であった。

【 0 0 1 3 】

本発明の目的は、微小な量子ドットを用いた有用な量子半導体装置及びその製造方法を提供することにある。

【 0 0 1 4 】

【 課題を解決するための手段 】

上記目的は、基板上に形成され、二次元キャリアガスが形成された第 1 の半導体層と、前記第 1 の半導体層上に形成された量子ドットと、前記第 1 の半導体層上に、前記量子ドットを埋め込むように形成された第 2 の半導体層と、前記第 2 の半導体層表面における前記量子ドット上の位置に形成されたドット状の構造体と、前記ドット状の構造体の両側における前記第 2 の半導体層表面に形成された酸化物層とを有することを特徴とする量子半導体装置により達成される。

10

【 0 0 1 5 】

また、上記目的は、基板上に、二次元キャリアガスが形成された第 1 の半導体層を形成する工程と、前記第 1 の半導体層上に、量子ドットを形成する工程と、前記量子ドットを埋め込むように第 2 の半導体層を形成する工程と、前記量子ドットの存在により前記第 2 の半導体層表面に生ずる歪により、前記第 2 の半導体層表面における前記量子ドットの上方の位置に、ドット状の構造体を形成する工程と、前記ドット状の構造体を目印として、前記ドット状の構造体の両側における前記第 2 の半導体層の表面に酸化物層を形成する工程とを有することを特徴とする量子半導体装置の製造方法により達成される。

20

【 0 0 1 6 】

【 発明の実施の形態 】

本発明の一実施形態による量子半導体装置及びその製造方法を図 1 乃至図 8 を用いて説明する。図 1 は、本実施形態による量子半導体装置を示す斜視図である。図 2 は、本実施形態による量子半導体装置を示す断面図及び平面図である。図 2 (a) は断面図であり、図 2 (b) は平面図である。図 2 (a) は、図 2 (b) の A - A 線断面図である。

【 0 0 1 7 】

(量子半導体装置)

まず、本実施形態による量子半導体装置について図 1 及び図 2 を用いて説明する。

30

【 0 0 1 8 】

図 1 及び図 2 に示すように、基板 1 0 上には、ノンドープの AlGaAs 層 1 2 が形成されている。基板 1 0 としては、例えば GaAs より成る半絶縁性基板を用いる。AlGaAs 層 1 2 は、バッファ層として機能するものである。AlGaAs 層 1 2 の厚さは、例えば 2 0 0 n m 程度となっている。

【 0 0 1 9 】

AlGaAs 層 1 2 上には、n - AlGaAs 層 1 4 が形成されている。n - AlGaAs 層 1 4 の厚さは、例えば 1 0 ~ 2 0 n m となっている。

40

【 0 0 2 0 】

n - AlGaAs 層 1 4 上には、ノンドープの AlGaAs 層 1 6 が形成されている。AlGaAs 層 1 6 は、スペーサ層として機能するものである。AlGaAs 層 1 6 の厚さは、例えば 5 ~ 1 0 n m 程度となっている。

【 0 0 2 1 】

AlGaAs 層 1 6 上には、半導体層、具体的にはノンドープの GaAs 層 1 8 が形成されている。GaAs 層 1 8 の厚さは、例えば 5 n m 程度となっている。

【 0 0 2 2 】

n - AlGaAs 層 1 4、ノンドープの AlGaAs 層 1 6、及びノンドープの GaAs 層 1 8 により、二次元電子ガス (2 D E G) を形成するための変調ドープ構造が構成され

50

ている。このような変調ドープ構造においては、GaAs層18に二次元電子ガス19（図5参照）が形成される。本実施形態において、n-AlGaAs層14を下層側に形成し、ノンドープのGaAs層18を上層側に形成しているのは、量子ドット20と二次元電子ガス19との間の距離を短く設定するためである。二次元電子ガス19と量子ドット20との距離は、例えば5nm以下に設定することが望ましい。なお、図1においては、二次元電子ガス19が省略されている。

【0023】

なお、ここでは、n-AlGaAs層14上にノンドープのAlGaAs層16を介してノンドープのGaAs層18が形成された構造を例に説明したが、二次元電子ガス19を形成するための構造は、このような構造に限定されるものではない。例えば、ノンドープのGaAs層18上に、ノンドープのAlGaAs層16を介して、n-AlGaAs層14を形成してもよい。但し、量子ドット20と二次元電子ガス19との距離を短く設定するためには、上述したような構造の方が有利である。

10

【0024】

ノンドープのGaAs層18上には、量子ドット20が形成されている。量子ドット20は、S-Kモードにより自己形成された三次元成長島より成るものである。量子ドット20の材料としては、GaAs層18と格子定数が異なる材料が用いられている。例えば、量子ドット20の材料として、例えばInAs、InGaAs、又はInAlAs等を用いることができる。量子ドット20は、例えば30nm以下の小さいサイズで形成されている。なお、上述したように、量子ドットにおいて離散的なエネルギー準位を形成するためには、量子ドットを小さめに形成することが望ましい。

