

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3977265号
(P3977265)

(45) 発行日 平成19年9月19日(2007.9.19)

(24) 登録日 平成19年6月29日(2007.6.29)

(51) Int. Cl.		F I		
HO 1 L	29/06	(2006.01)	HO 1 L	29/06 GO 1 D
HO 1 L	21/28	(2006.01)	HO 1 L	21/28 SO 1 R
HO 1 L	21/285	(2006.01)	HO 1 L	21/285 Z

請求項の数 10 (全 30 頁)

(21) 出願番号	特願2003-34245 (P2003-34245)	(73) 特許権者	000005223 富士通株式会社
(22) 出願日	平成15年2月12日(2003.2.12)		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2004-247431 (P2004-247431A)	(74) 代理人	100087479 弁理士 北野 好人
(43) 公開日	平成16年9月2日(2004.9.2)	(74) 代理人	100114915 弁理士 三村 治彦
審査請求日	平成16年6月25日(2004.6.25)	(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】

半導体基板上に形成された量子ドットと、
前記量子ドットを埋め込むように形成された半導体層と、
液滴エピタキシー法により前記量子ドットの存在により前記半導体層に生じる歪の位置
上に自己整合的に形成された粒状電極と
を有することを特徴とする量子半導体装置。

【請求項2】

半導体基板上に形成された量子ドットと、
前記量子ドットを埋め込むように形成された半導体層と、
前記半導体層表面の前記量子ドット上の位置に形成された凹部に形成された電極と
を有す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、
前記半導体層表面に形成された溝内に形成され、前記電極に電氣的に接続された配線を
更に有する
ことを特徴とする量子半導体装置。

【請求項4】

請求項1又は2記載の量子半導体装置において、
前記半導体層表面に形成され、前記電極近傍に一端が位置するライン状の酸化物と、

10

20

前記電極及び前記ライン状の酸化物を埋め込むように形成された他の半導体層と、
 前記他の半導体層に埋め込まれ、前記電極に電氣的に接続された他の電極と、
 前記ライン状の酸化物に沿って前記他の半導体層表面に形成された溝内に形成され、前記他の電極に電氣的に接続された配線と
 を更に有することを特徴とする量子半導体装置。

【請求項 5】

半導体基板上に形成された量子ドットと、
 前記量子ドットを埋め込むように形成された第 1 の半導体層と、
 前記第 1 の半導体層上の前記量子ドット上の位置に形成された半導体ドットと、
 前記半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物と、
 前記半導体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 の半導体層表面の前記ドット状の酸化物上の位置に形成された凹部内に形成された電極と
 を有することを特徴とする量子半導体装置。

10

【請求項 6】

半導体基板上に、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半導体層を形成する工程と、
液滴エピタキシー法により前記量子ドットの存在により前記半導体層に生じる歪の位置
上に自己整合的に粒状電極を形成する工程と
 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 7】

半導体基板上に、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半導体層を形成する工程と、
 前記半導体層上の前記量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成する工程と、
 前記半導体ドットと前記半導体ドットの直下における前記半導体層とを酸化することにより、その一部が前記半導体層に埋め込まれたドット状の酸化物を形成する工程と、
 前記ドット状の酸化物を除去することにより、前記半導体層表面に凹部を形成する工程と、
 前記半導体層表面に形成された前記凹部内に電極を形成する工程と
 を有することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

30

【請求項 8】

請求項 6 又は 7 記載の量子半導体装置の製造方法において、
 前記電極を形成する工程の前に、前記半導体層を酸化することにより、前記半導体層表面に、前記半導体層の前記電極の形成予定位置の近傍に一端が位置するライン状の酸化物を形成する工程と、前記ライン状の酸化物を除去することにより、前記半導体層表面に溝を形成する工程とを更に有し、
 前記電極を形成する工程では、前記電極とともに、前記溝内に、前記電極に電氣的に接続された配線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。

【請求項 9】

請求項 6 又は 7 記載の量子半導体装置の製造方法において、
 前記電極を形成する工程の後に、前記半導体層を酸化することにより、前記半導体層表面に、前記半導体層の前記電極の形成予定位置の近傍に一端が位置するライン状の酸化物を形成する工程と、
 前記電極上の位置における表面に凹部が形成され、前記ライン状の酸化物に沿って表面に溝が形成されるように、前記電極及び前記ライン状の酸化物を埋め込む他の半導体層を形成する工程と、
 前記凹部に前記電極に達する開口部を形成する工程と、
 前記開口部内に前記電極に電氣的に接続された他の電極を形成するとともに、前記溝内に前記他の電極に電氣的に接続された前記配線を形成する工程と

40

50

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10】

半導体基板上に、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1の半導体層を形成する工程と、
前記第1の半導体層上の前記量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成する工程と、
前記半導体ドットの一部を酸化することにより、前記半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物を形成する工程と、
前記ドット状の酸化物上の位置における表面に凹部が形成されるように、前記ドット状の酸化物及び前記半導体ドットを埋め込む第2の半導体層を形成する工程と、
前記第2の半導体層表面に形成された前記凹部内に電極を形成する工程と
を有することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

10

【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。

【0002】

【従来の技術】

量子ドットは、例えば、Stranski-Krastanowモード（S-Kモード）を利用した形成方法により、半導体基板上に相互に離間して島状に形成される。ここで、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、2次元成長（膜成長）するが、膜の弾性限界を超えた段階で3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の異なる膜をエピタキシャル成長することにより、3次元成長島よりなる量子ドットが自己形成される。

20

【0003】

近時、量子情報や量子計算の分野の技術が大きく注目されており、量子ドットの応用の可能性が注目されている。しかしながら、量子ドットに関する更なる基礎研究及び応用開発のためには、乗り越えるべき種々の技術的な障壁が存在している。

【0004】

例えば、量子ドットは大きさが小さく、また、S-Kモードを利用して自己形成された量子ドットはランダムに分布している。現在までのところ、このようなランダムに分散した状態で自己形成された量子ドットの各々に対して正確に電氣的にアクセスすることを可能とする方法は提案されていなかった。

30

【0005】

一方、電子ビームリソグラフィ、反応性イオンエッチング等のサブミクロンでの加工が可能なプロセスを用いることにより、100nm程度の大きさの導体パッドを作製することは可能である。したがって、量子ドットの密度が非常に低い場合には、このようなプロセスを用いて単一の量子ドット上に電極を形成しうる可能性がある。すなわち、サブミクロンでの加工が可能なプロセスを用いて量子ドットが形成されたであろう領域上に電極を適当に形成する。次いで、電極の下に量子ドットが存在するか否かをチェックする。こうして、電極形成及びその後のチェックを数多く繰り返すことにより、電極の下に単一の量子ドットが存在する場合を見出すことができる可能性もある。しかしながら、このような方法では、量子ドットの密度が高い場合に単一の量子ドットを捕捉することはほぼ不可能である。また、このような確率的な方法は、素子を製造するにあたって非効率的な方法であるといえる。

40

【0006】

また、特許文献1には、微細な探針形状をした電極を用いて量子ドットに電氣的にアクセスする方法が提案されている。しかしながら、この場合、電極を量子ドット上に配置するために、量子ドットをアレイ化した状態で形成しておく等の特別なプロセスが必要となる。また、特許文献1では、針状電極による電界は、量子ドットの大きさよりもはるかに広

50

く分布すると考えられる。このため、ある量子ドット上に配置した電極による電界が、隣接する量子ドットにまで影響を及ぼしてしまうことが想定される。

【0007】

【特許文献1】

特開平7-297381号公報

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

上述のように、従来の技術では、ランダムに分散した状態で自己形成された量子ドットの各々に対して、正確に電氣的にアクセスすることを可能とする方法は確立されていなかった。

10

【0009】

自己形成された各々の量子ドットに対する正確な電氣的アクセスを実現することは、量子ドットに関する基礎研究、応用開発等における種々の局面において、非常に重要なことである。

【0010】

本発明の目的は、量子ドットに対して、正確に電氣的にアクセスすることを可能とする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。

【0011】

【課題を解決するための手段】

上記目的は、半導体基板上に形成された量子ドットと、前記量子ドットを埋め込むように形成された半導体層と、液滴エピタキシー法により前記量子ドットの存在により前記半導体層に生じる歪の位置上に自己整合的に形成された粒状電極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。これにより、量子ドット上に電極を正確に形成することができるので、かかる電極を介して、量子ドットに対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となり、また、量子ドットに対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

20

【0012】

また、上記目的は、半導体基板上に形成された量子ドットと、前記量子ドットを埋め込むように形成された半導体層と、前記半導体層表面の前記量子ドット上の位置に形成された凹部内に形成された電極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。これにより、量子ドット上に電極を正確に形成することができるので、かかる電極を介して、量子ドットに対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となり、また、量子ドットに対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

30

【0013】

また、上記目的は、半導体基板上に形成された量子ドットと、前記量子ドットを埋め込むように形成された第1の半導体層と、前記第1の半導体層上の前記量子ドット上の位置に形成された半導体ドットと、前記半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物と、前記半導体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の半導体層表面の前記ドット状の酸化物上の位置に形成された凹部内に形成された電極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。

40

【0014】

また、上記目的は、半導体基板上に、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半導体層を形成する工程と、液滴エピタキシー法により前記量子ドットの存在により前記半導体層に生じる歪の位置上に自己整合的に粒状電極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。

【0015】

また、上記目的は、半導体基板上に、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半導体層を形成する工程と、前記半導体層上の前記量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成する工程と、前記半導体ドットと前記半導体ドットの直下における前記半導体層とを酸化することにより、その一部が前記半導体層に埋め込まれたドット状の

50

酸化物を形成する工程と、前記ドット状の酸化物を除去することにより、前記半導体層表面に凹部を形成する工程と、前記半導体層表面に形成された前記凹部内に電極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。

【0016】

また、上記目的は、半導体基板上に、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1の半導体層を形成する工程と、前記第1の半導体層上の前記量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成する工程と、前記半導体ドットの一部を酸化することにより、前記半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物を形成する工程と、前記ドット状の酸化物上の位置における表面に凹部が形成されるように、前記ドット状の酸化物及び前記半導体ドットを埋め込む第2の半導体層を形成する工程と、前記第2の半導体層表面に形成された前記凹部内に電極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。

