

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7689371号  
(P7689371)

(45)発行日 令和7年6月6日(2025.6.6)

(24)登録日 令和7年5月29日(2025.5.29)

|                          |                |   |
|--------------------------|----------------|---|
| (51)国際特許分類               | F I            |   |
| H 0 1 L 21/20 (2006.01)  | H 0 1 L 21/20  |   |
| H 0 1 L 21/205 (2006.01) | H 0 1 L 21/205 |   |
| H 0 1 L 21/02 (2006.01)  | H 0 1 L 21/02  | B |
| C 2 3 C 16/02 (2006.01)  | H 0 1 L 21/02  | C |
| C 2 3 C 16/26 (2006.01)  | C 2 3 C 16/02  |   |

請求項の数 17 (全16頁) 最終頁に続く

|                   |                             |          |                        |
|-------------------|-----------------------------|----------|------------------------|
| (21)出願番号          | 特願2021-520542(P2021-520542) | (73)特許権者 | 596060697              |
| (86)(22)出願日       | 令和1年10月16日(2019.10.16)      |          | マサチューセッツ インスティテュート     |
| (65)公表番号          | 特表2022-504927(P2022-504927  |          | オブ テクノロジー              |
|                   | A)                          |          | アメリカ合衆国マサチューセッツ州 0 2   |
| (43)公表日           | 令和4年1月13日(2022.1.13)        |          | 1 3 9 ケンブリッジ, マサチューセッツ |
| (86)国際出願番号        | PCT/US2019/056428           |          | ・アヴェニュー・7 7            |
| (87)国際公開番号        | WO2020/081623               | (74)代理人  | 100078282              |
| (87)国際公開日         | 令和2年4月23日(2020.4.23)        |          | 弁理士 山本 秀策              |
| 審査請求日             | 令和4年10月14日(2022.10.14)      | (74)代理人  | 100113413              |
| (31)優先権主張番号       | 62/746,072                  |          | 弁理士 森下 夏樹              |
| (32)優先日           | 平成30年10月16日(2018.10.16)     | (72)発明者  | キム, ジファン               |
| (33)優先権主張国・地域又は機関 | 米国(US)                      |          | アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2   |
|                   |                             |          | 1 4 1, ケンブリッジ, ミュージアム  |
|                   |                             |          | ウェイ 1 0, ナンバー 1 8 2 4  |
|                   |                             | (72)発明者  | コン, ウェイ                |

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 昇華させられた S I C 基板上のカーボンバッファを用いたエピタキシャル成長プレート

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

方法であって、

第 1 の基板の上にカーボンバッファ層を形成し、前記カーボンバッファ層上にグラフェン層を形成することであって、前記カーボンバッファ層は、前記第 1 の基板に共有結合されている、ことと、

前記グラフェン層を除去することによって前記カーボンバッファ層を露わにし、加工プラットフォームを形成することと、

前記第 1 の基板に共有結合されている前記カーボンバッファ層上に第 1 のエピタキシャル層を形成することであって、前記第 1 のエピタキシャル層は、半導体を含む、こととを含む方法。

10

【請求項 2】

前記第 1 の基板は、炭化ケイ素を含み、前記グラフェン層は、単結晶グラフェン層を含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記方法は、前記第 1 のエピタキシャル層を前記カーボンバッファ層から第 2 の基板に転写することをさらに含む、請求項 1 ~ 2 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 4】

前記第 1 のエピタキシャル層を形成することは、前記第 1 の基板を種晶として用いて前記第 1 のエピタキシャル層をエピタキシャル成長させることを含む、請求項 1 ~ 3 のい

20

れか一項に記載の方法。

【請求項 5】

前記方法は、前記第 1 のエピタキシャル層を前記第 2 の基板に転写した後に、前記カーボンバッファ層上に第 2 のエピタキシャル層を形成することをさらに含む、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 6】

前記第 1 のエピタキシャル層を転写することは、前記第 1 のエピタキシャル層を離脱させることを含む、請求項 3 ~ 5 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記第 1 のエピタキシャル層を転写することは、  
前記第 1 のエピタキシャル層上に金属ストレッサを形成することと、  
前記金属ストレッサ上に可撓性テープを配置することと、  
前記可撓性テープを用いて前記カーボンバッファ層から前記第 1 のエピタキシャル層および前記金属ストレッサを剥ぎ取ることと  
を含む、請求項 3 ~ 6 のいずれか一項に記載の方法。

10

【請求項 8】

前記第 1 のエピタキシャル層は、III - V 族半導体、Si、Ge、III - N 半導体、SiC、SiGe、および/または、II - VI 族半導体を含む、請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

前記カーボンバッファ層は、カーボンクラスタを含む、請求項 1 ~ 8 のいずれか一項に記載の方法。

20

【請求項 10】

前記カーボンバッファ層は、カーボンネットワークを含む、請求項 1 ~ 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 11】

前記カーボンバッファ層は、結晶構造を含む、請求項 1 ~ 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

前記グラフェン層は、ファンデルワールス力を介して前記カーボンバッファ層と相互作用する、請求項 1 ~ 11 のいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 13】

前記第 1 のエピタキシャル層と前記第 1 の基板との間の直接的な接触が存在しない、請求項 1 ~ 12 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 14】

前記第 1 の基板は、ポテンシャル場を有し、前記ポテンシャル場は、前記カーボンバッファ層を越えて前記第 1 のエピタキシャル層に達し、前記第 1 のエピタキシャル層と相互作用する、請求項 1 ~ 13 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 15】

前記第 1 の基板の上にカーボンバッファ層を形成し、前記カーボンバッファ層上に前記グラフェン層を形成することは、複数ステップの焼きなましプロセスを含む、請求項 1 ~ 14 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 16】

前記第 1 のエピタキシャル層を形成することは、有機金属化学気相成長法を含む、請求項 1 ~ 15 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 17】

前記第 1 のエピタキシャル層は、半導体素子に加工される、請求項 1 ~ 16 のいずれか一項に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

50

## 【 0 0 0 1 】

( 関連出願 )

本願は、2018年10月16日に出願され、「Epitaxial Growth Template Using Carbon Buffer on Sublimated SiC Substrate」と題された米国仮特許出願第62/746,072号への米国特許法§119(e)の下の優先権を主張し、この出願は、全ての目的のためにその全体が参照によって本明細書中に援用される。

## 【 0 0 0 2 】

( 技術分野 )

