(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)公表番号
特表2022-523266
(P2022-523266A)
(43)公表日　令和4年4月21日(2022.4.21)

(51)国際特許分類		FI			テーマコード（参考）
H01L 27/11502(2017.01)		H01L	27/11502		5E001
H01G 4/12 (2006.01)		H01G	4/12	180	5F083
		H01G	4/12	090	
		H01G	4/12	450	

審査請求　未請求　予備審査請求　未請求　（全53頁）

(21)出願番号　特願2021-560540(P2021-560540)
(86)(22)出願日　令和2年4月7日(2020.4.7)
(85)翻訳文提出日　令和3年12月6日(2021.12.6)
(86)国際出願番号　PCT/US2020/027108
(87)国際公開番号　WO2020/210261
(87)国際公開日　令和2年10月15日(2020.10.15)
(31)優先権主張番号　62/831,044
(32)優先日　平成31年4月8日(2019.4.8)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(81)指定国・地域　AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,
最終頁に続く

(71)出願人　521442615
ケプラー コンピューティング インコーポレイテッド
アメリカ合衆国 ９４１０５ カリフォルニア州 サンフランシスコ ナンバー１９２５２４ ステュアート ストリート １８０
(74)代理人　240000327
弁護士　弁護士法人クレオ国際法律特許事務所
(72)発明者　ラマムールティ ラメシュ
アメリカ合衆国 ９４１０５ カリフォルニア州 サンフランシスコ ナンバー１９２５２４ ステュアート ストリート １８０
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　ドープされた極性層及びそれを組み込んだ半導体デバイス

(57)【要約】
開示した技術は、強誘電体材料及び半導体デバイスに関し、より具体的には、ドープされた極性材料を組み込んだ半導体メモリデバイスに関する。半導体デバイスはキャパシタを含み、キャパシタはドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層を有する。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含む。ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、ドーパントでドープされていないベース極性材料を含むキャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する。キャパシタは、極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極をさらに含む。極性層が、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する。第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極が、その上に極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、極性層の少なくとも一部が、第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物

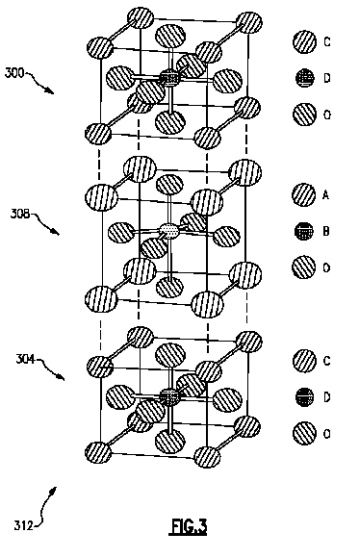


FIG.3

【特許請求の範囲】
【請求項１】
キャパシタを含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタは、
ドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する、極性層と、
前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極であって、前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極と、
を含み、
前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極が、その上に前記極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、前記極性層の少なくとも一部が、前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極上にシュードモルフィックに形成される、ことを特徴とする半導体デバイス。
【請求項２】
前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、ことを特徴とする請求項１に記載の半導体デバイス。
【請求項３】
前記強誘電性スイッチング電圧が約１２００ｍＶより低い、ことを特徴とする請求項２に記載半導体デバイス。
【請求項４】
前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、約０．５ｎｍ～５０ｎｍの厚さを有する、ことを特徴とする請求項１に記載の半導体デバイス。
【請求項５】
前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、０．０１オーム－ｃｍ未満の電気抵抗率を有する、ことを特徴とする請求項２に記載半導体デバイス。
【請求項６】
前記極性層と、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方とが、同じ結晶構造を有する、ことを特徴とする請求項１に記載の半導体デバイス。
【請求項７】
前記ドーパントがランタニド元素又はニオブを含む、ことを特徴とする請求項６に記載半導体デバイス。
【請求項８】
前記極性層は、約１０ｎｍ～５００ｎｍの横方向寸法を有する領域を含み、当該領域において、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方はシュードモルフィックである、ことを特徴とする請求項７に記載半導体デバイス。
【請求項９】
前記同じ結晶構造が、ペロブスカイト構造であり、
前記極性層が、$BaTiO_3$、$PbTiO_3$、$KNbO_3$、$NaTaO_3$、$BiFeO_3$
$PbZrTiO_3$、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）O_3、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）O_3－$PbTiO_3$、
$PbLaZrTiO_3$、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）O_3、$BaTiO_3$－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））O_3、$BaTiO_3$－$BaSrTiO_3$、$LiNbO_3$、$LiTaO_3$、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯ、$Bi_{1-x}La_x$