20

【0025】

ノンドープのGaAs層18上には、量子ドット20を埋め込むように、半導体層22、具体的には、ノンドープのGaAs層が形成されている。半導体層22の厚さは、例えば5~15nm以下となっている。半導体層22の表面には、半導体層22により埋め込まれた量子ドット20の存在により、結晶歪が生じている。

【0026】

なお、ここでは、半導体層22の厚さを5~15nm程度と比較的薄めに形成したが、半導体層22の厚さは、5~15nm程度に限定されるものではない。例えば、半導体層22を厚めに形成してもよい。半導体層22を厚めに形成すれば、量子ドット20とドット状の構造体24との結合を防止することが可能となる。

30

【0027】

半導体層22の表面には、ドット状の構造体24が形成されている。ドット状の構造体24は、半導体層22の表面における量子ドット20上の位置に正確に形成されている。ドット状の構造体24は、S-K (Stranski-Krastanow) モードにより自己形成された三次元成長島より成るものである。

【0028】

S-Kモードとは、エピタキシャル成長される半導体結晶が、成長開始当初は二次元成長（膜成長）するが、膜の弾性限界を超えた段階で三次元成長するモードのことである。下地の材料と格子定数が異なる膜をエピタキシャル成長することにより、三次元成長島より成る量子ドットが自己形成される。S-Kモードは、量子ドットを容易に自己形成することができるモードであるため、光半導体装置等の分野で広く用いられている。

40

【0029】

なお、ドット状の構造体24が、半導体層22の表面における量子ドット20上の位置に正確に形成されているのは、半導体層22の表面のうちの結晶歪が生じている箇所に、ドット状の構造体24が自己形成されやすい傾向があるためである。また、ドット状の構造体24は、量子ドットでもよいし、アンチドットでもよい。

【0030】

ドット状の構造体24の材料としては、半導体層22と格子定数が異なる材料が用いられている。例えば、ドット状の構造体24の材料として、InAlAsが用いられている。

50

本実施形態でドット状の構造体 24 の材料として InAlAs を用いているのは、InAlAs より成るドット状の構造体 24 は、電子に対して障壁として機能し、しかも、量子ドット 20 に対して電氣的に悪影響を及ぼさないからである。

【0031】

なお、ここでは、ドット状の構造体 24 の材料として、InAlAs を用いる場合を例に説明したが、ドット状の構造体 24 の材料は InAlAs に限定されるものではない。例えば、ドット状の構造体 24 の材料として、InAs、InGaAs 等を用いてもよい。また、ドット状の構造体 24 の材料として、金属を用いてもよい。

【0032】

図 1 及に示すように、半導体層 22 の表面におけるドット状の構造体 24 の両側には、酸化物層 26a、26b が形成されている。酸化物層 26a、26b の厚さは、例えば 5 nm 程度と厚く形成されている。酸化物層 26a、26b をこのように厚く形成しているのは、GaAs 層 18 のうちの酸化物層 26a、26b の下方領域に空乏化領域 28a、28b を形成し、この空乏化領域 28a、28b によりチャネル領域 29 を画定するためである。

10

【0033】

図 3 は、本実施形態による量子半導体装置のエネルギーバンド構造を示す図(その 1)である。

【0034】

図 3 から分かるように、GaAs 層 18 のうちの酸化物層 26a、26b の下方領域は、空乏化されている。

20

【0035】

なお、酸化物層 26a、26b を厚く形成すると、酸化物層 26a、26b の下方領域に空乏化領域 28a、28b が形成されることは、非特許文献 1 に記載されている。

【0036】

半導体層 22 には、半導体層 22 の表面から GaAs 層 18 に達するように、ソース/ドレイン領域 30a、30b が形成されている。ソース/ドレイン領域 30a、30b は、空乏化領域 28a、28b により画定されたチャネル領域 29 の両端に接続されるように形成されている。

【0037】

ドット状の構造体 24 上には、ゲート電極 32 が形成されている。

30

【0038】

こうして本実施形態による量子半導体装置が構成されている。

【0039】

次に、本実施形態による量子半導体装置の動作について図 4 乃至図 5 を用いて説明する。図 4 は、本実施形態による量子半導体装置のエネルギーバンド構造を示す図(その 2)である。図 4(a) は、ゲート電極に電圧を印加していない状態におけるエネルギーバンド構造を示している。図 4(b) は、ゲート電極に負の電圧を印加した状態におけるエネルギーバンド構造を示している。図 5 は、本実施形態による量子半導体装置の動作を示す概念図である。図 5 は、図 2(b) における B-B 線に沿った断面を示している。図 5(a) は、ゲート電極に電圧が印加されていない状態における動作を示している。図 5(b) は、ゲート電極に負の電圧が印加されている状態における動作を示している。