概して、(例えば、ナノ加工を用いて)半導体材料を形成するための装置、システム、および方法が説明される。

10

## 【 背景技術 】

## 【 0 0 0 3 】

高度電子テクノロジーおよび高度光子テクノロジーでは、素子は、たいていIII-N半導体、III-V族半導体、II-VI族半導体、およびGe等の機能半導体から加工される。これらの機能半導体の格子定数は、典型的に、シリコン基板の格子定数に整合しない。業界において理解されているように、基板と基板上のエピタキシャル層との間の格子定数の不整合は、エピタキシャル層内にひずみを導入し、それによって、欠陥のないより厚い層のエピタキシャル成長を妨げる。したがって、非シリコン基板が、たいてい、ほとんどの機能半導体のエピタキシャル成長のための種晶として採用される。しかしながら、機能材料の格子定数に整合する格子定数を有する非Si基板は、コストがかかり得、したがって、非Si電子素子/光子素子の開発を制限し得る。

20

## 【 発明の概要 】

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 0 4 】

( 概要 )

本発明の実施形態は、ナノ加工のための装置、システムおよび方法を含む。一例では、半導体素子を製造する方法は、シリコン昇華による第1の基板上的カーボンバッファ層およびカーボンバッファ層上のグラフェン層の形成を含む。方法は、グラフェン層を除去して、カーボンバッファ層を露わにし、加工プラットフォームを形成することも含む。

30

## 【 0 0 0 5 】

前述の概念および以下でより詳細に議論される追加の概念の全ての組み合わせ(提供されるそのような概念は、互いに矛盾しない)が本明細書中で開示される本発明の主題の一部として構想されていることが認識されるべきである。特に、この開示の最後に現れる請求される主題の全ての組み合わせが、本明細書中で開示される本発明の主題の一部として構想されている。参照によって援用される開示のいずれかにおいても現れ得る本明細書中で明示的に展開される用語が本明細書中で開示される特定の概念にほとんど一致した意味であることも認識されるべきである。

本発明は、例えば、以下を提供する。

( 項目 1 )

第1の基板の上にカーボンバッファ層を形成し、前記カーボンバッファ層上にグラフェン層を形成することと、

前記グラフェン層を除去することによって前記カーボンバッファ層を露わにし、加工プラットフォームを形成することと

を含む、方法。

40

( 項目 2 )

前記第1の基板は、炭化ケイ素を備え、前記グラフェン層は、単結晶グラフェン層を備えている、項目1に記載の方法。

( 項目 3 )

前記カーボンバッファ層上に第1のエピタキシャル層を形成することと、

50

前記第 1 のエピタキシャル層を前記カーボンバッファ層から第 2 の基板に転写することとをさらに含む、項目 1 ~ 2 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 4)

前記第 1 のエピタキシャル層を形成することは、前記第 1 の基板を種晶として用いた前記第 1 のエピタキシャル層のエピタキシャル成長を含む、項目 3 に記載の方法。

(項目 5)

前記第 1 のエピタキシャル層を前記第 2 の基板に転写した後、前記カーボンバッファ層上に第 2 のエピタキシャル層を形成することをさらに含む、項目 3 ~ 4 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 6)

前記第 1 のエピタキシャル層を転写することは、前記第 1 のエピタキシャル層を離脱させることを含む、項目 3 ~ 5 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 7)

前記第 1 のエピタキシャル層を転写することは、

前記第 1 のエピタキシャル層上に金属ストレッサを形成することと、

前記金属ストレッサ上に可撓性テープを配置することと、

前記可撓性テープを用いて前記カーボンバッファ層から前記第 1 のエピタキシャル層および前記金属ストレッサを剥ぎ取ることと

を含む、項目 3 ~ 6 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 8)

前記第 1 のエピタキシャル層は、半導体を備えている、項目 3 ~ 7 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 9)

前記第 1 のエピタキシャル層は、III - V 族半導体、Si、Ge、III - N 半導体、SiC、SiGe、および/またはII - VI 族半導体を備えている、項目 3 ~ 8 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 10)

前記第 1 のエピタキシャル層は、半導体素子に加工される、項目 3 ~ 9 のいずれか一項に記載の方法。

(項目 11)

項目 3 ~ 9 のいずれか一項に記載の方法によって形成された前記第 1 のエピタキシャル層を備えている半導体素子。

【図面の簡単な説明】

【0006】

(図面の簡単な説明)

当業者は、図面が主に例証の目的のためであり本明細書中で説明される本発明の主題の範囲を限定することを意図されていないことを理解するであろう。図面は、必ずしも縮尺通りではなく、いくつかの例では、本明細書中で開示される本発明の主題の種々の側面が、異なる特徴の理解を促進するために、図面において強調され、または拡大されて示され得る。図面において、同様の参照番号は、概して、同様の特徴（例えば、機能的に同様な要素および/または構造的に同様な要素）を指す。

【0007】

【図 1】図 1 A - 図 1 D は、いくつかの実施形態による層転写技術を用いて半導体素子を加工する方法を例証している。

【0008】

【図 2】図 2 A - 図 2 C は、いくつかの実施形態による、図 1 A - 図 1 D に例証される方法によって加工された加工プラットフォームを用いて半導体素子を加工する方法を例証している。

【0009】

【図 3 - 1】図 3 A - 図 3 F は、いくつかの実施形態による疑似グラフェンベースの層転

10

20

30

40

50

写の方法を例証している。

【図3-2】図3A-図3Fは、いくつかの実施形態による疑似グラフェンベースの層転写の方法を例証している。

【0010】

【図4】図4は、特定の発明の方法によって加工された半導体材料の写真である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

(詳細な説明)

非シリコン基板の高いコストに対処する1つの方法は、「層転写」技術であり、機能素子層が、格子整合基板上で成長させられ、それから、除去されて他の基板に転写される。そして、残りの格子整合基板は、別の素子層を加工するために再使用され、それによって、コストを低減させ得る。製造コストを有意に低減させるために、層転写方法は、以下の特性を有することが所望され得る：1) 基板の再使用能力；2) 層剥離後の最小限の基板復旧ステップ；3) 高速剥離速度；および、4) 剥離厚さの精密な制御。

10

【0012】

格子整合基板から素子層を除去し転写する従来的方法は、化学リフトオフ(エピタキシャルリフトオフまたはELOとも称される)、光学リフトオフ(レーザーリフトオフまたはLLOとも称される)、機械的リフトオフ(制御されたスポーリングとも称される)を含む。不都合なことに、これらの方法のいずれも、上で留意される4つの所望の特性の全てを有していない。