10

【0017】

【発明の実施の形態】

[第1実施形態]

本発明の第1実施形態による量子半導体装置及びその製造方法について図1乃至図3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の構造を示す断面図、図2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、図3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。

【0018】

まず、本実施形態による量子半導体装置の構造について図1を用いて説明する。

20

【0019】

半導体基板10上には、自己形成された量子ドット12を含む半導体よりなる量子ドット層14が形成されている。量子ドット層14は、半導体基板10上にS-Kモードによって自己形成された三次元成長島よりなる量子ドット12と、量子ドット12の間の半導体基板10上に形成された濡れ層16とから構成されている。

【0020】

量子ドット層16上には、キャップ層すなわち半導体層18が形成されている。量子ドット12上の半導体層18には、量子ドット12の材料と半導体層18の材料との格子不整合により歪が生じている。図1では、半導体層18の歪が生じている領域を点線で示している。

30

【0021】

半導体層18表面の歪が生じている位置には、金属よりなる粒状の電極22が形成されている。

【0022】

本実施形態による量子半導体装置は、半導体層18表面の歪が生じている位置に電極22が自己整合的に形成されていること、すなわち、それぞれの量子ドット12上に、金属よりなる粒状の電極22が正確に形成されていることに主たる特徴がある。

【0023】

このように、量子ドット12上の半導体層18に生じた歪により、それぞれの量子ドット12上に電極22が正確に形成されているので、かかる電極22を介して、自己形成された量子ドット12に対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となる。また、自己形成された量子ドット12に対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

40

【0024】

なお、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は、図2に示すようになる。

【0025】

次に、本実施形態による量子半導体装置の製造方法について図3を用いて説明する。

【0026】

50

まず、半導体基板 10 上に、例えば MBE (Molecular Beam Epitaxy、分子線エピタキシー) 法により、量子ドット層 14 を形成する。量子ドット層 14 には、S-K モードにより、量子ドット 12 が自己形成される (図 3 (a) を参照)。量子ドット層 14 の材料としては、半導体基板 10 の材料と格子定数が異なり格子不整合が大きい材料を用いる。例えば、半導体基板 10 として GaAs 基板を用いる場合、量子ドット層 14 の材料としては、例えば InAs を用いることができる。

【0027】

次いで、量子ドット層 14 上に、例えば MBE 法により、半導体層 18 を形成する (図 3 (b) を参照)。半導体層 18 の材料としては、例えば、量子ドット層 14 の材料と格子定数が異なり、格子不整合が大きい材料を用いる。量子ドット層 14 の材料として InAs を用いる場合には、例えば、半導体層 18 の材料として GaAs を用いることができる。

10

【0028】

量子ドット 12 上の半導体層 18 には、量子ドット 12 との格子不整合により歪が生じる。

【0029】

なお、半導体層 18 は、その表面にまで十分に歪が生じるように、比較的薄めに形成することが望ましい。例えば、量子ドット 12 の上端が半導体層 18 により埋められた段階で、MBE 法による半導体層 18 の成長を停止する。半導体層 18 の厚さは、例えば 10 nm 以下、より望ましくは 5 nm 以下とする。なお、半導体層 18 を薄めに形成すべき理由

20

【0030】

次いで、液滴エピタキシー法により、金属液滴を半導体層 18 表面に堆積することにより、金属よりなる粒状の電極 22 を形成する。ここで、液滴エピタキシー法とは、蒸発した金属の原子や分子を、例えば絶縁体や半導体等の金属より低い表面エネルギーを有する材料の表面に堆積することにより、微細な粒状体を成長する技術のことである。この方法では、系のエネルギーを最小にしようとする作用が起こるために、金属が絶縁体や半導体等の表面積を最小にするように微細な球状に成長する。電極 22 の材料としては、Ga、In、Al、若しくは Au、又はこれらの合金を用いることができる。

【0031】

また、電極 22 は、半導体層 18 を形成するために用いた成膜装置のエピタキシャル成長チャンバ内において、半導体層 18 の形成後に連続した工程で形成することができる。

30

【0032】

半導体層 18 と電極 22 とを連続した工程で形成する場合には、エピタキシャル成長チャンバ内での MBE 法による半導体層 18 の形成後、半導体層 18 の材料となる半導体の堆積を停止する。

【0033】

例えば、半導体層 18 を形成するために、III-V 族半導体を堆積した場合、エピタキシャル成長チャンバ内への V 族元素の供給を停止する。

【0034】

V 族元素の供給の停止により、III 族元素の金属ビームのみが半導体層 18 の表面に照射され、III 族元素の金属液滴が半導体層 18 表面に堆積される。

40

【0035】

液滴エピタキシー法により半導体層 18 表面に堆積された金属液滴は、半導体層 18 表面に生じている歪の位置へと移動する。

【0036】

続いて、金属液滴の堆積終了後の冷却により、金属液滴は固化し、金属の粒子が形成される。こうして、半導体層 18 表面の歪が生じている位置、すなわち半導体層 18 に埋め込まれた量子ドット 12 のそれぞれの上の半導体層 18 表面に、金属よりなる粒状の電極 22 が正確に形成される。すなわち、量子ドット 12 の存在により半導体層 18 に生じる歪

50

の位置上に自己整合的に電極 2 2 が形成される。

【 0 0 3 7 】

液滴エピタキシー法により電極 2 2 を形成する場合の条件は、例えば以下のようにすればよい。以下の条件は、半導体基板 1 0 として、GaAs 基板を用いる場合のものである。

【 0 0 3 8 】

エピタキシャル成長チャンバ内のAs分圧は、例えば 10^{-7} Torr程度の無視できる大きさにする。金属液滴としてIn又はGaを堆積する場合には、基板温度は例えば100~200とする。また、金属液滴としてAlを堆積する場合には、基板温度は例えば300~400とする。堆積速度は例えば0.5~3原子層(monolayers)/秒とし、総堆積量は例えば1~4原子層とする。

10

【 0 0 3 9 】

電極 2 2 は、堆積量等の金属液滴を堆積する際の条件を適宜設定することにより、量子ドット 1 2 の大きさ等に応じて、所望の大きさに設定することができる。

【 0 0 4 0 】

ここで、上述のようにして液滴エピタキシー法により形成された金属よりなる粒状の電極 2 2 が、半導体層 1 8 表面における量子ドット 1 2 上の位置に正確に形成されるメカニズムについて説明する。

【 0 0 4 1 】

一般的に、上述の液滴エピタキシー法において、表面に堆積される金属液滴の位置は、金属液滴が堆積される表面の液滴エピタキシー過程の間の表面自由エネルギー分布に依存することが知られている。

20

【 0 0 4 2 】

例えば、表面が均一に処理されている場合には、金属液滴はランダムに配置した状態で表面に堆積される。

【 0 0 4 3 】

これに対し、表面状態が局所的に改質されている場合には、金属液滴は、表面状態が意図的に改質された領域に堆積される。表面状態が局所的に改質されている場合には、例えば、表面が局所的に不動態化されていたり、局所的に不純物が堆積されていたり、パターンニングされていたり、局所的に電界が印加されているといった場合がある(例えば、米国特許第6,383,286号明細書、米国特許第6,242,326号明細書、米国特許第6,033,972号明細書、特開平4-245620号公報、特開2000-315654号公報等を参照)。

30

【 0 0 4 4 】

本実施形態による量子半導体装置の製造方法では、量子ドット層 1 4 上に、半導体層 1 8 が薄く形成されている。このため、それぞれの量子ドット 1 2 上において半導体層 1 8 に歪が生じている。

【 0 0 4 5 】

半導体層 1 8 表面の歪が生じている部分は、歪が生じていない部分に比して、表面エネルギーが高くなっている。このため、液滴エピタキシー法による金属液滴は、歪が生じている半導体層 1 8 表面の量子ドット 1 2 上の位置に選択的に堆積される。

40

【 0 0 4 6 】

なお、前述したように半導体層 1 8 をできるだけ薄めに形成するのが望ましいのは、次の理由による。すなわち、半導体層 1 8 を量子ドット 1 2 の高さと比して厚く形成したのでは、半導体層 1 8 表面にまで十分な歪が生じない。このため、半導体層 1 8 表面の量子ドット 1 2 上の部分の表面エネルギーが他の部分と大きく変化せず、金属液滴の選択的形成が困難となるためである。

【 0 0 4 7 】

以上のようにして、液滴エピタキシー法により、金属よりなる粒状の電極 2 2 が、自己形成した量子ドット 1 2 のそれぞれの上の半導体層 1 8 表面の位置に正確に形成される。

【 0 0 4 8 】

50

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。

【0049】

このように、本実施形態によれば、量子ドット12上の半導体層18中に生じた歪により、液滴エピタキシー法により形成する金属よりなる粒状の電極22を、それぞれの量子ドット12上の位置に正確に形成することができる。これにより、量子ドット12に対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となる。また、量子ドット12に対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

【0050】

(変形例)

次に、本実施形態の変形例による量子半導体装置及びその製造方法について図4乃至図6を用いて説明する。図4は本変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図、図5は本変形例による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図、図6は配線を電極パッドに接続した場合を示す上面図である。

10

【0051】

まず、本変形例による量子半導体装置の構造について図4を用いて説明する。

【0052】

本変形例による量子半導体装置は、電極22とともに、電極22に電氣的に接続された配線26が形成されていることに主たる特徴がある。

【0053】

図4に示すように、半導体層18表面には、溝24が形成されている。溝24の一端は、半導体層18表面の量子ドット12上の位置に正確に形成された電極22近傍に位置している。

20

【0054】

溝24内には、電極22に電氣的に接続された配線26が形成されている。

【0055】

このように、本変形例による量子半導体装置は、電極22に電氣的に接続された配線26を有しているので、量子ドット12に対して電圧の印加等を行う周辺回路と電極22とを配線26を介して電氣的に接続することができる。これにより、量子ドット12への電氣的なアクセスがさらに容易になる。