40

【0040】

ゲート電極 32 に電圧が印加されていない状態においては、エネルギーバンド構造は図 4(a) に示すようになっている。このため、図 5(a) に示すように、二次元電子ガス 19 において電子の移動が遮断されることはない。

【0041】

一方、ゲート電極 32 に電圧が印加されている状態においては、エネルギーバンド構造は、図 4(b) に示すようになる。即ち、フェルミレベル E_f が二次元電子ガスの基底状態より十分に低くなり、二次元電子ガス 19 におけるキャリアが減少する。このため、図 5

50

(b)に示すように、二次元電子ガス19における電子の移動が遮断される。但し、図4(b)に示すように、量子ドット20における量子化レベルとフェルミレベル E_f とが等しくなるようにゲート電極32に印加する電圧を適宜設定すれば、電子は量子ドット20を経由して移動することが可能となる。そして、ゲート電極32に印加する電圧を適宜制御することにより、一つ一つの電子の移動を制御することが可能となる。

【0042】

しかも、本実施形態では、微細な量子ドット20が用いられているため、量子ドット20において離散的なエネルギー準位を形成することができる。このため、量子ドット20において二重障壁構造を得ることができる。このため、本実施形態によれば、比較的高温においても正常に動作し得る量子半導体装置を提供することが可能となる。

10

【0043】

本実施形態による量子半導体装置は、半導体層22の表面における量子ドットの上方の位置にドット状の構造体32が形成されており、ドット状の構造体32を目印として、酸化物層26a、26bが形成されていることに主な特徴がある。

【0044】

一般に、量子ドットを埋め込むように半導体層を形成した後においては、埋め込まれた量子ドットの位置を正確に検出することは極めて困難である。

【0045】

これに対し、本実施形態では、量子ドット20の存在により半導体層22表面に生ずる結晶歪により、半導体層22表面における量子ドット20の上方の位置に正確にドット状の構造体24が形成される。このため、ドット状の構造体24を目印として、酸化物層26a、26bを形成することができる。そして、酸化物層26a、26bを目印として、ソース/ドレイン領域30a、30bを形成することができる。従って、本実施形態によれば、自己形成された微細な量子ドット20を半導体層22により埋め込んだ場合であっても、量子半導体装置を確実に形成することができる。

20

【0046】

また、本実施形態によれば、自己形成された微小な量子ドット20が用いられているため、量子ドット20において離散的なエネルギー準位を得ることができる。このため、比較的高温で動作しうる量子半導体装置を提供することができる。

【0047】

(量子半導体装置の製造方法)

次に、本実施形態による量子半導体装置の製造方法を図6乃至図8を用いて説明する。図6乃至図8は、本実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図である。図6及び図7は、図2(b)におけるA-A線に沿った断面を示している。図8は、図2(b)におけるB-B線に沿った断面を示している。

30

【0048】

まず、図6(a)に示すように、例えばMBE法又はMOCVD法等により、基板10上にノンドープのAlGaAs層12を形成する。基板10としては、例えばGaAsより成る半絶縁性基板を用いる。ノンドープのAlGaAs層12の厚さは、例えば200nmとする。

40

【0049】

次に、例えばMBE法又はMOCVD法等により、ノンドープのAlGaAs層12上に、n-AlGaAs層14を形成する。n-AlGaAs層14の厚さは、例えば10~20nmとする。

【0050】

次に、例えばMBE法又はMOCVD法等により、n-AlGaAs層上に、ノンドープのAlGaAs層16を形成する。ノンドープのAlGaAs層16の厚さは、例えば5~10nm程度とする。

【0051】

次に、例えばMBE法又はMOCVD法等により、ノンドープのAlGaAs層16上に

50

、半導体層、即ちノンドープのGaAs層18を形成する。GaAs層18の厚さは、例えば5nm程度とする。

【0052】

こうして、n-AlGaAs層14、ノンドープのAlGaAs層16、及びノンドープのGaAs層18により、二次元電子ガス(2DEG)を形成するための変調ドープ構造が構成される。このような変調ドープ構造においては、GaAs層18に二次元電子ガスが形成される。GaAs層18における二次元電子ガス19のキャリア密度は、例えば $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度に設定する。二次元電子ガス19におけるキャリア密度をこのように比較的lowめに設定しているのは、ゲート電極32に電圧を印加した際に、ゲート電極32の下方のチャンネル領域29を容易に空乏化し得るようにするためである。なお、n-AlGaAs層14、ノンドープのAlGaAs層16及びノンドープのGaAs層18の厚さやドーパント不純物の濃度を適宜設定することにより、二次元電子ガス19のキャリア密度を適宜設定することが可能である。