20

【0013】

化学リフトオフ技術は、III-V族半導体で作製された素子層をGaAsウエハからリフトオフするために用いられ得る。たいてい、AlAsの犠牲層が、素子層と基板との間にエピタキシャルに挿入される。化学リフトオフ技術は、湿式化学溶液中で犠牲層を選択的にエッチングし、素子層を剥離させる。

【0014】

過去30年にわたるその継続的開発にもかかわらず、化学リフトオフは、依然としていくつかの欠点を有する。例えば、犠牲層を通じた化学エッチング液の低速浸透に起因して、剥離速度は低速である(例えば、典型的に、単一の8インチのウエハを剥離させるために数日)。第二に、エッチング残留物は、剥離後、表面汚染物になる傾向がある。第三に、化学リフトオフは、粗くされた基板表面をエピタキシャルの準備の整った表面に回復させるために剥離後に実施される化学機械的平坦化(CMP)に起因して、限定された再使用能力を有する。第四に、剥離させられたエピ層を化学溶液中で取り扱うことは困難であり得る。

30

【0015】

光学リフトオフ技術は、たいてい、ハイパワーレーザーを用いて格子整合基板(例えば、透明なサファイア基板またはSiC基板)の背面を照射し、選択的に素子-基板界面を加熱し、界面の分解および素子層(例えば、III-N膜)の剥離を引き起こす。この技術は、剥離させられたIII-Nを高熱伝導性を有する基板に転写することによって、III-Nベースの発光ダイオード(LED)を製造するコストを低減させ、素子からの蓄熱の問題に対処し得る。

40

【0016】

しかしながら、光学リフトオフは、それ自体の限定を有する。第一に、熔融させられたIII-N/基板界面は基板を粗くするので、再調整ステップは、たいてい、再使用の前に実行され、それによって、再使用能力を5回未満に低減させる。第二に、ハイパワー熱照射によって引き起こされる界面での局所的加圧は、亀裂または転位を誘発し得る。第三に、レーザー走査速度は、高いスループットを可能にするために低速過ぎることもある。

【0017】

制御されたスポーリングは、光学リフトオフより高いスループットを有し得る。この技術では、高応力膜(「ストレッサ」とも称される)が、エピタキシャル膜上に堆積させら

50

れ、破壊をエピ層の下に誘発し、基板からの活性材料の分離をもたらす。十分な引張応力が界面に与えられると、 $K_{II}$  剪断モードが、亀裂を開始させ得、 $K_I$  開放モードが、エピ層と基板との間の界面に平行な亀裂の伝播を可能にし得る。内部応力およびストレッサの厚さを制御することによって、臨界  $K_I$  値に到達するために十分なひずみエネルギーが提供され、膜 / 基板界面の破壊につながり得る。亀裂伝播により離脱が発生するので、スポーリングプロセスは、薄膜の高速剥離を引き起こし得る。

#### 【 0 0 1 8 】

しかしながら、制御されたスポーリングは、少なくとも以下の理由で、商業的製造のために用いられるために十分に成熟していない。第一に、亀裂伝播は、概して、表面に垂直に必ずしも整列させられているとは限らない劈開面を通じて発生するので、表面は、再使用のために研磨する必要があり得る。第二に、厚いストレッサが、特に  $III-N$  半導体のような高ヤング率材料を用いて作業するとき、強固な共有結合を分離させるために十分なエネルギーを提供するためにたいがい用いられる。第三に、ストレッサの内部応力は、狭い範囲内においてのみ制御され得、それは、結果的なスポーリングされる膜の達成可能な厚さを制約する。例えば、典型的な  $Ni$  ストレッサ内の最大内部応力が約  $1\text{ GPa}$  であるので、 $GaAs$  薄膜のスポーリングを開始させるための  $1\text{ GPa}$  の引張応力の下での臨界  $Ni$  厚さは、約  $1.5\ \mu\text{m}$  であり、それは、 $GaAs$  が約  $10\ \mu\text{m}$  の厚さである場合、 $GaAs$  膜自体のスポーリングを誘発し得る。したがって、 $Ni$  ストレッサを用いるとき、 $GaAs$  膜を  $10\ \mu\text{m}$  未満の厚さすることは困難であり得るが、典型的にほとんどの素子は、遥かに薄い膜を用いる。

#### 【 0 0 1 9 】

特定の実施形態による本明細書中で説明されるシステムおよび方法は、素子を加工するために疑似グラフェンベースの層転写手法を採用する。この手法は、上述の層転写方法における短所のうちの1つ以上に対処し得る。特定の実施形態では、機能素子は、カーボンバッファ層（疑似グラフェン層とも称される）上で加工され得、続いて、 $SiC$  基板上に形成される。そして、加工された機能素子は、例えば機能素子に取り付けられたストレッサによって格子整合基板から除去され得る。

#### 【 0 0 2 0 】

特定の実施形態では、カーボンバッファ層は、素子層を成長させるための再使用可能な普遍的プラットフォームとして機能し、グラフェン表面における高速、精密かつ繰り返し可能な剥離を可能にする剥離層も提供する。従来的方法と比較して、本明細書中で説明される手法は、1つ以上の利点を提供し得る。第一に、カーボンバッファ層と素子層との間の弱い相互作用は、エピタキシャル成長のための不格子整合則を実質的に緩和し、低欠陥密度でのほとんどの半導体膜の成長を潜在的に可能にし得る。第二に、カーボンバッファ層上でのエピ層（例えば、機能素子）成長は、カーボンバッファ層とエピ層との間の弱いファンデルワールス相互作用に起因して、基板から容易にかつ精密に剥離させられ得、それは、剥離させられた表面の剥離後の再調整を伴わないエピ層の高速機械的剥離を可能にする。第三に、カーボンバッファ層は、たいがい、機械的に強固であり、したがって、複数の成長 / 解放サイクルのために大いに再使用可能であり得る。

#### 【 0 0 2 1 】

図 1 A - 図 1 D は、いくつかの実施形態による疑似グラフェン層転写によって半導体素子を加工する方法 100 を例証している。図 1 A は、第 1 の表面 115 を有する第 1 の基板 110（例えば、 $SiC$  基板）を示しており、第 1 の表面 115 は、研磨されていないこともある。いくつかの実施形態では、第 1 の表面 115 は、約  $100\ \text{nm}$  にほぼ等しいかまたはそれより大きい（例えば、約  $100\ \text{nm}$ 、約  $200\ \text{nm}$ 、約  $500\ \text{nm}$ 、またはそれより大きく、これらの間の任意の値およびサブレンジを含む）表面粗さによって特徴付けられ得る。