【0056】

次に、本変形例による量子半導体装置の製造方法について図5及び図6を用いて説明する。

30

【0057】

図3(a)及び図3(b)に示す場合と同様にして、半導体基板10上に、量子ドット層14と、半導体層18とを順次形成する。

【0058】

次いで、半導体層18上に、例えばMBE法により、半導体ドット層38を形成する。半導体ドット層38をエピタキシャル成長することにより、S-Kモードにより、三次元成長島よりなる半導体ドット36が自己形成される(図5(a)を参照)。ここで形成された半導体ドット層38は、半導体層18上に自己形成された半導体ドット36と、半導体ドット36間の半導体層18上に形成された濡れ層40とから構成されるものである。半導体ドット36は、量子ドットであってもよいし、アンチドットであってもよい。半導体ドット層38の材料としては、半導体層18の材料と格子定数が異なり格子不整合が大きい材料を用いる。例えば量子ドット層14の材料としてInGaAs、半導体層18の材料としてGaAsを用いた場合には、半導体ドット層38の材料として、AlInAsを用いることができる。

40

【0059】

上述のようにして、量子ドット層14上に半導体層18を介してS-Kモードにより積層形成された半導体ドット層38の半導体ドット36は、量子ドット層14の量子ドット12上に形成される。すなわち、第1層目の量子ドット層14の量子ドット12の位置と、

50

第2層目の半導体ドット層38の半導体ドット36の位置とは、それぞれ互いに垂直方向に揃った状態となっている。このように、量子ドット12と半導体ドット36とが互いに重なり合うように形成されるのは、量子ドットが形成された量子ドット層上に半導体ドット層を形成すると、半導体ドット層において量子ドットに重なり合うように量子ドット或いはアンチドットである半導体ドットが形成される傾向があるためである。

【0060】

次いで、AFM (Atomic Force Microscope、原子間力顕微鏡) 酸化法を用いて、半導体ドット層38の濡れ層40及び半導体層18の表層を酸化することにより、ライン状の酸化物28を形成する。ここで、ライン状の酸化物28の一端が、量子ドット12上に形成されている半導体ドット36の近傍の位置にくるように、ライン状の酸化物28を形成する。

10

【0061】

AFM酸化法とは、AFMの探針を試料に近接し、AFMの探針と試料との間に電圧を印加することにより、試料表面に酸化物を形成する方法である。

【0062】

本変形例では、例えば、湿度40～60%の大気中において、AFMの探針30を半導体ドット層38の濡れ層40に近接し、探針30に負のバイアスを印加し、半導体基板10に正のバイアスを印加する。このようにバイアスを印加しつつ濡れ層40に近接した状態で探針30を走査する。探針30は、ライン状の酸化物28を形成すべき濡れ層40表面の線上を走査する。これにより、探針30が走査された半導体ドット層38の濡れ層40及び半導体層18の表層が酸化され、ライン状の酸化物28が形成される(図5(b)を参照)。

20

【0063】

次いで、エッチングにより、半導体ドット層38の半導体ドット36及び濡れ層40と、ライン状の酸化物28を除去する。こうして、半導体ドット36及び濡れ層40と、ライン状の酸化物28とが除去された半導体層18表面に、溝24が形成される(図5(c)を参照)。例えばInAsよりなる半導体ドット層38の場合、エッチング液としてHClを用いることにより、半導体ドット36及び濡れ層40と、ライン状の酸化物28とを同時に除去することができる。

【0064】

次いで、上記と同様に、液滴エピタキシー法により、半導体層18表面に、金属液滴を堆積する。このとき、金属液滴は、半導体層18表面の歪が生じている位置に形成されるとともに、溝24内に形成される。

30

【0065】

続いて、堆積終了後の冷却により、金属液滴が固化し、金属粒子が形成される。こうして、金属よりなる粒状の電極22とともに、溝24内に金属粒子が連続的に接続されてなる配線26が形成される(図5(d)を参照)。

【0066】

こうして、本変形例による量子半導体装置が製造される。

【0067】

なお、この後、図6に示すように、配線26に電氣的に接続される電極パッド32を形成してもよい。

40

【0068】

[第2実施形態]

本発明の第2実施形態による量子半導体装置及びその製造方法について図7及び図8を用いて説明する。図7は本実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図、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。なお、第1実施形態による量子半導体装置及びその製造方法と同様の構成要素については同一の符号を付し説明を省略し或いは簡略にする。

【0069】

50

まず、本実施形態による量子半導体装置の構造について図7を用いて説明する。

【0070】

半導体基板10上には、自己形成された量子ドット12を含む半導体よりなる量子ドット層14が形成されている。

【0071】

量子ドット層14上には、半導体層18が形成されている。

【0072】

半導体層18表面の量子ドット12上の位置には、凹部34が形成されている。凹部34内には、金属よりなる粒状の電極22が形成されている。

【0073】

本実施形態による量子半導体装置は、半導体層18表面における量子ドット12上の位置に形成された凹部34内に電極22が形成されていることに主たる特徴がある。

【0074】

このように、半導体層18表面の量子ドット12上の位置に形成された凹部34により、それぞれの量子ドット12上に電極22が正確に形成されているので、かかる電極22を介して、自己形成された量子ドット12に対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となる。また、自己形成された量子ドット12に対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

【0075】

なお、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は、図2に示す第1実施形態による量子半導体装置のものとほぼ同様になる。

【0076】

次に、本実施形態による量子半導体装置の製造方法について図8を用いて説明する。

【0077】

まず、第1実施形態による場合と同様にして、半導体基板10上に、量子ドット12を含む量子ドット層14と、半導体層18とを順次形成する(図8(a)及び図8(b)を参照)。

【0078】

次いで、半導体層18上に、例えばMBE法により、半導体ドット層38を形成する。半導体ドット層38をエピタキシャル成長することにより、S-Kモードにより、三次元成長島よりなる半導体ドット36が自己形成される(図8(c)を参照)。ここで形成された半導体ドット層38は、半導体層18上に自己形成された半導体ドット36と、半導体ドット36間の半導体層18上に形成された濡れ層40とから構成されるものである。半導体ドット36は、量子ドットであってもよいし、アンチドットであってもよい。半導体ドット層38の材料としては、半導体層18の材料と格子定数が異なり格子不整合が大きい材料を用いる。例えば量子ドット層14の材料としてInGaAs、半導体層18の材料としてGaAsを用いた場合には、半導体ドット層38の材料として、AlInAsを用いることができる。

【0079】

上述のようにして、量子ドット層14上に半導体層18を介してS-Kモードにより積層形成された半導体ドット層38の半導体ドット36は、量子ドット層14の量子ドット12上に形成される。すなわち、第1層目の量子ドット層14の量子ドット12の位置と、第2層目の半導体ドット層38の半導体ドット36の位置とは、それぞれ互いに垂直方向に揃った状態となっている。このように、量子ドット12と半導体ドット36とが互いに重なり合うように形成されるのは、量子ドットが形成された量子ドット層上に半導体ドット層を形成すると、半導体ドット層において量子ドットに重なり合うように量子ドット或いはアンチドットである半導体ドットが形成される傾向があるためである。

【0080】

次いで、AFM酸化法を用いて、半導体ドット36及び半導体ドット36の直下半導体層18を酸化する。例えば、湿度40~60%の大気中において、AFMの探針30を半導

10

20

30

40

50

体ドット36に近接した状態で、所定の時間、探針30に負のバイアスを印加し、半導体基板10に正のバイアスを印加する(図8(d)を参照)。例えば、半導体ドット36の材料がInGaAsの場合には、3~10V程度の電圧を印加する。これにより、半導体ドット36と半導体ドット36の直下の半導体層18とが酸化されてなるドット状の酸化物42が形成される。こうして、ドット状の酸化物42は、その一部が半導体層18の表層内に埋め込まれるように形成される。

【0081】

なお、半導体ドット36は、上述した酸化を容易に行うことができるように、小さめに形成しておくことが望ましい。例えば、半導体ドット36を、その大きさが15~30nm程度となるように形成しておくことが望ましい。

10

【0082】

次いで、エッチングによりドット状の酸化物42を除去する。エッチング液としては、例えばInGaAsよりなる半導体ドット36を酸化したドット状の酸化物42を除去する場合には、希釈したHClや希釈したNH₄OH等を用いる。

【0083】

ここで、ドット状の酸化物42をエッチングにより除去するとともに、濡れ層40についても、エッチングにより除去する。なお、ドット状の酸化物42と濡れ層40を除去する順序の先後は問わない。また、エッチング液を適宜選択することにより、ドット状の酸化物42と、濡れ層40とを同時に除去してもよい。例えば、エッチング液としてHClを用いることにより、Asを含有するドット状の酸化物42と、InAsよりなる濡れ層40とを同時に除去することができる。

20

【0084】

こうしてドット状の酸化物42を除去することにより、半導体層18表面の半導体ドット36が形成されていた位置、すなわち半導体層18に埋め込まれた量子ドット12のそれぞれの上の位置に、凹部34が形成される(図8(e)を参照)。

【0085】

なお、半導体ドット36の高さが十分に低くなく、1回のAFM酸化法により半導体ドット36を完全に酸化することが困難な場合等には、次のようにして凹部34を半導体層18表面に形成してもよい。すなわち、AFM酸化法により半導体ドット36の上端の一部を酸化する工程と、半導体ドット36の酸化された部分をエッチングにより除去する工程とを繰り返すことにより、凹部34を半導体層18表面に形成してもよい。

30

【0086】

次いで、第1実施形態による場合と同様にして、液滴エピタキシー法により、凹部34が形成された半導体層18表面に金属液滴を堆積する。

【0087】

このとき、半導体層18表面に堆積された金属液滴は、半導体層18表面に形成された凹部34に移動する。

【0088】

続いて、堆積終了後の冷却により、金属液滴は固化し、金属粒子が形成される。こうして、金属よりなる粒状の電極22が凹部34内に形成される(図8(f)を参照)。

40

【0089】

本実施形態による量子半導体装置の製造方法では、量子ドット12上の半導体層18に歪が十分に生じない場合であっても、上述のように半導体層18の表面の量子ドット12上の位置に凹部34を形成するので、電極22を量子ドット12上に正確に形成することができる。量子ドット12上の半導体層18に歪が十分に生じない場合としては、例えば、量子ドット12と半導体層18との格子不整合が小さい場合や、半導体層18の厚さが例えば10nmと薄くない場合がある。