ＦｅＯ３、Ｂｉ１－ｘＣｅｘＦｅＯ３及びＢｉＦｅ１－ｙＣｏｙＯ３からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、ことを特徴とする請求項６に記載半導体デバイス。
【請求項１０】
前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ２Ｃｕ３Ｏ７、Ｂｉ２Ｓｒ２ＣａＣｕ２Ｏ８、ＬａＮｉＯ３、ＳｒＲｕＯ３、ＬａＭｎＯ３、ＳｒＭｎＯ３、ＬａＣｏＯ３又はＳｒＣｏＯ３からなる群から選択される酸化物を含む、ことを特徴とする請求項９に記載半導体デバイス。
【請求項１１】
前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方に直接接触し、
前記半導体デバイスが、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の上に形成された付加的な電極を更に含み、当該付加的な電極は、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物又はレニウム（Ｒｅ）酸化物からなる群から選択される導電性二元金属酸化物を含む、ことを特徴とする請求項１０に記載半導体デバイス。
【請求項１２】
前記同じ結晶構造が、六方晶結晶構造であり、前記極性層が、ＬｕＦｅＯ３を含むか、又はＲＭｎＯ３で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、ことを特徴とする請求項６に記載半導体デバイス。
【請求項１３】
前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、六方晶構造、デラフォサイト構造、スピネル構造又は立方晶構造のうちの１つを有する、ことを特徴とする請求項１に記載の半導体デバイス。
【請求項１４】
前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、ＰｔＣｏＯ２、ＰｄＣｏＯ２、ＡｌドープＺｎＯ、Ｆｅ３Ｏ４、ＬｉＶ２Ｏ４、又はＳｎドープＩｎ２Ｏ３のうちの１又は複数を含む、ことを特徴とする請求項１３に記載半導体デバイス。
【請求項１５】
トランジスタを更に含み、
前記キャパシタが、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、ことを特徴とする請求項１に記載の半導体デバイス。
【請求項１６】
キャパシタ積層体を含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタ積層体は、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有し、
前記ベース極性材料は、ペロブスカイト構造又は六方晶結晶構造のうちの１つを有する金属酸化物を含み、
前記ドーパントは、前記金属酸化物の金属とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属を含み、
前記キャパシタ積層体は、前記結晶性極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を含み、
前記結晶性極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方と同じ結晶構造を有する、ことを特徴とする半導体デバイス。
【請求項１７】
前記結晶性極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する、ことを特徴とする請求項１６に記載半導体デバイス。
【請求項１８】
前記同じ結晶構造が、ペロブスカイト結晶構造であり、前記極性層が、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’

ｘＢ（ｎ－ｙ）Ｂ’ｙＯｚで表される化学式を有する強誘電体酸化物を含み、
Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方が、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方が、ゼロより大きい、ことを特徴とする請求項１７に記載半導体デバイス。

【請求項１９】

前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極の一方又は両方が、Ｃ（ｐ－ｕ）Ｃ’ｕＤ（ｑ－ｖ）Ｄ’ｖＯｗで表される化学式を有する酸化物を含み、
Ｃ及びＣ’が、前記ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、Ｄ及びＤ’が、前記ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、ｐ、ｑ、及びｗが、整数であり、ｕ及びｖの一方又は両方が、ゼロより大きい、ことを特徴とする請求項１８に記載半導体デバイス。

【請求項２０】

前記極性層が、ＢａＴｉＯ３、ＰｂＴｉＯ３、ＫＮｂＯ３、ＮａＴａＯ３、ＢｉＦｅＯ３ＰｂＺｒＴｉＯ３、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３－ＰｂＴｉＯ３、ＰｂＬａＺｒＴｉＯ３、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－ＢａＳｒＴｉＯ３、ＬｉＮｂＯ３、ＬｉＴａＯ３、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯ、Ｂｉ１－ｘＬａｘＦｅＯ３、Ｂｉ１－ｘＣｅｘＦｅＯ３及びＢｉＦｅ１－ｙＣｏｙＯ３からなる群から選択されるペロブスカイト構造を有する強誘電体酸化物を含む、ことを特徴とする請求項１９に記載半導体デバイス。

【請求項２１】

前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ２Ｃｕ３Ｏ７、Ｂｉ２Ｓｒ２ＣａＣｕ２Ｏ８、ＬａＮｉＯ３、ＳｒＲｕＯ３、ＬａＭｎＯ３、ＳｒＭｎＯ３、ＬａＣｏＯ３又はＳｒＣｏＯ３からなる群から選択される酸化物を含む、ことを特徴とする請求項２０に記載半導体デバイス。