#### 【 0 0 2 2 】

図 1 B は、第 1 の基板 110 の第 1 の表面 115 が平坦化されることを示している。例えば、化学機械的平坦化（CMP）プロセスおよび / または高温水素エッチングが、第 1

10

20

30

40

50

の基板の表面粗さを減少させるために採用され得る。図 1 C において、最上部のシリコン層が昇華させられ、カーボンバッファ層 1 2 0 が第 1 の基板 1 1 0 上に形成され、カーボンバッファ層 1 2 0 上にグラフェン層 1 3 0 を形成する（層形成ステップとも称される）。特定の実施形態では、グラフェン層 1 3 0 は、ファンデルワールス力によってカーボンバッファ層 1 2 0 と相互作用し得る。いくつかの実施形態では、カーボンバッファ層 1 2 0 は、グラフェン層 1 3 0 の成長の初期段階中に形成され得る。カーボンバッファ層 1 2 0 は、例えば、カーボンクラスタおよび/またはカーボンネットワークを含み得る。特定の実施形態では、カーボンバッファ層 1 2 0 は、結晶構造を備えている。特定の実施形態では、結晶構造は、グラフェンと同一または同様であり得る。いくつかの実施形態では、カーボンバッファ層は、下の基板に共有結合させられている。例えば、いくつかの実施形態では、カーボンバッファ層 1 2 0 は、基板 1 1 0 の第 1 の基板 1 1 5 に共有結合させられ得る。

10

**【 0 0 2 3 】**

図 1 D において、グラフェン層 1 3 0 が、カーボンバッファ層 1 2 0 から除去され、したがって、第 1 の基板 1 1 0 とカーボンバッファ層 1 2 0 とを含むプラットフォーム 1 4 0 を形成する。プラットフォーム 1 4 0 は、種々のタイプの半導体素子を加工するために使用され、再使用され得る（図 2 A - 図 2 C および関連する以下の説明においてより詳細に示されている）。グラフェン層 1 3 0 と比較して、カーボンバッファ層 1 2 0 は、下の基板 1 1 0 とのより強固な結合を有し、それによって、次の処理におけるより安定した素子加工を可能にする。

20

**【 0 0 2 4 】**

図 1 C に例証されている層形成ステップは、種々の方法によって実行され得る。いくつかの実施形態では、グラフェン層 1 3 0 は、単結晶配向を有するエピタキシャルグラフェンを含み得、基板 1 1 0 は、シリコン表面を有する（0 0 0 1）4 H - S i C ウエハを含み得る。グラフェン層 1 3 0 の加工は、複数ステップの焼きなましステップを含み得る。第 1 の焼きなましステップが、表面エッチングのために H<sub>2</sub> ガス中で実施され得、第 2 の焼きなましステップが、高温（例えば、約 1 5 7 5 以上等、少なくとも約 1 0 0 0 ）でのグラフェン化のために A r 中で実施され得る。

**【 0 0 2 5 】**

いくつかの実施形態では、カーボンバッファ層 1 2 0 およびグラフェン層 1 3 0 は、化学気相蒸着（CVD）プロセスによって第 1 の基板 1 1 0 上で成長させられ得る。基板 1 1 0 は、ニッケル基板または銅基板を含み得る。あるいは、基板 1 1 0 は、S i O<sub>2</sub>、H f O<sub>2</sub>、A l<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、S i<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、および特に高温 CVD に適合する任意の他の平坦材料の絶縁基板を含み得る。いくつかの実施形態では、カーボンバッファ層 1 2 0 およびグラフェン層 1 3 0 は、分子ビームエピタキシャル（MBE）技術によって第 1 の基板 1 1 0 上で成長させられ得る。

30

**【 0 0 2 6 】**

カーボンバッファ層 1 2 0 および第 1 の基板 1 1 0 からグラフェン層 1 3 0 を除去するために、種々の方法も用いられ得る。例えば、キャリア膜が、グラフェン層 1 3 0 に付着させられ得る。キャリア膜は、ポリ（メチルメタクリレート）（PMMA）の薄膜または熱剥離テープを含み得、付着は、スピンコーティングプロセスによって達成され得る。

40

**【 0 0 2 7 】**

図 2 A - 図 2 C は、いくつかの実施形態による図 1 A - 図 1 D に例証されている方法によって加工された加工プラットフォームを用いてエピ層（例えば、半導体素子の一部を形成するために用いられ得る）を加工する方法 2 0 0 を例証している。図 2 A は、第 1 の基板 2 1 0 と、第 1 の基板 2 1 0 上に堆積させられたカーボンバッファ層 2 2 0 とを含む加工プラットフォーム 2 4 0 の概略図を示している。加工プラットフォームは、図 1 D に示され上で説明される加工プラットフォーム 1 4 0 と同一であるか、または実質的に同様であり得る。図 2 B では、エピ層 2 5 0 は、（例えば、エピタキシャル成長または任意の他の適切な方法によって）カーボンバッファ層 2 2 0 上に形成される。以下で説明されるよ

50

うに、いくつかの実施形態では、エピ層 250 は、カーボンバッファ層 220 にエピタキシャルに整合させられ得る。いくつかの実施形態では、エピ層 250 は、基板 210 にもエピタキシャルに整合させられ得る。

【0028】

図 2C において、エピ層 250 が、カーボンバッファ層 220 から除去される。例えば、エピ層 250 は、今後の処理のために別の基板に転写させられ得る。エピ層 250 を除去した後、加工プラットフォーム 240 は、別のラウンドの加工（例えば、カーボンバッファ層 220 上に第 2 のエピ層を形成すること）のために採用され得る。

【0029】

エピ層 250 は、とりわけ、III-V 族半導体、Si、Ge、III-N 半導体、SiC、SiGe、または II-VI 族半導体を含み得る。一例では、第 1 の基板 210 の格子は、エピ層 250 の格子に整合させられ、この場合、カーボンバッファ層 220 が多孔性または十分薄い場合、第 1 の基板 210 がエピ層 250 の成長のための種晶として機能する。例えば、いくつかの場合、カーボンバッファ層 220 は、孔を備え、エピ層 250 が形成される材料は、孔を通して下の第 1 の基板 210 に接触し得、第 1 の基板がエピ層 250 の成長の種晶となることを可能にする。別の例では、第 1 の基板 210 がエピ層 250 の種晶となることは、エピ層 250 と第 1 の基板 210 との間の直接的接触が存在しないときであっても発生し得る。例えば、特定の実施形態によると、第 1 の基板 210 は、（例えばファンデルワールス力および/または他の原子力もしくは分子力によって作り出される）ポテンシャル場を有し得、カーボンバッファ層 220 は薄いので、第 1 の基板 210 のポテンシャル場は、カーボンバッファ層 220 を超えてエピ層 250 が形成される領域に達し、それと相互作用し得る。その結果、いくつかの実施形態では、第 1 の基板 210 からのポテンシャル場は、エピ層 250 の成長に影響を及ぼす。