【0090】

なお、液滴エピタキシー法により堆積した金属液滴の凹部34への移動が円滑に行われるように、凹部34周辺に凸状物が残存しないように、半導体ドット36を完全に酸化して

50

ドット状の酸化物 4 2 を形成しておくことが望ましい。また、同様の理由から、濡れ層 4 0 のエッチングによる除去の際には、凹部 3 4 周辺等に濡れ層 4 0 が残存してなる凸状物が形成されないように、エッチングにより濡れ層 4 0 を十分に除去しておくことが望ましい。

【 0 0 9 1 】

こうして、本実施形態による量子半導体装置が形成される。

【 0 0 9 2 】

このように、本実施形態によれば、量子ドット 1 2 上に積層形成された半導体ドット 3 6 が酸化されてなるドット状の酸化物 4 2 をエッチング除去することにより、量子ドット 1 2 上の半導体層 1 8 表面に凹部 3 4 を形成し、液滴エピタキシー法により金属よりなる粒 10
状の電極 2 2 を形成するので、それぞれの量子ドット 1 2 上の位置に正確に電極 2 2 を形成することができる。これにより、量子ドット 1 2 に対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となる。また、量子ドット 1 2 に対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

【 0 0 9 3 】

(変形例)

次に、本実施形態の変形例による量子半導体装置及びその製造方法について図 9 及び図 1 0 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の構造を示す断面図、図 1 0 は本変形例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。

【 0 0 9 4 】

まず、本変形例による量子半導体装置の構造について図 9 を用いて説明する。 20

【 0 0 9 5 】

本変形例による量子半導体装置は、第 1 実施形態の変形例による量子半導体装置と同様に、電極 2 2 とともに、電極 2 2 に電氣的に接続された配線 2 6 が形成されていることに主たる特徴がある。

【 0 0 9 6 】

図 9 に示すように、半導体層 1 8 表面には、溝 2 4 が形成されている。溝 2 4 の一端は、半導体層 1 8 表面の量子ドット 1 2 上の位置に正確に形成された凹部 3 4 近傍に位置している。

【 0 0 9 7 】

溝 2 4 内には、電極 2 2 に電氣的に接続された配線 2 6 が形成されている。 30

【 0 0 9 8 】

このように、本変形例による量子半導体装置は、電極 2 2 に電氣的に接続された配線 2 6 を有しているので、量子ドット 1 2 に対して電圧の印加等を行う周辺回路と電極 2 2 とを配線 2 6 を介して電氣的に接続することができる。

【 0 0 9 9 】

次に、本変形例による量子半導体装置の製造方法について図 1 0 を用いて説明する。

【 0 1 0 0 】

図 8 (a) 乃至図 8 (e) に示す場合と同様にして、量子ドット 1 2 上の半導体層 1 8 表面に凹部 3 4 を形成する (図 1 0 (a) を参照) 。 40

【 0 1 0 1 】

次いで、AFM酸化法により、半導体層 1 8 表面に、ライン状の酸化物 2 8 を形成する。ここで、ライン状の酸化物 2 8 の一端が、半導体層 1 8 表面の凹部 3 4 の位置にくるように、ライン状の酸化物 2 8 を形成する (図 1 0 (b) を参照) 。

【 0 1 0 2 】

次いで、エッチングにより半導体層 1 8 表面に形成されたライン状の酸化物 2 8 を除去する。こうして、ライン状の酸化物 2 8 が除去された半導体層 1 8 表面に、溝 2 4 が形成される (図 1 0 (c) を参照) 。

【 0 1 0 3 】

次いで、上記と同様に、液滴エピタキシー法により、半導体層 1 8 表面に、金属液滴を堆 50

積する。このとき、金属液滴は、半導体層 18 表面の凹部 34 内に形成されるとともに、溝 24 内に形成される。

【0104】

続いて、堆積終了後の冷却により、金属液滴は固化し、金属粒子が形成される。こうして、金属よりなる粒状の電極 22 とともに、溝 24 内に金属粒子が連続的に接続されてなる配線 26 が形成される（図 10 (d) を参照）。

【0105】

こうして、本変形例による量子半導体装置が製造される。

【0106】

なお、この後、第 1 実施形態の変形例による場合と同様に、配線 26 に電氣的に接続される電極パッド 32 を形成してもよい。

【0107】

[第 3 実施形態]

本発明の第 3 実施形態による量子半導体装置及びその製造方法について図 11 乃至図 13 を用いて説明する。図 11 は本実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図、図 12 は本実施形態による量子半導体装置のバンドエネルギー図、図 13 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。なお、第 1 及び第 2 実施形態による量子半導体装置及びその製造方法と同様の構成要素については同一の符号を付し説明を省略し或いは簡略にする。

【0108】

まず、本実施形態による量子半導体装置の構造について図 11 を用いて説明する。

【0109】

半導体基板 10 上には、自己形成された量子ドット 12 を含む半導体よりなる量子ドット層 14 が形成されている。

【0110】

量子ドット層 14 上には、中間層すなわち半導体層 18 が形成されている。

【0111】

半導体層 18 上には、自己形成された半導体ドット 44 を含む半導体よりなる半導体ドット層 46 が形成されている。半導体ドット層 46 は、半導体層 18 上に自己形成された半導体ドット 44 と、半導体ドット 44 間の半導体層 18 上に形成された濡れ層 48 とから構成されている。半導体ドット層 46 の半導体ドット 44 は、量子ドット層 14 の量子ドット 12 上の位置に形成されている。半導体ドット 44 は、アンチドットであってもよいし、或いは量子ドットであってもよい。

【0112】

半導体ドット層 46 の半導体ドット 44 の上端には、半導体ドット 44 の上端の一部が酸化されてなるドット状の酸化物 50 が形成されている。

【0113】

ドット状の酸化物 50 が上端に形成された半導体ドット 44 を含む半導体ドット層 46 上には、キャップ層すなわち半導体層 52 が形成されている。

【0114】

半導体層 52 表面の積層形成された量子ドット 12 及び半導体ドット 44 上の位置には、凹部 54 が形成されている。凹部 54 内には、金属よりなる粒状の電極 22 が形成されている。

【0115】

本実施形態による量子半導体装置は、積層形成された量子ドット 12 及び半導体ドット 44 上の半導体層 52 表面の位置に形成された凹部 54 内に電極 22 が形成されていること、すなわち、それぞれの量子ドット 12 上に正確に電極 22 が形成されていることに主たる特徴がある。

【0116】

このように、半導体層 52 表面の量子ドット 12 上の位置に形成された凹部 54 により、

10

20

30

40

50

それぞれの量子ドット 1 2 上に電極 2 2 が正確に形成されているので、かかる電極 2 2 を介して、自己形成された量子ドット 1 2 に対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となる。また、自己形成された量子ドット 1 2 に対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

【 0 1 1 7 】

また、本実施形態による量子半導体装置は、量子ドット 1 2 と電極 2 2 との間に、半導体層 1 8 に加えてさらに半導体層 5 2 が形成されていることにも特徴がある。半導体層 1 8 に加えてさらに半導体層 5 2 が形成されているため、熱処理等の際に電極 2 2 中の金属が拡散して量子ドット 1 2 中に侵入するのを防止することができる。

【 0 1 1 8 】

なお、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は、図 1 2 に示すようになる。

【 0 1 1 9 】

図 1 2 に示すエネルギーバンド構造に示される量子ドット 1 2 と電極 2 2 との間のバリアの高さやバリア幅は、半導体層 1 8、5 2 の材料組成や厚さ、半導体ドット 4 4 の材料組成や大きさ、ドット状の酸化物 5 0 の大きさ等を適宜設定することにより、所望の値に設定することができる。

【 0 1 2 0 】

次に、本実施形態による量子半導体装置の製造方法について図 1 3 を用いて説明する。

【 0 1 2 1 】

まず、第 2 実施形態による場合と同様にして、例えば M B E 法により、半導体基板 1 0 上に、量子ドット層 1 4 と、半導体ドット層 4 6 とを、半導体層 1 8 を介して積層形成する（図 1 3 (a) を参照）。半導体ドット 4 4 の材料は、半導体層 1 8 の材料と格子定数が異なり格子不整合が大きく、また、例えば半導体層 1 8 よりも高い基底準位のエネルギーを有する材料を選択する。この場合、半導体ドット 4 4 は、アンチドットとなる。このような半導体ドット 4 4 の材料を選択することにより、埋め込まれた量子ドット 1 2 への半導体ドット 4 4 の影響を低減することができる。半導体ドット 4 4 の材料としては、例えば、InAlAs、InGaAlAs 等を用いることができる。

【 0 1 2 2 】

なお、半導体ドット 4 4 は、第 2 実施形態による量子半導体装置の製造方法において形成した第 2 層目の半導体ドット 3 6 と異なり、必ずしも小さく形成する必要はない。

【 0 1 2 3 】

上述のようにして、量子ドット層 1 4 上に半導体層 1 8 を介して S - K モードにより積層形成された半導体ドット層 4 6 の半導体ドット 4 4 は、第 2 実施形態による場合と同様に、量子ドット層 1 4 の量子ドット 1 2 上に形成される。

【 0 1 2 4 】

次いで、エピタキシャル成長チャンバ内から半導体基板 1 0 を取り出す。

【 0 1 2 5 】

続いて、AFM酸化法により、半導体ドット層 4 6 の半導体ドット 4 4 の上端の一部を酸化する。例えば、湿度 4 0 ~ 6 0 % の大気中において、AFMの探針 3 0 を半導体ドット 4 4 に近接した状態で、所定の時間、探針 3 0 に負のバイアスを印加し、半導体基板 1 0 に正のバイアスを印加する。これにより、半導体ドット 4 4 の上端の一部が酸化される（図 1 3 (b) を参照）。

【 0 1 2 6 】

次いで、表面に吸着した汚染物質や、表面に形成された自然酸化膜等を除去した後、半導体基板 1 0 を再び成膜装置のエピタキシャル成長チャンバ内に収容する。なお、汚染物質等の除去には、例えば水素原子照射による洗浄方法を用いることができる。

【 0 1 2 7 】

続いて、半導体ドット層 4 6 上に、例えば M B E 法により、半導体層 5 2 を形成する。半導体層 5 2 の材料には、例えば半導体ドット 4 4 の材料と同じものか、或いは半導体ドット