10

【0053】

次に、図6(b)に示すように、例えばMBE法又はMOCVD法等により、量子ドット20を形成する。量子ドット20の材料としては、下地であるGaAs層18と格子定数が異なる材料を用いる。例えば、量子ドット20の材料として、InAs、InGaAs、InAlAs等を用いることができる。下地であるGaAs層18の材料と格子定数が異なる材料を用いるため、GaAs層18上には、S-Kモードにより三次元成長島より成る量子ドットが自己形成される。量子ドット20の密度は、例えば $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 程度とする。

20

【0054】

次に、図7(a)に示すように、例えばMBE法又はMOCVD法等により、量子ドット20を埋め込むように半導体層、即ちGaAs層22を形成する。GaAs層22の厚さは、例えば5~15nm程度とする。量子ドット20の存在により、半導体層22の表面における量子ドット20の上方の位置には、結晶歪が生じる。

【0055】

次に、例えばMBE法又はMOCVD法等により、ドット状の構造体24を形成する。ドット状の構造体24の材料としては、下地であるGaAs層22と格子定数が異なる材料を用いる。例えば、ドット状の構造体24の材料として、InAlAsを用いることができる。ドット状の構造体24は、GaAs層22の表面における結晶歪が生じている箇所に自己形成されやすい傾向がある。このため、ドット状の構造体24は、GaAs層22の表面における量子ドット20の上方の位置に正確に形成される。ドット状の構造体24は、量子ドット20の上方に正確に形成されているため、後工程において酸化層26a、26bを形成する際に、酸化層26a、26bを形成すべき領域を認定する際を目印となる。

30

【0056】

次に、図7(b)に示すように、ドット状の構造体24を目印として、GaAs層22の表面におけるドット状の構造体24の両側に、酸化層26a、26bを形成する。酸化層26a、26bの厚さは、例えば5nmとする。酸化層26a、26bは、例えば、原子間力顕微鏡の探針34をGaAs層22の表面に近接し、探針32と基板10との間に電圧を印加しながら、探針34をスキャンすることにより形成することができる。酸化層26a、26bを厚めに形成することにより、GaAs層18のうちの酸化層26a、26bの下方領域に、空乏化領域28a、28bが形成される。目印となるドット状の構造体24の下方に量子ドット20が埋め込まれているため、量子ドット20の両側に、正確に空乏化領域28a、28bが位置する。そして、空乏化領域28a、28bにより、チャンネル領域29が画定される。量子ドット20は、チャンネル領域29上に位置することとなる。

40

【0057】

次に、図8(a)に示すように、酸化層26a、26bとを目印として、チャンネル領域

50

29の両側に接続されるようにソース/ドレイン領域30a、30bを形成する。ソース/ドレイン領域30a、30bは、ソース/ドレイン領域30a、30bを形成すべき領域上に金属膜を堆積し、この後、熱処理により金属を拡散することにより形成することが可能である。

【0058】

酸化物層26a、26bの幅は数百nm程度と比較的大きいため、一般的なフォトリソグラフィ装置、例えば電子ビーム露光装置を用いた場合であっても、酸化物層26a、26bのパターンを認識することが可能である。一方、ソース/ドレイン領域30a、30bの幅も数百nm程度と比較的大きい。このため、酸化物層26a、26bを目印として、ソース/ドレイン領域30a、30bを形成するためマスクパターンの位置合わせを行うことが可能である。そして、フォトリソグラフィ技術を用いて、適切な位置にソース/ドレイン領域30a、30bを形成することができる。

10

【0059】

次に、図8(b)に示すように、ドット状の構造体24上に、ゲート電極32を形成する。

【0060】

こうして、本実施形態による量子半導体装置が製造される。

【0061】

(変形例(その1))

次に、本発明の一実施形態の変形例(その1)による量子半導体装置を図9を用いて説明する。図9は、本変形例による量子半導体装置を示す平面図である。なお、図9においては、ソース/ドレイン領域等の構成要素が省略されている。

20

【0062】

本変形例による量子半導体装置は、酸化物層26aと酸化物層26bとの間の距離が広めに設定されていることに主な特徴がある。酸化物層26aと酸化物層26bとの間の距離は、例えば150nmとなっている。

【0063】

本変形例によれば、酸化物層26aと酸化物層26bとの間隔が広めに設定されているため、酸化物層26aの下方に形成される空乏化領域28aと酸化物層26bの下方に形成される空乏化領域28bとの間隔を広くすることができる。このため、本変形例によれば、空乏化領域28a、28bが量子ドット20に対して悪影響を及ぼすのを防止することができる。

30

【0064】

(変形例(その2))