【0030】

第 1 の基板 210 とエピ層 250 との間にカーボンバッファ層 220 を挟み込むことは、エピ層 250 の迅速かつ損傷のない剥離および転写を促進し得る。

【0031】

別の例では、カーボンバッファ層 220 は、エピ層 250 を成長させるための種晶として機能するために十分厚い（例えば、いくつかの層の厚さ）こともあり、その場合、エピ層 250 は、カーボンバッファ層 220 に格子整合させられ得る。この例は、第 1 の基板 210 の繰り返しの使用も可能にする。さらに別の例では、第 1 の基板 210 は、カーボンバッファ層 220 と一緒になって、エピ層 250 を成長させるための種晶として機能し得る。

【0032】

一例では、エピ層 250 は、2D 材料系を含む。別の例では、エピ層 250 は、3D 材料系を含む。2D 材料系および 3D 材料系を加工するための柔軟性は、業界で知られている幅広い光学素子、光電子素子、光子素子の加工を可能にする。

【0033】

エピ層 250 の加工は、業界で知られている各種の半導体加工技術のいずれかを用いて実行され得る。例えば、低圧有機金属化学気相成長法（MOCVD）は、カーボンバッファ層 220 上でエピ層 250（例えば、GaN 膜）を成長させるために用いられ得、それは、続いて、第 1 の基板 210（例えば、SiC 基板）上に堆積させられる。この例では、カーボンバッファ層 220 および第 1 の基板 210 は、表面をきれいにするために（例えば、1100 より高い温度で 15 分より長い時間の間 H<sub>2</sub> 下で）焼かれ得る。そして、GaN を含むエピ層 250 の堆積は、例えば 200 mbar で実施され得る。トリメチルガリウム、アンモニア、および水素が、それぞれ、Ga 源、窒素源、およびキャリアガスとして用いられ得る。カーボンバッファ層 220 上の平坦な GaN エピタキシャル膜を得るために、修正された 2 ステップ成長が展開され得る。第 1 のステップは、数分間 1100 の成長温度で実行され得、段丘縁におけるガイドされた核形成が促進され得る。第 2 の成長ステップは、1250 の上昇させられた温度で実行され、横方向の成長を促進

10

20

30

40

50

し得る。この場合の鉛直のGaN成長速度は、約20nm毎分であり得る。

【0034】

図3A - 図3Fは、いくつかの実施形態による層転写の方法300を例証している。図3Aは、単結晶ウエハであり得るドナーウエハ310上にカーボンバッファ層320が形成されることを示している。例えば、カーボンバッファ層320は、例えば図1A - 図1Dに関して上で説明される方法のいずれかを用いてドナーウエハ310上で直接成長させられ得る。図3Bは、エピ層330がカーボンバッファ層320上でエピタキシャル成長させられることを示している。エピ層330は、電子層、光子層、または任意の他の機能素子層を含み得る。エピ層330を加工するための方法は、図2A - 図2Cに関して上で説明される任意の方法および技術を含み得る。

10

【0035】

図3Cは、ストレッサ340がエピ層330上に配置されることを示している。例えば、ストレッサ340は、Ni膜等の高圧金属膜を含み得る。この例では、Niストレッサは、 $1 \times 10^{-5}$  Torrの真空レベルでエバポレータ内で堆積させられ得る。

【0036】

図3Dは、ストレッサ340を取り扱うためにテープ層350がストレッサ340上に配置されることを示している。テープ層350およびストレッサ340を用いることは、エピ層330とカーボンバッファ層320との間の界面に高いひずみエネルギーを与えることによって、高速な剥離速度でカーボンバッファ層320からエピ層330を機械的に剥離させ得る。剥離速度は、カーボンバッファ層320とエピ層330等の他の材料との間の弱いファンデルワールス結合に少なくとも起因して、高速であり得る。

20

【0037】

図3Eにおいて、剥離させられたエピ層330は、ストレッサ340およびテープ層350と一緒にホストウエハ360上に配置される。図3Fにおいて、テープ350およびストレッサ340が除去され、より洗練された素子を形成すること、またはエピ層330上に追加の材料を堆積させること等のさらなる処理のために、エピ層330を残している。一例では、テープ層350およびストレッサ340は、FeCl<sub>3</sub>ベースの溶液によってエッチング除去され得る。

【0038】

方法300では、図3Dに示されるエピ層330の剥離後、残りのドナーウエハ310およびカーボンバッファ層320は、エピ層加工の次のサイクルのために再使用され得る。あるいは、カーボンバッファ層320も剥離させられ得る。この場合、エピ層加工の次のサイクルの前に、新たなカーボンバッファ層が、ドナーウエハ310上に堆積させられ、および/または形成され得る。いずれにせよ、カーボンバッファ層320は、損傷からドナーウエハ310を保護し、それによって、複数の使用を可能にし、コストを低減させる。より詳細は、2018年3月7日に出版され米国特許出願公報第2018/0197736号として2018年7月12日に公開され、「SYSTEMS AND METHODS FOR GRAPHENE BASED LAYER TRANSFER」と題された米国特許出願第15/914,295号に見出され得、この出願は、その全体が参照によって本明細書中に援用される。

30

40

【0039】

図4は、カーボンバッファ層上でエピタキシャル成長させられ、その後、可撓性機械的ハンドラを用いた剥離によってカーボンバッファ層の表面から除去されたGaN薄膜の写真である。簡潔に言うと、4インチ径(0001)4H-SiCウエハが、シリコン面上での成長に関し、基板として用いられた。まず1575のH<sub>2</sub>ガス内で焼きなまし、続いて1575のAr内でのグラフェン化ステップによって、SiCウエハの頂面が昇華させられ、カーボンバッファ層およびグラフェン層が成長させられた。そして、SiC基板上にカーボンバッファ層を残して、(カーボンバッファ層および基板上に位置していた)グラフェン層が機械的剥離層を用いて除去された。続いて、GaN薄膜が、MOCVDを用いてカーボンバッファ層上で成長させられた。2ステップの成長プロセス(1100