10

20

30

40

50

ト 4 4 の材料よりもエネルギーギャップの大きい材料を選択する。

【 0 1 2 8 】

半導体層 5 2 の成長において、ドット状の酸化物 5 0 は非晶質であるため、ドット状の酸化物 5 0 上の半導体層 5 2 の成長速度は、他の領域での半導体層 5 2 の成長速度よりも遅くなる。この結果、ドット状の酸化物 5 0 上の半導体層 5 2 表面に凹部 5 4 が形成される（図 1 3 (c) を参照）。

【 0 1 2 9 】

こうして、積層形成された量子ドット 1 2 及び半導体ドット 4 4 上の半導体層 5 2 表面の位置に、凹部 5 4 が形成される。

【 0 1 3 0 】

次いで、液滴エピタキシー法により、凹部 5 4 が形成された半導体層 5 2 表面に、金属液滴を堆積する。第 2 実施形態による場合と同様に、半導体層 5 2 表面に堆積された金属液滴は、凹部 5 4 に移動する。

【 0 1 3 1 】

続いて、堆積終了後の冷却により、金属液滴は固化し、金属粒子が形成される。こうして、半導体層 5 2 表面の凹部 4 4 内に、金属よりなる粒状の電極 2 2 が形成される（図 1 3 (d) を参照）。

【 0 1 3 2 】

こうして、本実施形態による量子半導体装置が形成される。

【 0 1 3 3 】

このように、本実施形態によれば、量子ドット 1 2 上に積層形成された半導体ドット 4 4 の上端の一部が酸化されてなるドット状の酸化物 5 0 上での半導体層 5 2 の成長速度が低下することを利用して、量子ドット 1 2 上の半導体層 5 2 表面に凹部 5 4 を形成し、液滴エピタキシー法により金属よりなる粒状の電極 2 2 を形成するので、それぞれの量子ドット 1 2 上の位置に正確に電極 2 2 を形成することができる。これにより、量子ドット 1 2 に対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となる。また、量子ドット 1 2 に対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

【 0 1 3 4 】

（変形例）

次に、本実施形態の変形例による量子半導体装置及びその製造方法について図 1 4 及び図 1 5 を用いて説明する。図 1 4 は本実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図、図 1 5 は本変形例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。

【 0 1 3 5 】

まず、本変形例による量子半導体装置の構造について図 1 4 を用いて説明する。

【 0 1 3 6 】

本変形例による量子半導体装置は、第 1 及び第 2 実施形態の変形例による量子半導体装置と同様に、電極 2 2 とともに、電極 2 2 に電氣的に接続された配線 2 6 が形成されていることに主たる特徴がある。

【 0 1 3 7 】

図 1 4 に示すように、半導体層 5 2 表面には、溝 2 4 が形成されている。溝 2 4 の一端は、半導体層 5 2 表面の量子ドット 1 2 上の位置に正確に形成された凹部 5 4 近傍に位置している。

【 0 1 3 8 】

溝 2 4 内には、電極 2 2 に電氣的に接続された配線 2 6 が形成されている。

【 0 1 3 9 】

このように、本変形例による量子半導体装置は、電極 2 2 に電氣的に接続された配線 2 6 を有しているので、量子ドット 1 2 に対して電圧の印加等を行う周辺回路と電極 2 2 とを配線 2 6 を介して電氣的に接続することができる。

【 0 1 4 0 】

次に、本変形例による量子半導体装置の製造方法について図 1 5 を用いて説明する。

10

20

30

40

50

【 0 1 4 1 】

図 1 3 (a) 乃至図 1 3 (c) に示す場合と同様にして、半導体層 5 2 表面のドット状の酸化物 5 0 上の位置に凹部 5 4 を形成する (図 1 5 (a) を参照) 。

【 0 1 4 2 】

次いで、AFM酸化法により、半導体層 5 2 表面に、ライン状の酸化物 2 8 を形成する。ここで、ライン状の酸化物 2 8 の一端が、半導体層 5 2 表面の凹部 5 4 の位置にくるように、ライン状の酸化物 2 8 を形成する (図 1 5 (b) を参照) 。

【 0 1 4 3 】

次いで、エッチングにより半導体層 5 2 表面に形成されたライン状の酸化物 2 8 を除去する。こうして、ライン状の酸化物 2 8 が除去された半導体層 5 2 表面に、溝 2 4 が形成される (図 1 5 (c) を参照) 。

10

【 0 1 4 4 】

次いで、上記と同様に、液滴エピタキシー法により、半導体層 5 2 表面に、金属液滴を堆積する。このとき、金属液滴は、半導体層 5 2 表面の凹部 5 4 内に形成されるとともに、溝 2 4 内に形成される。

【 0 1 4 5 】

続いて、堆積終了後の冷却により、金属液滴は固化し、金属粒子が形成される。こうして、金属よりなる粒状の電極 2 2 とともに、溝 2 4 内に金属粒子が連続的に接続されてなる配線 2 6 が形成される (図 1 5 (d) を参照) 。

【 0 1 4 6 】

こうして、本変形例による量子半導体装置が製造される。

20

【 0 1 4 7 】

なお、この後、第 1 実施形態の変形例による場合と同様に、配線 2 6 に電気的に接続される電極パッド 3 2 を形成してもよい。

【 0 1 4 8 】

[第 4 実施形態]

本発明の第 4 実施形態による量子半導体装置及びその製造方法について図 1 6 及び図 1 7 を用いて説明する。図 1 6 は本実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図、図 1 7 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。なお、第 1 乃至第 3 実施形態による量子半導体装置及びその製造方法と同様の構成要素については同一の符号を付し説明を省略し或いは簡略にする。

30

【 0 1 4 9 】

まず、本実施形態による量子半導体装置の構造について図 1 6 を用いて説明する。本実施形態による量子半導体装置は、第 1 実施形態の変形例による場合と同様に、電極とともに配線が形成されている。

【 0 1 5 0 】

図 1 6 に示すように、半導体基板 1 0 上には、自己形成された量子ドット 1 2 を含む半導体よりなる量子ドット層 1 4 が形成されている。

【 0 1 5 1 】

量子ドット層 1 6 上には、中間層すなわち半導体層 1 8 が形成されている。量子ドット 1 2 上の半導体層 1 8 中には、格子不整合による歪が生じている。

40

【 0 1 5 2 】

半導体層 1 8 表面の歪が生じている位置には、金属よりなる粒状の電極 2 2 が形成されている。また、半導体層 1 8 表面には、ライン状の酸化物 5 6 が形成されている。ライン状の酸化物 5 6 の一端は、電極 2 2 の近傍に位置している。

【 0 1 5 3 】

電極 2 2 及びライン状の酸化物 5 6 が形成された半導体層 1 8 上には、キャップ層すなわち半導体層 5 8 が形成されている。

【 0 1 5 4 】

半導体層 5 8 の電極 2 2 上には、電極 2 2 に達する開口部 6 0 が形成されている。開口部

50

60には、電極22に電氣的に接続する電極23が埋め込まれている。

【0155】

また、半導体層58表面には、ライン状の酸化物56に沿うように溝62が形成されている。

【0156】

溝62内には、電極23に電氣的に接続された配線64が形成されている。

【0157】

このように、本実施形態による量子半導体装置は、配線64の下に、ライン状の酸化物56が形成されていることに主たる特徴がある。ライン状の酸化物56により、配線64の下方においてキャリアに対するバリアが形成され、配線64からのリーク電流を抑制することができる。

10

【0158】

次に、本実施形態による量子半導体装置の製造方法について図17を用いて説明する。

【0159】

まず、第1実施形態の図3(a)乃至図3(c)に示す場合と同様にして、半導体層18表面の量子ドット12上の位置に電極22を形成する。

【0160】

次いで、AFM酸化法により、半導体層18表面にライン状の酸化物56を形成する(図17(a)を参照)。ここで、ライン状の酸化物56の一端が電極22の近傍に位置するように、ライン状の酸化物56を形成する。

20

【0161】

次いで、電極22と、ライン状の酸化物56とが表面に形成された半導体層18上に、例えばMBE法により、半導体層58を形成する。

【0162】

このとき、電極22上とライン状の酸化物56上の半導体層58の成長速度は、他の領域の半導体層58の成長速度よりも遅くなる。この結果、半導体層58表面の電極22上の位置に凹部64が形成される。また、ライン状の酸化物56に沿って半導体層58表面に溝62が形成される(図17(b)を参照)。

【0163】

次いで、AFM酸化法により、半導体層58の凹部64が形成された部分を酸化する。これにより、半導体層58の凹部64が形成された部分が酸化されてなるドット状の酸化物66が形成される(図17(c)を参照)。ここで、AFM酸化法による酸化は、ドット状の酸化物66の大きさがその下の電極22に達するまで行う。

30

【0164】

次いで、エッチングにより、凹部64の位置に形成されたドット状の酸化物66を除去する。これにより、半導体層58に、電極22に達する開口部60が形成される(図17(d)を参照)。

【0165】

次いで、液滴エピタキシー法により、金属液滴を、開口部60と溝62とが形成された半導体層58表面に堆積する。このとき、金属液滴は、電極22に達する開口部60内に形成されるとともに、溝62内に形成される。

40

【0166】

続いて、堆積終了後の冷却により、金属液滴は固化し、金属粒子が形成される。こうして、電極22に電氣的に接続された金属よりなる粒状の電極23とともに、溝62内に金属粒子が連続的に接続されてなる配線64が形成される(図17(e)を参照)。

【0167】

こうして、本実施形態による量子半導体装置が形成される。

【0168】

なお、この後、第1実施形態の変形例による場合と同様に、配線26に電氣的に接続される電極パッド32を形成してもよい。

50

【0169】

このように、本実施形態によれば、ライン状の酸化物56上の半導体層58表面に形成された溝62内に配線64を形成するので、ライン状の酸化物56により、配線64下方においてキャリアに対するバリアを形成することができる。これにより、配線64からのリーク電流を抑制することができる。

【0170】

なお、本実施形態では、ライン状の酸化物56を1層形成する場合について説明したが、上述の工程を繰り返すことにより、配線64の下に複数のライン状の酸化物56を積層形成してもよい。配線64の下に複数のライン状の酸化物56を形成することにより、さらに効果的に配線64からのリーク電流を抑制することが可能となる。