次に、本発明の一実施形態の変形例(その2)による量子半導体装置を図10を用いて説明する。図10は、本変形例による量子半導体装置を示す断面図及び平面図である。図10(a)は断面図であり、図10(b)は平面図である。図10(a)は、図10(b)のA-A線断面図である。

【0065】

本変形例による量子半導体装置は、ドット状の構造体24が酸化されていることに主な特徴がある。

40

【0066】

図10に示すように、ドット状の構造体24が酸化されており、半導体層22の表面における量子ドット20の上方の位置には酸化物層26cが形成されている。量子ドット20の上方の位置に酸化物層26cが形成されているため、量子ドット20の近傍までもが酸化物層26cの影響により空乏化される。

【0067】

このように、ドット状の構造体24を酸化するようにしてもよい。

【0068】

(変形例(その3))

50

次に、本発明の一実施形態の変形例（その３）による量子半導体装置を図１１を用いて説明する。図１１は、本変形例による量子半導体装置を示す断面図及び平面図である。図１１（ａ）は断面図であり、図１１（ｂ）は平面図である。図１１（ａ）は、図１１（ｂ）のＡ－Ａ線断面図である。

【００６９】

本変形例による量子半導体装置は、ドット状の構造体２４の一部のみが酸化されていることに主な特徴がある。

【００７０】

図１１に示すように、本変形例では、ドット状の構造体２４の一部のみ、具体的には、ドット状の構造体２４の表面のみが酸化されている。

10

【００７１】

図１０を用いて上述した量子半導体装置では、ドット状の構造体２４の全体が酸化されているため、量子ドット２０の近傍が酸化層２６ｃの影響により過度に空乏化してしまうことが考えられる。

【００７２】

これに対し、本変形例によれば、ドット状の構造体２４の一部のみが酸化されているため、量子ドット２０の近傍が酸化層２６ｃの影響により過度に空乏化してしまうのを防止することが可能となる。

【００７３】

[変形実施形態]

本発明は上記実施形態に限らず種々の変形が可能である。

20

【００７４】

例えば、上記実施形態では、単一電子トランジスタとして動作し得る量子半導体装置を例に説明したが、本発明は、単一電子トランジスタのみならず、あらゆる量子半導体装置に適用することができる。例えば、単一電子メモリや量子コンピュータ等として動作する量子半導体装置にも適用することが可能である。即ち、本発明によれば、半導体層２２の表面における量子ドット２０上の位置にドット状の構造体２４を正確に形成し、ドット状の構造体２４を目印として、様々な構成要素を形成することにより、あらゆる量子半導体装置を提供することが可能である。

【００７５】

また、上記実施形態では、酸化層２６ａ、２６ｂを形成した後にソース/ドレイン領域３０ａ、３０ｂを形成したが、ソース/ドレイン領域３０ａ、３０ｂを形成した後に、酸化層２６ａ、２６ｂを形成してもよい。

30

【００７６】

また、上記実施形態では、二次元キャリアガスとして二次元電子ガスを形成したが、二次元正孔ガス（２ＤＨＧ）を形成してもよい。各層の導電型を適宜設定すれば、二次元正孔ガスを形成することが可能である。

【００７７】

（付記１） 基板上に形成され、二次元キャリアガスが形成された第１の半導体層と、前記第１の半導体層上に形成された量子ドットと、前記第１の半導体層上に、前記量子ドットを埋め込むように形成された第２の半導体層と、前記第２の半導体層表面における前記量子ドット上の位置に形成されたドット状の構造体と、前記ドット状の構造体の両側における前記第２の半導体層表面に形成された酸化層とを有することを特徴とする量子半導体装置。

40

【００７８】

（付記２） 付記１記載の量子半導体装置において、前記ドット状の構造体は、前記量子ドットの存在により前記第２の半導体層表面に生ずる歪により、前記第２の半導体層表面における前記量子ドット上の位置に形成されている

50

ことを特徴とする量子半導体装置。

【0079】

(付記3) 付記1又は2記載の量子半導体装置において、前記量子ドットは、S-Kモードにより自己形成された三次元成長島より成ることを特徴とする量子半導体装置。

【0080】

(付記4) 付記1乃至3のいずれかに記載の量子半導体装置において、前記ドット状の構造体は、S-Kモードにより自己形成された三次元成長島より成ることを特徴とする量子半導体装置。

【0081】

(付記5) 付記1乃至4のいずれかに記載の量子半導体装置において、前記酸化物層の存在により、前記第1の半導体層のうちの前記酸化物層の下方領域に空乏化領域が形成されており、前記空乏化領域により、チャネル領域が画定されていることを特徴とする量子半導体装置。