50

で数分間実施される第1のステップおよび1250 で実施される第2のステップ)において、トリメチルガリウム、アンモニア、および水素が用いられた。続いて、Ga<sub>2</sub>N薄膜が、可撓性機械的ハンドラを用いてカーボンバッファ層から離脱させられた。図4において、Ga<sub>2</sub>N薄膜は、カーボンバッファ層および基板からGa<sub>2</sub>Nを離脱させるために用いられた可撓性機械的ハンドラに貼り付いた自立Ga<sub>2</sub>N薄膜として示されている。

【0040】

2018年10月16日に出願され「Epitaxial Growth Template Using Carbon Buffer on Sublimated SiC Substrate」と題された米国仮特許出願第62/746,072号は、全ての目的のためにその全体が参照によって本明細書中に援用される。

10

【0041】

種々の発明の実施形態が本明細書中で説明され、例証されたが、当業者は、機能を実施するために、および/または、本明細書中で説明される結果および/または1つ以上の利点得るために、各種の他の手段および/または構造を容易に構想し、そのような変化物および/または変形物の各々は、本明細書中で説明される発明の実施形態の範囲内であるように見なされる。概して、当業者は、本明細書中で説明される全てのパラメータ、寸法、材料および構成が例を意味していること、および、実際のパラメータ、寸法、材料、および/または構成は本発明の教示が用いられる特定の用途(単数または複数)に依存することを容易に認識するだろう。当業者は、ルーティンに過ぎない実験法を用いて、本明細書中で説明される特定の発明の実施形態との多くの同等物を認識し、または確かめることが可能であるだろう。したがって、前述の実施形態が単に例として提示されること、および、発明の実施形態が添付の請求項およびその同等物の範囲内において具体的に説明され請求されるものとは別に実用化され得ることが理解されるべきである。本開示の発明の実施形態は、本明細書中で説明される各々の個々の特徴、システム、物品、材料、キット、および/または方法に関する。加えて、そのような特徴、システム、物品、材料、キット、および/または方法が互いに矛盾しない場合、2つ以上のそのような特徴、システム、物品、材料、キットおよび方法の任意の組み合わせが、本開示の発明の範囲内に含まれる。

20

【0042】

上で説明される実施形態は、数多くの方法のうちのいずれかで実装され得る。例えば、本明細書中で開示されるテクノロジーを設計し作製する実施形態は、ハードウェア、ソフトウェアまたはそれらの組み合わせを用いて実装され得る。ソフトウェアで実装されるとき、ソフトウェアコードが、単一のコンピュータにおいて提供されるかまたは複数のコンピュータ間で分散せられるかにかかわらず、任意の適切なプロセッサまたはプロセッサの集合物において実行され得る。

30

【0043】

さらに、コンピュータがラックマウント型コンピュータ、デスクトップコンピュータ、ラップトップコンピュータ、またはタブレットコンピュータ等、数多くの形式のうちのいずれかで具現化され得ることが認識されるべきである。加えて、コンピュータは、パーソナルデジタルアシスタント(PDA)、スマートフォン、または任意の適切なポータブル電子デバイスもしくは固定電子デバイスを含む、一般的にコンピュータとみなされないが適切な処理能力を有するデバイスで具現化され得る。

40

【0044】

同様に、コンピュータは、1つ以上の入力デバイスおよび出力デバイスを有し得る。これらのデバイスは、とりわけ、ユーザインタフェースを提示するために用いられ得る。ユーザインタフェースを提供するために用いられ得る出力デバイスの例は、出力の視覚的提示のためのプリンタまたはディスプレイスクリーン、および出力の聴覚的提示のためのスピーカまたは音響生成デバイスを含む。ユーザインタフェースのために用いられ得る入力デバイスの例は、キーボード、ならびに、マウス、タッチパッド、およびデジタイジングタブレット等のポインティングデバイスを含む。別の例として、コンピュータは、音声認

50

識を通じて、または別の音響フォーマットで入力情報を受信し得る。

【0045】

そのようなコンピュータは、エンタープライズネットワーク、インテリジェントネットワーク（IN）、またはインターネット等、ローカルエリアネットワークまたはワイドエリアネットワークを含む任意の適切な形式で1つ以上のネットワークによって相互接続され得る。そのようなネットワークは、任意の適切なテクノロジーに基づき得、任意の適切なプロトコルによって動作し得、無線ネットワーク、有線ネットワークまたは光ファイバネットワークを含み得る。

【0046】

本明細書中で概説される種々の方法またはプロセスは、各種のオペレーティングシステムまたはプラットフォームのうちのいずれかが一つを展開する1以上のプロセッサにおいて実行可能であるソフトウェアとしてコーディングされ得る。加えて、そのようなソフトウェアは、数多くの適切なプログラミング言語、および/またはプログラミングツールもしくはスクリプティングツールのいずれかをを用いて記述され得、同様に、実行可能な機械言語コード、またはフレームワークもしくは仮想マシンにおいて実行される中間コードとしてコンパイルされ得る。

【0047】

この点において、種々の発明の概念は、コンピュータ読み取り可能ストレージ媒体（または複数のコンピュータ読み取り可能ストレージ媒体）（例えば、コンピュータメモリ、1つ以上のフロッピーディスク、コンパクトディスク、光ディスク、磁気テープ、フラッシュメモリ、フィールドプログラマブルゲートアレイまたは他の半導体素子内の回路構成、または、他の非一過性媒体もしくは有形のコンピュータストレージ媒体）として具現化され得、コンピュータ読み取り可能ストレージ媒体は、1つ以上のプログラムでエンコードされ、1つ以上のプログラムは、1つ以上のコンピュータまたは他のプロセッサにおいて実行されたとき、上で議論される本発明の種々の実施形態を実装する方法を実施する。コンピュータ読み取り可能媒体（単数または複数）は、可搬であり得、それによって、そこに記憶されたプログラム（単数または複数）が、1つ以上の異なるコンピュータまたは他のプロセッサ上にロードされ、上で議論される本発明の種々の側面を実装し得る。

【0048】

「プログラム」または「ソフトウェア」という語は、本明細書において、上で議論されるような実施形態の種々の側面を実装するためにコンピュータまたは他のプロセッサをプログラムするために展開され得る任意のタイプのコンピュータコードまたはコンピュータ実行可能命令のセットを指す本来の意味で用いられる。加えて、一側面によると、実行されたときに本発明の方法を実施する1つ以上のコンピュータプログラムは、単一のコンピュータまたはプロセッサに常駐している必要はないが、本発明の種々の側面を実装するために数多くの異なるコンピュータまたはプロセッサの間にモジュール式手法で分散させられ得ることが認識されるべきである。