10

【0171】

(変形例(その1))

本実施形態の変形例(その1)による量子半導体装置及びその製造方法について図18及び図19を用いて説明する。図18は本変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図、図19は本変形例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。

【0172】

まず、本変形例による量子半導体装置の構造について図18を用いて説明する。

【0173】

本変形例による量子半導体装置は、第2実施形態による場合と同様にして、電極22が量子ドット12上に形成されているものである。すなわち、図18に示すように、半導体層18表面の量子ドット12上の位置に形成された凹部34内に電極22が形成されている。

20

【0174】

半導体層18表面には、凹部34内に形成された電極22近傍に一端が位置するライン状の酸化物56が形成されている。

【0175】

電極22及びライン状の酸化物56が形成された半導体層18上には、半導体層58が形成されている。

【0176】

半導体層58には、上記と同様に、電極22に電氣的に接続された電極23と、電極23に電氣的に接続された配線64が形成されている。

30

【0177】

こうして本変形例による量子半導体装置が構成されている。

【0178】

次に、本変形例による量子半導体装置の製造方法について図19を用いて説明する。

【0179】

まず、第2実施形態による場合と同様にして、半導体層18表面における量子ドット12上の位置に形成された凹部34内に電極22を形成する。

【0180】

次いで、AFM酸化法により、凹部34内に形成された電極22近傍に一端が位置するライン状の酸化物56を形成する(図19(a)を参照)。

40

【0181】

次いで、電極22と、ライン状の酸化物56とが表面に形成された半導体層18上に、半導体層58を形成する。この後、半導体層58に電極22に達する開口部60を形成する(図19(b)を参照)。

【0182】

次いで、液滴エピタキシー法により、電極22に達する開口部60内に電極23を形成するとともに、溝62内に配線64を形成する。

【0183】

こうして、本変形例による量子半導体装置が形成される。

50

【 0 1 8 4 】

(変形例 (その 2))

本実施形態の変形例 (その 2) による量子半導体装置及びその製造方法について図 2 0 及び図 2 1 を用いて説明する。図 2 0 は本変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図、図 2 1 は本変形例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。

【 0 1 8 5 】

まず、本変形例による量子半導体装置の構造について図 2 0 を用いて説明する。

【 0 1 8 6 】

本変形例による量子半導体装置は、第 3 実施形態による場合と同様にして、電極 2 2 が量子ドット 1 2 上に形成されているものである。すなわち、図 2 0 に示すように、半導体層 5 2 表面における量子ドット 1 2 及び半導体ドット 4 4 上の位置に形成された凹部 5 4 内に電極 2 2 が形成されている。

【 0 1 8 7 】

中間層すなわち半導体層 5 2 表面には、凹部 5 4 内に形成された電極 2 2 近傍に一端が位置するライン状の酸化物 5 6 が形成されている。

【 0 1 8 8 】

電極 2 2 及びライン状の酸化物 5 6 が形成された半導体層 5 2 上には、キャップ層すなわち半導体層 5 8 が形成されている。

【 0 1 8 9 】

半導体層 5 8 には、上記と同様に、電極 2 2 に電氣的に接続された電極 2 3 と、電極 2 3 に電氣的に接続された配線 6 4 が形成されている。

【 0 1 9 0 】

こうして本変形例による量子半導体装置が構成されている。

【 0 1 9 1 】

次に、本変形例による量子半導体装置の製造方法について図 2 1 を用いて説明する。

【 0 1 9 2 】

まず、第 3 実施形態による場合と同様にして、半導体層 5 2 表面における量子ドット 1 2 及び半導体ドット 4 4 上の位置に形成された凹部 5 4 内に電極 2 2 を形成する。

【 0 1 9 3 】

次いで、A F M 酸化法により、凹部 5 4 内に形成された電極 2 2 近傍に一端が位置するライン状の酸化物 5 6 を形成する (図 2 1 (a) を参照) 。

【 0 1 9 4 】

次いで、電極 2 2 と、ライン状の酸化物 5 6 とが表面に形成された半導体層 5 2 上に、半導体層 5 8 を形成する。この後、半導体層 5 8 に電極 2 2 に達する開口部 6 0 を形成する (図 2 1 (b) を参照) 。

【 0 1 9 5 】

次いで、液滴エピタキシー法により、電極 2 2 に達する開口部 6 0 内に電極 2 3 を形成するとともに、溝 6 2 内に配線 6 4 を形成する。

【 0 1 9 6 】

こうして、本変形例による量子半導体装置が形成される。

【 0 1 9 7 】

[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。

【 0 1 9 8 】

例えば上記実施形態では、S - K モードにより自己形成された量子ドットに対して電極を形成する場合を例に説明したが、電極を形成する量子ドットは S - K モードにより自己形成されたものに限定されるものではない。例えば、垂直に積層形成された量子ドットに対して電極を形成する場合にも、本発明を適用することができる。

【 0 1 9 9 】

また、上記実施形態では、A F M 酸化法により、量子ドットを酸化し、或いは半導体層を

10

20

30

40

50

酸化することによりライン状の酸化物を形成したが、電圧を印加するための探針は、針状の導電体のものであれば、種々のものを用いることができる。例えば、探針として、カーボンナノチューブを用いることもできる。

【0200】

また、上記実施形態では、AFM酸化法により、量子ドットを酸化し、或いは半導体層を酸化する場合を例に説明したが、量子ドット等の酸化は、AFM酸化に限定されるものではない。量子ドット等の酸化には、微小領域を選択的に酸化することができる種々の手法を用いることができる。

【0201】

(付記1) 半導体基板上に形成された量子ドットと、前記量子ドットを埋め込むように形成された半導体層と、前記量子ドットの存在により前記半導体層に生じる歪の位置上に自己整合的に形成された電極とを有することを特徴とする量子半導体装置。

10

【0202】

(付記2) 付記1記載の量子半導体装置において、前記半導体層は、前記量子ドットの材料と格子定数の異なる材料よりなることを特徴とする量子半導体装置。

【0203】

(付記3) 半導体基板上に形成された量子ドットと、前記量子ドットを埋め込むように形成された半導体層と、前記半導体層表面の前記量子ドット上の位置に形成された凹部に形成された電極とを有することを特徴とする量子半導体装置。

【0204】

(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、前記半導体層表面に形成された溝内に形成され、前記電極に電氣的に接続された配線を更に有することを特徴とする量子半導体装置。

20

【0205】

(付記5) 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、前記半導体層表面に形成され、前記電極近傍に一端が位置するライン状の酸化物と、前記電極及び前記ライン状の酸化物を埋め込むように形成された他の半導体層と、前記他の半導体層に埋め込まれ、前記電極に電氣的に接続された他の電極と、前記ライン状の酸化物に沿って前記他の半導体層表面に形成された溝内に形成され、前記他の電極に電氣的に接続された配線とを更に有することを特徴とする量子半導体装置。

30

【0206】

(付記6) 半導体基板上に形成された量子ドットと、前記量子ドットを埋め込むように形成された第1の半導体層と、前記第1の半導体層上の前記量子ドット上の位置に形成された半導体ドットと、前記半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物と、前記半導体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の半導体層表面の前記ドット状の酸化物上の位置に形成された凹部に形成された電極とを有することを特徴とする量子半導体装置。

【0207】

(付記7) 付記6記載の量子半導体装置において、前記半導体ドットは、量子ドット又はアンチドットであることを特徴とする量子半導体装置。

40

【0208】

(付記8) 付記6又は7記載の量子半導体装置において、前記第2の半導体層表面に形成された溝内に形成され、前記電極に電氣的に接続された配線を更に有することを特徴とする量子半導体装置。

【0209】

(付記9) 付記6又は7記載の量子半導体装置において、前記第2の半導体層表面に形成され、前記電極近傍に一端が位置するライン状の酸化物と、前記電極及び前記ライン状の酸化物を埋め込むように形成された第3の半導体層と、前記第3の半導体層に埋め込まれ、前記電極に電氣的に接続された他の電極と、前記ライン状の酸化物に沿って前記第3の半導体層表面に形成された溝内に形成され、前記他の電極に電氣的に接続された配線と

50

を更に有することを特徴とする量子半導体装置。

【0210】

(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の製造方法において、前記量子ドットは、S-Kモードによって自己形成された三次元成長島よりなることを特徴とする量子半導体装置。

【0211】

(付記11) 半導体基板上に、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半導体層に生じる歪の位置上に自己整合的に電極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。

10

【0212】

(付記12) 半導体基板上に、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半導体層を形成する工程と、前記半導体層上の前記量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成する工程と、前記半導体ドットと前記半導体ドットの直下における前記半導体層とを酸化することにより、その一部が前記半導体層に埋め込まれたドット状の酸化物を形成する工程と、前記ドット状の酸化物を除去することにより、前記半導体層表面に凹部を形成する工程と、前記半導体層表面に形成された前記凹部内に電極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。

【0213】

(付記13) 付記12記載の量子半導体装置の製造方法において、前記半導体ドットを形成する工程では、前記半導体層と格子定数が異なる材料よりなる半導体ドット層をエピタキシャル成長することにより、三次元成長島よりなる前記半導体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。

20

【0214】

(付記14) 付記12又は13記載の量子半導体装置の製造方法において、前記ドット状の酸化物を形成する工程では、前記半導体ドットに針状の導電体を近接し、前記半導体基板と前記針状の導電体との間に電圧を印加することにより前記半導体ドットと前記半導体ドットの直下の前記半導体層とを酸化することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【0215】

(付記15) 付記11乃至14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、前記電極を形成する工程の前に、前記半導体層を酸化することにより、前記半導体層表面に、前記半導体層の前記電極の形成予定位置の近傍に一端が位置するライン状の酸化物を形成する工程と、前記ライン状の酸化物を除去することにより、前記半導体層表面に溝を形成する工程とを更に有し、前記電極を形成する工程では、前記電極とともに、前記溝内に、前記電極に電氣的に接続された配線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