【0082】

(付記6) 付記5記載の量子半導体装置において、前記チャネル領域の両端に接続されたソース/ドレイン領域を更に有することを特徴とする量子半導体装置。

【0083】

(付記7) 付記1乃至6のいずれかに記載の量子半導体装置において、前記ドット状の構造体に接続されたゲート電極を更に有することを特徴とする量子半導体装置。

【0084】

(付記8) 付記1乃至7のいずれかに記載の量子半導体装置において、前記二次元キャリアガスと前記量子ドットとの間の距離が、5nm以下であることを特徴とする量子半導体装置。

【0085】

(付記9) 付記1乃至8のいずれかに記載の量子半導体装置において、前記ドット状の構造体は、他の量子ドット又はアンチドットより成ることを特徴とする量子半導体装置。

【0086】

(付記10) 付記1乃至9のいずれかに記載の量子半導体装置において、前記ドット状の構造体の少なくとも一部が酸化されていることを特徴とする量子半導体装置。

【0087】

(付記11) 基板上に、二次元キャリアガスが形成された第1の半導体層を形成する工程と、

前記第1の半導体層上に、量子ドットを形成する工程と、

前記量子ドットを埋め込むように第2の半導体層を形成する工程と、

前記量子ドットの存在により前記第2の半導体層表面に生ずる歪により、前記第2の半導体層表面における前記量子ドットの上方の位置に、ドット状の構造体を形成する工程と、前記ドット状の構造体を目印として、前記ドット状の構造体の両側における前記第2の半導体層の表面に酸化物層を形成する工程と

を有することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【0088】

(付記12) 付記11記載の量子半導体装置の製造方法において、前記酸化物層を形成する工程の後に、前記酸化物層を目印として、ソース/ドレイン領域を形成する工程を更に有する

ことを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 9 】

(付記 1 3) 付記 1 1 又は 1 2 記載の量子半導体装置の製造方法において、前記量子ドットを形成する工程では、S - K モードにより自己形成することにより、三次元成長島より成る前記量子ドットを形成することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【 0 0 9 0 】

(付記 1 4) 付記 1 1 乃至 1 3 のいずれかに記載の量子半導体装置の製造方法において、前記ドット状の構造体を形成する工程では、S - K モードにより自己形成することにより、三次元成長島より成る前記ドット状の構造体を形成することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

10

【 0 0 9 1 】

(付記 1 5) 付記 1 1 乃至 1 4 のいずれかに記載の量子半導体装置の製造方法において、前記酸化層を形成する工程では、前記第 2 の半導体層の表面に針状の導電体を近接し、前記針状の導電体と前記基板との間に電圧を印加することにより、前記酸化層を形成することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【 0 0 9 2 】

(付記 1 6) 付記 1 5 記載の量子半導体装置の製造方法において、前記針状の導電体は、原子間力顕微鏡の探針であることを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

20

【 0 0 9 3 】

【 発明の効果 】

以上の通り、本発明によれば、量子ドットの存在により半導体層表面に生ずる結晶歪により、半導体層表面における量子ドットの上方の位置に正確にドット状の構造体が形成される。このため、ドット状の構造体を目印として、酸化層を形成することができる。そして、酸化層を目印として、ソース/ドレイン領域を形成することができる。従って、本発明によれば、自己形成された微細な量子ドットを半導体層により埋め込んだ場合であっても、量子半導体装置を確実に形成することができる。

30

【 0 0 9 4 】

また、本発明によれば、自己形成された微小な量子ドットが用いられているため、量子ドットにおいて離散的なエネルギー準位を得ることができる。このため、本発明によれば、比較的高温で動作する量子半導体装置を提供することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 図 1 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置を示す斜視図である。

【 図 2 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置を示す断面図及び平面図である。

【 図 3 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置のエネルギーバンド構造を示す図 (その 1) である。

【 図 4 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置のエネルギーバンド構造を示す図 (その 2) である。