【0049】

コンピュータ実行可能命令は、プログラムモジュール等、多くの形式であり得、1つ以上のコンピュータまたは他のデバイスによって実行され得る。概して、プログラムモジュールは、特定のタスクを実施しまたは特定の抽象的データタイプを実装するルーチン、プログラム、オブジェクト、コンポーネント、データ構造等を含む。典型的に、プログラムモジュールの機能は、種々の実施形態において所望されるように組み合わせられ、または分散させられ得る。

【0050】

同様に、データ構造は、任意の適切な形式でコンピュータ読み取り可能媒体に記憶され得る。例証の簡潔さのために、データ構造は、データ構造内の場所を通じて関連付けられるフィールドを有するように示され得る。そのような関係は、フィールド間の関係を伝えるコンピュータ読み取り可能媒体内の場所を有するフィールドのためにストレージを割り当てることによって同様に達成され得る。しかしながら、例えばポインタ、タグまたはデ

10

20

30

40

50

一要素間の関係を確立する他の機構の使用を通じてデータ構造のフィールドにおける情報間の関係を確立するために、任意の適切な機構が用いられ得る。

【0051】

同様に、種々の発明の概念は、例が提供された1つ以上の方法として具現化され得る。本方法の一部として実施される行為は、任意の適切な態様で順序付けされ得る。よって、実施形態は、例証されるものと異なる順序で行為が実施されるように構築され得、それは、例証的实施形態において連続する行為として示されている場合であっても、いくつかの行為を同時に実施することを含み得る。

【0052】

本明細書中で定義され使用される全ての定義は、辞書的定義、参照によって援用される文書中の定義、および/または定義された語の通常の意味より優先されることを理解されるべきである。

10

【0053】

不定冠詞「a」および「an」は、本明細書中および請求項中で用いられる場合、そうでないことを明確に示されない限り、「少なくとも1つ」を意味するように理解されるべきである。

【0054】

「および/または」という節は、本明細書中および請求項中で用いられる場合、そのように結合された要素の「一方または両方」、すなわちいくつかの場合結合的に存在し、他の場合離散的に存在する要素を意味することを理解されるべきである。「および/または」でリストアップされる複数の要素は、同一の方式で、すなわちそのように結合された要素のうちの「1つ以上」として解釈されるべきである。「および/または」でリストアップされる複数の要素は、同一の方式で、すなわちそのように結合された要素のうちの「1つ以上」として解釈されるべきである。具体的に示されるそれらの要素に関連しているかまたは関連していないかに関わらず、「および/または」という節によって具体的に示される要素以外に、随意に他の要素が存在し得る。したがって、非限定的例示として、「備える」等の非限定的な言葉と併せて用いられるとき、「Aおよび/またはB」の言及は、例えば、1つの実施形態では、Aのみ（随意にB以外の要素を含む）を指し、別の実施形態では、Bのみ（随意にA以外の要素を含む）を指し、さらに別の実施形態では、AおよびBの両方（随意に他の要素を含む）を指し得る。

20

30

【0055】

本明細書および請求項において用いられる場合、「または」は、上で定義される「および/または」と同一の意味を有することを理解されるべきである。例えば、リスト内の項目を分離するとき、「または」または「および/または」は、包括的であり、すなわち、少なくとも1つの包含であるが、いくつかの要素または要素のリストのうちの1つ以上も含み、随意に、追加的にリストアップされていない項目も含むように解されるべきである。「のうちの1つのみ」もしくは「のうちの厳密に1つ」または、請求項において用いられるときの「から成る」等、そうでないことが明確に示される語のみが、数多くの要素または要素リストのうちの厳密に1つの要素の包含を指す。概して、本明細書中で用いられる「または」という語は、「いずれか」、「のうちの1つ」、「のうちの1つのみ」、または「のうちの厳密に1つ」等の排他的な語が先行するとき、排他的な代替物を指す（すなわち、「一方または他方であるが、両方ではない」）を示すように解釈されるべきである。請求項中で用いられるとき、「を主体とする」は、特許法の分野で用いられるその通常の意味を有する。

40

【0056】

本明細書中および請求項中で用いられる場合、1つ以上の要素のリストに関する「少なくとも1つ」という節は、要素のリスト内の要素の任意の1つ以上から選択される少なくとも1つの要素を意味するように理解されるべきであるが、必ずしも要素のリスト内に特にリストアップされた各要素およびあらゆる要素のうちの少なくとも1つを含むわけではなく、要素のリスト内の要素の任意の組み合わせを除外しない。この定義は、具体的に示

50

された要素に関連するかまたは関連しないかに関わらず、「少なくとも1つ」という節が指す要素のリスト内に具体的に示された要素以外の要素が随意に存在し得ることも可能にする。したがって、非限定的な例として、「AおよびBのうちの少なくとも1つ」（または、同様に、「AまたはBのうちの少なくとも1つ」、または、同様に、「Aおよび/またはBのうちの少なくとも1つ」）は、例えば、1つの実施形態では、少なくとも1つのA、随意に1つより多いAを含み、Bは存在しない（および随意に、B以外の要素を含む）ことを指し、別の実施形態では、少なくとも1つのB、随意に1つより多いBを含み、Aは存在しない（および随意に、A以外の要素を含む）ことを指し、さらに別の実施形態では、少なくとも1つのA、随意に1つより多いAを含み、少なくとも1つのB、随意に1つより多いBを含む（および随意に、他の要素を含む）ことを指し得る。

10

**【0057】**

請求項のみならず、上の明細書においても、「備える（comprising）」、「含む（including）」、「担持する（carrying）」、「有する（having）」、「含む（containing）」、「伴う（involving）」、「保持する（holding）」、「から構成されている（composed of）」等の全ての移行句は、非限定的であり、すなわち、含むが限定しないことを意味するように理解されるべきである。米国特許商標庁の米国特許審査手続便覧の第2111.03節に記載されているように、「から成る（consisting of）」および「を主体とする（consisting essentially of）」という移行句のみが、それぞれ限定的または半限定的な移行句である。