【0216】

(付記16) 付記11乃至14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、前記電極を形成する工程の後に、前記半導体層を酸化することにより、前記半導体層表面に、前記半導体層の前記電極の形成予定位置の近傍に一端が位置するライン状の酸化物を形成する工程と、前記電極上の位置における表面に凹部が形成され、前記ライン状の酸化物に沿って表面に溝が形成されるように、前記電極及び前記ライン状の酸化物を埋め込む他の半導体層を形成する工程と、前記凹部に前記電極に達する開口部を形成する工程と、前記開口部内に前記電極に電氣的に接続された他の電極を形成するとともに、前記溝内に前記他の電極に電氣的に接続された前記配線を形成する工程と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。

40

【0217】

(付記17) 付記16記載の量子半導体装置の製造方法において、前記凹部に前記電極に達する前記開口部を形成する工程では、前記凹部に針状の導電体を近接し、前記半導体

50

基板と前記針状の導電体との間に電圧を印加することにより前記凹部の前記他の半導体層を酸化し、前記凹部の前記他の半導体層の酸化物を除去することにより前記電極に達する前記開口部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。

【0218】

(付記18) 付記15乃至17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、前記ライン状の酸化物を形成する工程では、前記半導体層表面に針状の導電体を近接し、前記半導体基板と前記針状の導電体との間に電圧を印加しつつ前記針状の導電体を走査して前記半導体層表面を酸化することにより、前記ライン状の酸化物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。

【0219】

(付記19) 半導体基板上に、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1の半導体層を形成する工程と、前記第1の半導体層上の前記量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成する工程と、前記半導体ドットの一部を酸化することにより、前記半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物を形成する工程と、前記ドット状の酸化物上の位置における表面に凹部が形成されるように、前記ドット状の酸化物及び前記半導体ドットを埋め込む第2の半導体層を形成する工程と、前記第2の半導体層表面に形成された前記凹部内に電極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。

10

【0220】

(付記20) 付記19記載の量子半導体装置の製造方法において、前記半導体ドットを形成する工程では、前記第1の半導体層と格子定数が異なる材料よりなる半導体ドット層をエピタキシャル成長することにより、三次元成長島よりなる前記半導体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。

20

【0221】

(付記21) 付記19又は20記載の量子半導体装置の製造方法において、前記ドット状の酸化物を形成する工程では、前記半導体ドットに針状の導電体を近接し、前記半導体基板と前記針状の導電体との間に電圧を印加することにより前記半導体ドットの一部を酸化することを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【0222】

(付記22) 付記19乃至21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、前記電極を形成する工程の前に、前記第2の半導体層を酸化することにより、前記第2の半導体層表面に、前記第2の半導体層の前記電極の形成予定位置の近傍に一端が位置するライン状の酸化物を形成する工程と、前記ライン状の酸化物を除去することにより、前記第2の半導体層表面に溝を形成する工程とを更に有し、前記電極を形成する工程では、前記電極とともに、前記溝内に、前記電極に電氣的に接続された配線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

【0223】

(付記23) 付記19乃至21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、前記電極を形成する工程の後に、前記第2の半導体層を酸化することにより、前記第2の半導体層表面に、前記前記第2半導体層の前記電極の形成予定位置の近傍に一端が位置するライン状の酸化物を形成する工程と、前記電極上の位置における表面に凹部が形成され、前記ライン状の酸化物に沿って表面に溝が形成されるように、前記電極及び前記ライン状の酸化物を埋め込む第3の半導体層を形成する工程と、前記凹部に前記電極に達する開口部を形成する工程と、前記開口部内に前記電極に電氣的に接続された他の電極を形成するとともに、前記溝内に前記他の電極に電氣的に接続された前記配線を形成する工程と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。

40

【0224】

(付記24) 付記23記載の量子半導体装置の製造方法において、前記凹部に前記電極に達する前記開口部を形成する工程では、前記凹部に針状の導電体を近接し、前記半導体基板と前記針状の導電体との間に電圧を印加することにより前記凹部の前記第3の半導体

50

層を酸化し、前記凹部の前記第3の半導体層の酸化物を除去することにより前記電極に達する前記開口部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。

【0225】

(付記25) 付記22乃至24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、前記ライン状の酸化物を形成する工程では、前記第2の半導体層表面に針状の導電体を近接し、前記半導体基板と前記針状の導電体との間に電圧を印加しつつ前記針状の導電体を走査して前記第2の半導体層表面を酸化することにより、前記ライン状の酸化物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。

【0226】

(付記26) 付記11乃至25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、前記電極を形成する工程では、液滴エピタキシー法により、前記電極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

【0227】

(付記27) 付記11乃至26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、前記量子ドットを形成する工程では、前記半導体基板と格子定数が異なる材料よりなる量子ドット層をエピタキシャル成長することにより、三次元成長島よりな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。

【0228】

(付記28) 付記14、17、18、21、24、又は25に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

【0229】

(付記29) 付記14、17、18、21、24、又は25に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、カーボンナノチューブよりなることを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【0230】

【発明の効果】

以上の通り、本発明によれば、半導体基板上に、量子ドットを形成し、量子ドットを埋め込むように半導体層を形成し、量子ドットの存在により半導体層に生じる歪の位置上に自己整合的に電極を形成するので、それぞれの量子ドット上に電極を正確に形成することができる。したがって、かかる電極を介して、量子ドットに対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となり、また、量子ドットに対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

30

【0231】

また、本発明によれば、半導体基板上に、量子ドットを形成し、量子ドットを埋め込むように半導体層を形成し、半導体層上の量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成し、半導体ドットと半導体ドットの直下における半導体層とを酸化することにより、その一部が半導体層に埋め込まれたドット状の酸化物を形成し、ドット状の酸化物を除去することにより、半導体層表面に凹部を形成し、半導体層表面に形成された凹部内に電極を形成するので、それぞれの量子ドット上に電極を正確に形成することができる。したがって、かかる電極を介して、量子ドットに対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となり、また、量子ドットに対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

40

【0232】

さらに、本発明によれば、半導体基板上に、量子ドットを形成し、量子ドットを埋め込むように第1の半導体層を形成し、第1の半導体層上の量子ドット上の位置に、半導体ドットを形成し、半導体ドットの一部を酸化することにより、半導体ドットの一部が酸化されてなるドット状の酸化物を形成し、ドット状の酸化物上の位置における表面に凹部が形成されるように、ドット状の酸化物及び半導体ドットを埋め込む第2の半導体層を形成し、第2の半導体層表面に形成された凹部内に電極を形成するので、それぞれの量子ドット上に電極を正確に形成することができる。したがって、かかる電極を介して、量子ドットに

50

対して正確に電氣的にアクセスすることが可能となり、また、量子ドットに対してそれぞれ独立して電氣的にアクセスすることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の第 1 実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 2】本発明の第 1 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である。

【図 3】本発明の第 1 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 4】本発明の第 1 実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 5】本発明の第 1 実施形態の変形例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】本発明の第 1 実施形態の変形例による量子半導体装置において配線を電極パッドに接続した場合を示す上面図である。

【図 7】本発明の第 2 実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 8】本発明の第 2 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 9】本発明の第 2 実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 10】本発明の第 2 実施形態の変形例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 11】本発明の第 3 実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 12】本発明の第 3 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である。

【図 13】本発明の第 3 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 14】本発明の第 3 実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 15】本発明の第 3 実施形態の変形例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 16】本発明の第 4 実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 17】本発明の第 4 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 18】本発明の第 4 実施形態の変形例（その 1）による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 19】本発明の第 4 実施形態の変形例（その 1）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 20】本発明の第 4 実施形態の変形例（その 2）による量子半導体装置の構造を示す断面図である。

【図 21】本発明の第 4 実施形態の変形例（その 2）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。

【符号の説明】

1 0 ... 半導体基板

1 2 ... 量子ドット

1 4 ... 量子ドット層

1 6 ... 濡れ層

1 8 ... 半導体層

2 2、2 3 ... 電極

2 4 ... 溝

2 6 ... 配線

10

20

30

40

50

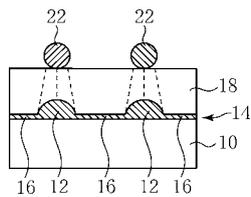
- 2 8 ... ライン状の酸化物
- 3 0 ... 探針
- 3 2 ... 電極パッド
- 3 4 ... 凹部
- 3 6 ... 半導体ドット
- 3 8 ... 半導体ドット層
- 4 0 ... 濡れ層
- 4 2 ... ドット状の酸化物
- 4 4 ... 半導体ドット
- 4 6 ... 半導体ドット層
- 4 8 ... 濡れ層
- 5 0 ... ドット状の酸化物
- 5 2 ... 半導体層
- 5 4 ... 凹部
- 5 6 ... ライン状の酸化物
- 5 8 ... 半導体層
- 6 0 ... 開口部
- 6 2 ... 溝
- 6 4 ... 凹部
- 6 6 ... ドット状の酸化物