40

【 図 5 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置の動作を示す概念図である。

【 図 6 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図 (その 1) である。

【 図 7 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図 (その 2) である。

【 図 8 】 本発明の一実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図 (その 3) である。

【 図 9 】 本発明の一実施形態の変形例 (その 1) による量子半導体装置を示す平面図である。

50

【図10】本発明の一実施形態の変形例(その2)による量子半導体装置を示す断面図及び平面図である。

【図11】本発明の一実施形態の変形例(その3)による量子半導体装置を示す断面図及び平面図である。

【符号の説明】

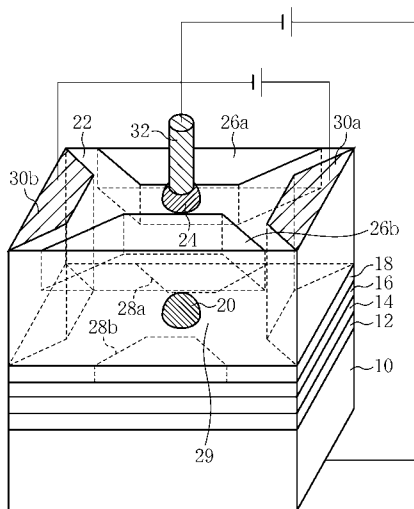
- 10 ... 基板
- 12 ... AlGaAs層
- 14 ... n-AlGaAs層
- 16 ... AlGaAs層
- 18 ... GaAs層
- 19 ... 二次元電子ガス
- 20 ... 量子ドット
- 22 ... GaAs層
- 24 ... ドット状の構造体
- 26a、26b、26c ... 酸化物層
- 28a、28b ... 空乏化領域
- 29 ... チャネル領域
- 30a、30b ... ソース/ドレイン領域
- 32 ... 電極
- 34 ... 探針

10

20

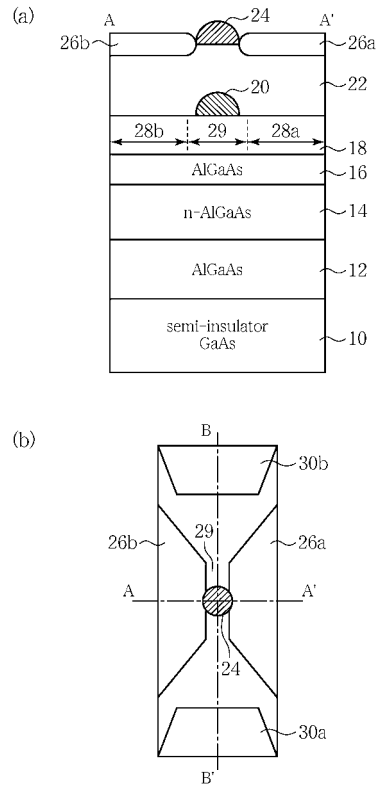
【図1】

本発明の一実施形態による量子半導体装置を示す斜視図



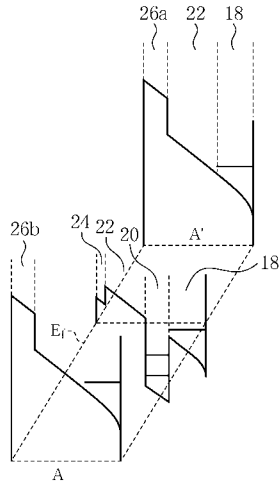
【図2】

本発明の一実施形態による量子半導体装置を示す断面図及び平面図



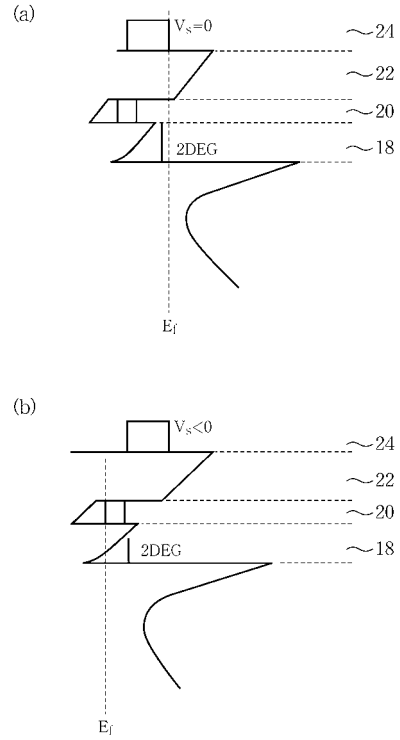
【図3】

本発明の一実施形態による量子半導体装置のエネルギーバンド構造を示す図(その1)



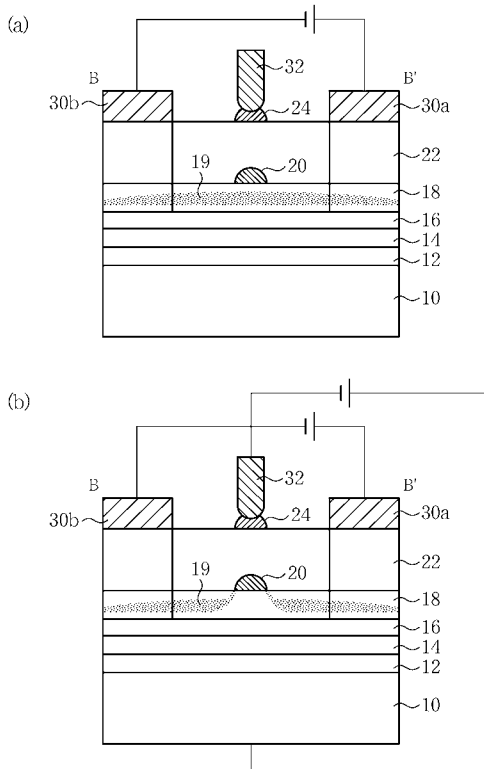
【図4】

本発明の一実施形態による量子半導体装置のエネルギーバンド構造を示す図(その2)