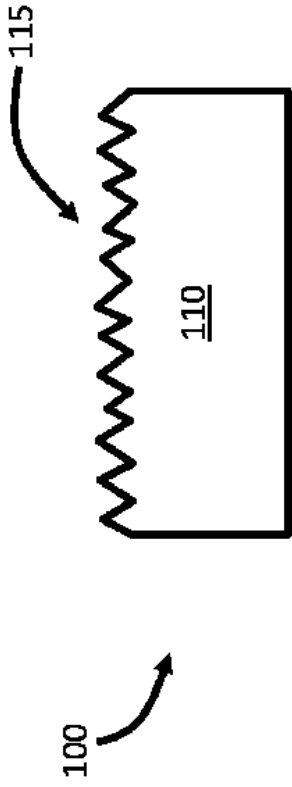
20

30

40

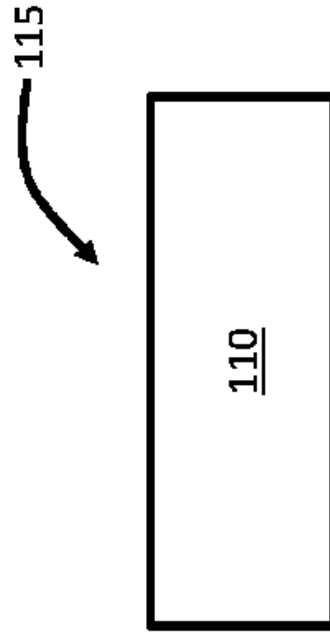
50

【図面】  
【図 1 A】



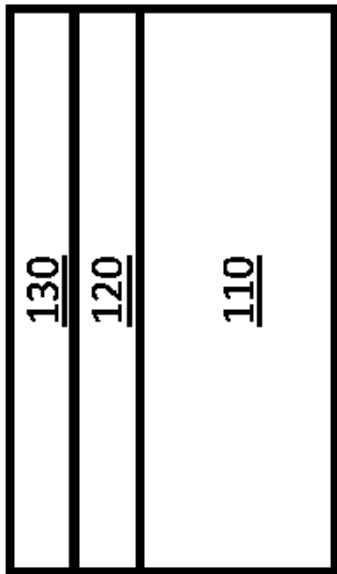
**FIG. 1A**

【図 1 B】



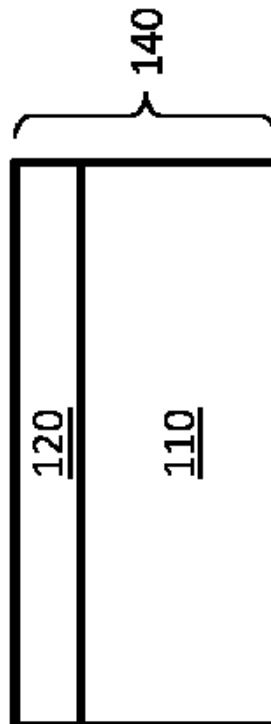
**FIG. 1B**

【図 1 C】



**FIG. 1C**

【図 1 D】



**FIG. 1D**

10

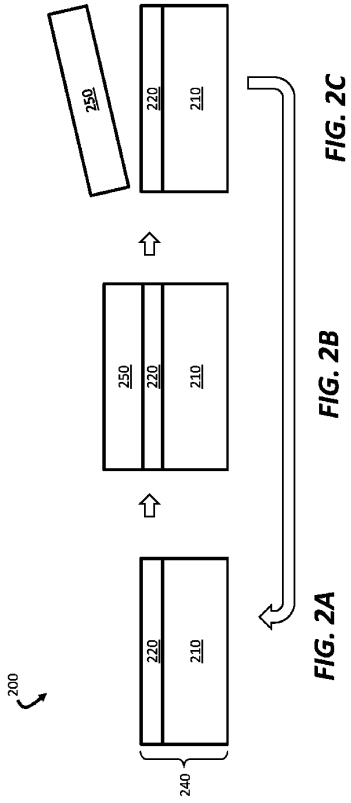
20

30

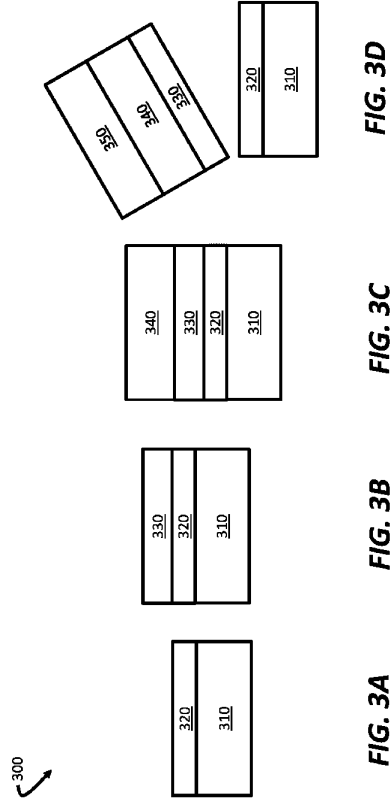
40

50

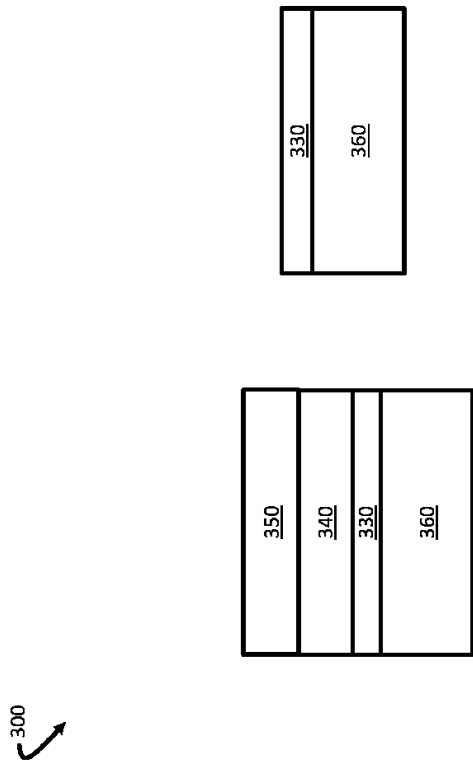
【 2 A - 2 C 】



【 3 A - 3 D 】



【 3 E - 3 F 】



【 4 】



10

20

30

40

50

---

フロントページの続き

(51)国際特許分類 F I  
C 2 3 C 16/34 (2006.01) C 2 3 C 16/26  
C 2 3 C 16/34

アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 1 3 9 , ケンブリッジ , ヴァサー ストリート 3 2 ,  
3 8 - 2 9 4

審査官 船越 亮

(56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 3 4 2 1 2 7 ( U S , A 1 )  
国際公開第 2 0 1 7 / 0 4 4 5 7 7 ( W O , A 1 )  
特表 2 0 1 8 - 5 3 5 5 3 6 ( J P , A )

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
H 0 1 L 2 1 / 2 0  
H 0 1 L 2 1 / 2 0 5  
H 0 1 L 2 1 / 0 2  
C 2 3 C 1 6 / 0 2  
C 2 3 C 1 6 / 2 6  
C 2 3 C 1 6 / 3 4