10

20

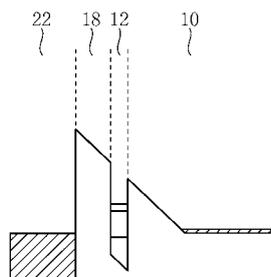
【 図 1 】

本発明の第1実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図



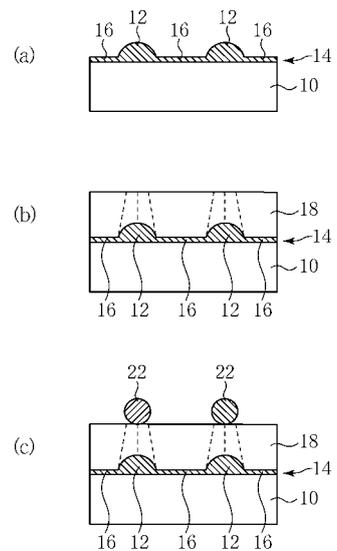
【 図 2 】

本発明の第1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



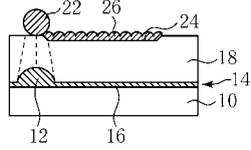
【 図 3 】

本発明の第1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



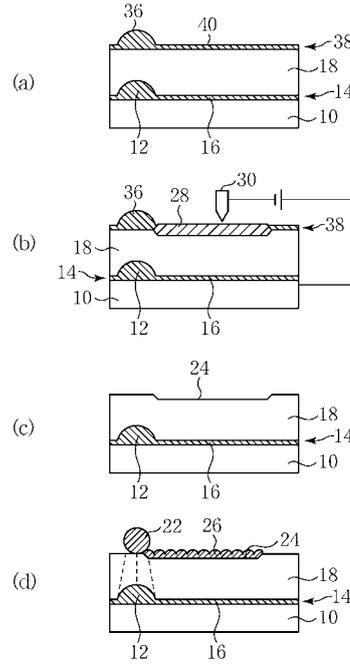
【 図 4 】

本発明の第1実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図



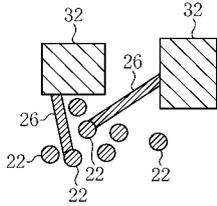
【 図 5 】

本発明の第1実施形態の変形例による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図



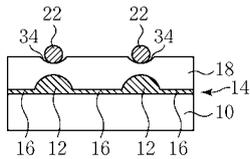
【 図 6 】

本発明の第1実施形態の変形例による量子半導体装置において配線を電極パッドに接続した場合はを示す上面図



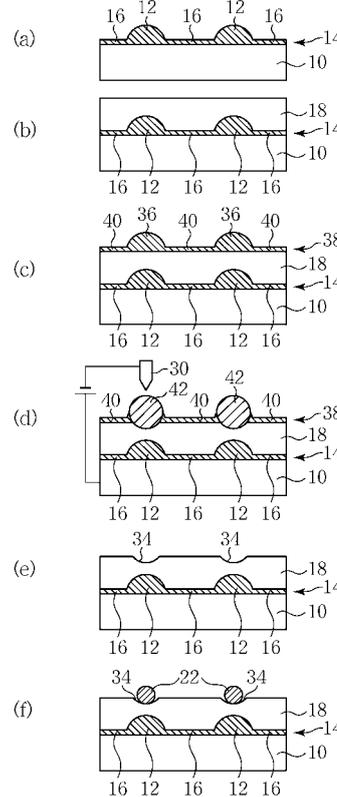
【 図 7 】

本発明の第2実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図



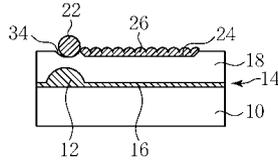
【 図 8 】

本発明の第2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



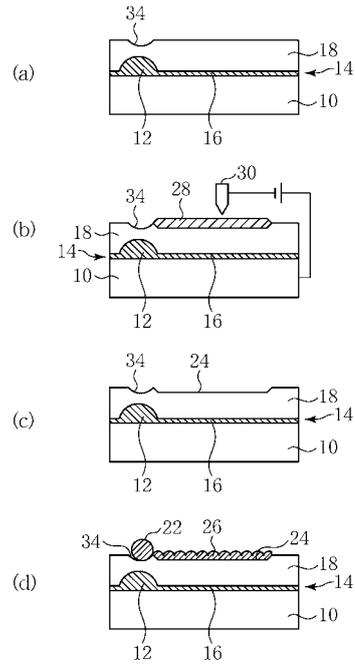
【 図 9 】

本発明の第2実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図



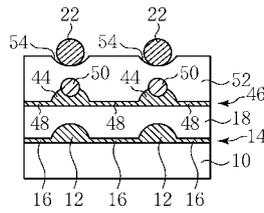
【 図 10 】

本発明の第2実施形態の変形例による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図



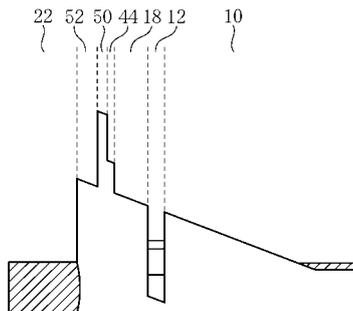
【 図 11 】

本発明の第3実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図



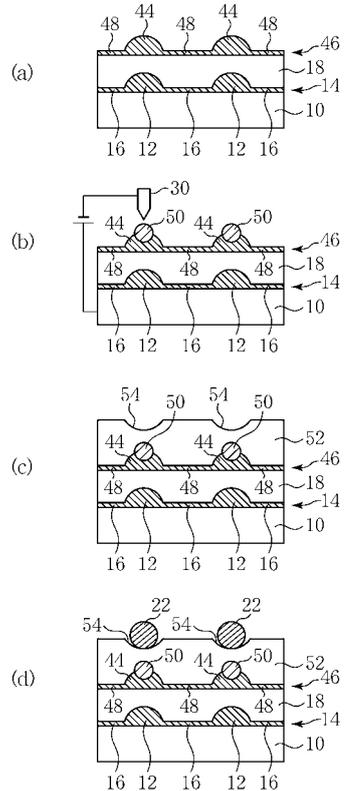
【 図 12 】

本発明の第3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



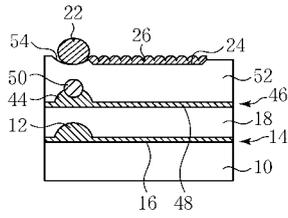
【 図 13 】

本発明の第3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



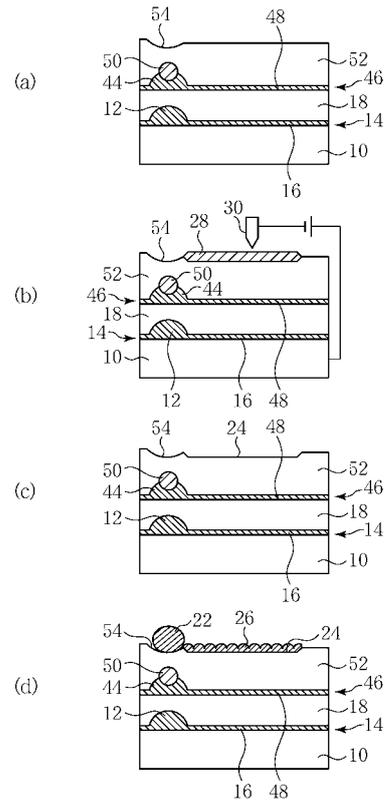
【 図 1 4 】

本発明の第3実施形態の変形例による量子半導体装置の構造を示す断面図



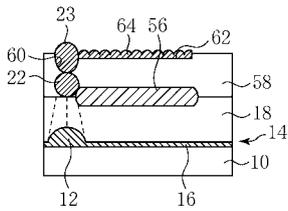
【 図 1 5 】

本発明の第3実施形態の変形例による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図



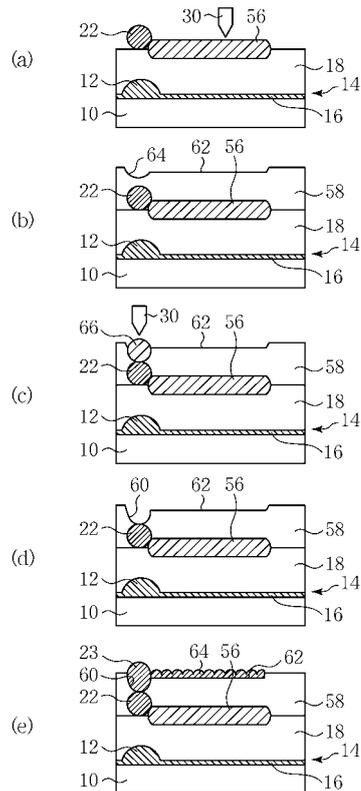
【 図 1 6 】

本発明の第4実施形態による量子半導体装置の構造を示す断面図



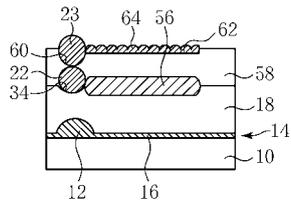
【 図 1 7 】

本発明の第4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



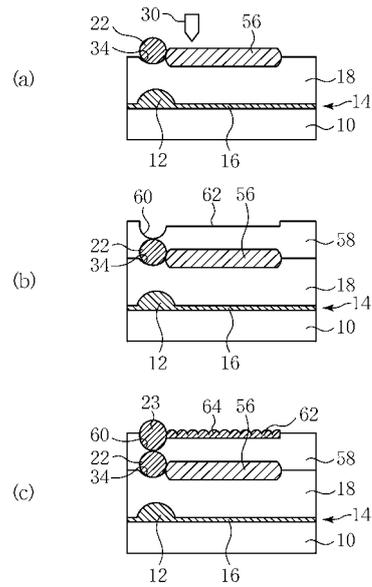
【 図 1 8 】

本発明の第4実施形態の変形例(その1)による量子半導体装置の構造を示す断面図



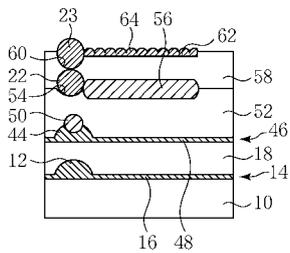
【 図 1 9 】

本発明の第4実施形態の変形例(その1)による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図



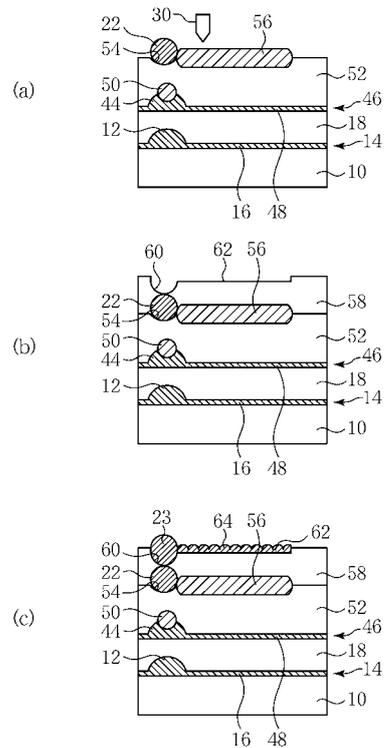
【 図 2 0 】

本発明の第4実施形態の変形例(その2)による量子半導体装置の構造を示す断面図



【 図 2 1 】

本発明の第4実施形態の変形例(その2)による量子半導体装置の製造方法を示す工程断面図



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2000-150862(JP,A)
特開平09-326506(JP,A)
特開平10-173181(JP,A)
特開平11-112099(JP,A)
特開2001-053270(JP,A)
特開2001-007315(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 29/06
H01L 21/28
H01L 21/285