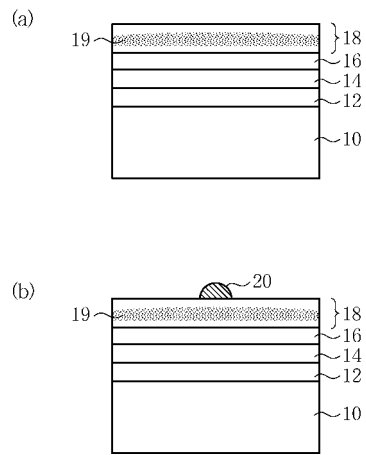
【図5】

本発明の一実施形態による量子半導体装置の動作を示す概念図



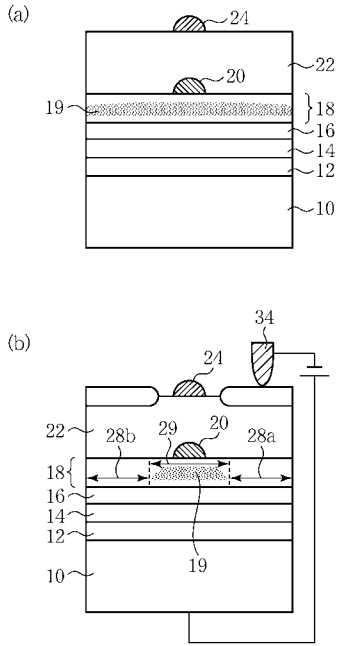
【図6】

本発明の一実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図(その1)



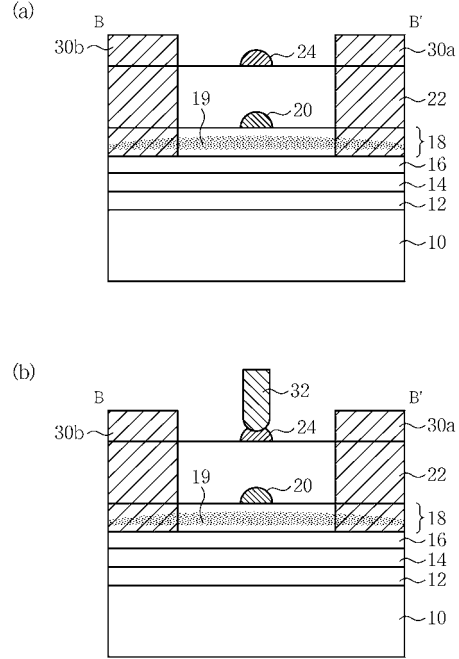
【図7】

本発明の一実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図(その2)



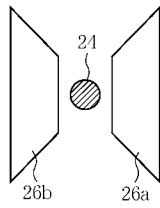
【図8】

本発明の一実施形態による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図(その3)



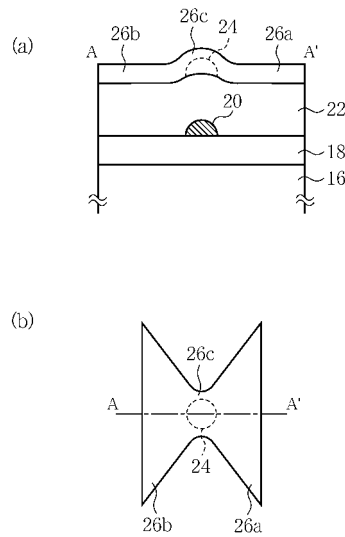
【図9】

本発明の一実施形態の変形例(その1)による量子半導体装置を示す平面図



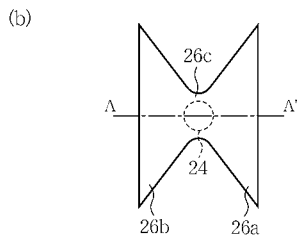
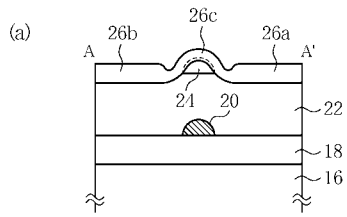
【図10】

本発明の一実施形態の変形例(その2)による量子半導体装置を示す断面図及び平面図



【図 11】

本発明の一実施形態の変形例(その3)による量子半導体装置を示す
断面図及び平面図



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平6 - 260656 (JP, A)
特開平10 - 144877 (JP, A)
特開2000 - 150862 (JP, A)
特開平9 - 326506 (JP, A)
特開平6 - 196720 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 29/06

H01L 29/66

H01L 29/80