【請求項２２】

前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方に直接接触し、
前記半導体デバイスが、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の上に形成された付加的な電極を更に含み、当該付加的な電極は、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物又はレニウム（Ｒｅ）酸化物からなる群から選択される導電性二元金属酸化物を含む、ことを特徴とする請求項２１に記載半導体デバイス。

【請求項２３】

前記同じ結晶構造が、六方晶結晶構造であり、
前記極性層が、ＬｕＦｅＯ３を含むか、又はＲＭｎＯ３で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、ことを特徴とする請求項１７に記載半導体デバイス。

【請求項２４】

トランジスタを更に含み、
前記キャパシタが、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、ことを特徴とする請求項１７に記載半導体デバイス。

【請求項２５】

前記極性層は、前記半導体デバイスが不揮発性メモリデバイスであるように、少なくとも１日間持続する前記残留分極を有する、ことを特徴とする請求項２４に記載半導体デバイス。

【請求項２６】

キャパシタを含む半導体デバイスであって、

前記キャパシタは、
ドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する、極性層と、
前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極と、
を含み、
前記極性層は、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有し、
前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極が、その上に前記極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、前記極性層の少なくとも一部が、前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極上にコヒーレントに歪んでいる、ことを特徴とする半導体デバイス。
【請求項２７】
前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、
前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体材料の前記残留分極が減少する、ことを特徴とする請求項２６に記載半導体デバイス。
【請求項２８】
前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、ことを特徴とする請求項２６に記載の半導体デバイス。
【請求項２９】
前記強誘電性スイッチング電圧が約６００ｍＶより低い、ことを特徴とする請求項２８に記載の半導体デバイス。
【請求項３０】
前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）CoO_3、$SrRuO_3$、（Ｌａ，Ｓｒ）MnO_3、$YBa_2Cu_3O_7$、$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$、$LaNiO_3$、$SrRuO_3$、$LaMnO_3$、$SrMnO_3$、$LaCoO_3$又は$SrCoO_3$からなる群から選択される酸化物を含む、ことを特徴とする請求項２６に記載の半導体デバイス。
【請求項３１】
前記ドーパントが、前記ベース極性材料の金属元素と交換可能な原子格子位置を占有し、
前記極性層では、前記ドーパントが、前記ベース極性材料の前記金属の酸化状態と異なる酸化状態を有する、ことを特徴とする請求項１に記載の半導体デバイス。
【請求項３２】
前記ドーパントが、前記ベース極性材料の金属元素と交換可能な原子格子位置を占有し、
前記極性層では、前記ドーパントが、前記ベース極性材料の前記金属の酸化状態と異なる酸化状態を有する、ことを特徴とする請求項１６に記載の半導体デバイス。
【請求項３３】
前記ドーパントが、前記ベース極性材料の金属元素と交換可能な原子格子位置を占有し、
前記極性層では、前記ドーパントが、前記ベース極性材料の前記金属の酸化状態と異なる酸化状態を有する、ことを特徴とする請求項２６に記載の半導体デバイス。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
（関連出願の相互参照）
本出願は、２０１９年４月８日に出願された米国仮特許出願第６２／８３１，０４４号の優先権の利益を主張するものであり、参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。
【０００２】

本発明は、概して、強誘電体材料及びこれを組み込んだ半導体デバイスに関し、より具体的には、強誘電体キャパシタを組み込んだ半導体メモリデバイスに関する。

【背景技術】

【０００３】

メモリデバイスは、揮発性又は不揮発性であり得る。概して、揮発性メモリデバイスには特定の利点があり、不揮発性メモリデバイスには他の特定の利点がある。例えば、フローティングゲートベースのメモリデバイス（例えば、フラッシュメモリデバイス）などの一部の不揮発性メモリデバイスは、有利には電力なしでデータを保持することができるが、かかるデバイスは、比較的遅いアクセス時間及び限られたサイクル耐久性を有する場合がある。逆に、ダイナミックランダムアクセスメモリ（ＤＲＡＭ）などの一部の揮発性メモリデバイスは、アクセス時間が比較的長く、サイクル耐久性が高いという利点を有し得るが、かかるデバイスでは、電源を切るとデータが失われる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００４】

一部のＤＲＡＭ技術では、メモリセルは、デバイスアーキテクチャ内に配置され、当該デバイスアーキテクチャには、アクセストランジスタのドレインに接続されたセルキャパシタが含まれている。これらの技術では、メモリ状態はセルキャパシタに保存されている。例えば、セルキャパシタに蓄積された電荷は論理状態「１」を表し得るが、キャパシタに蓄積された電荷がない場合は論理状態「０」を表し得る。書き込みは、アクセストランジスタをアクティブにし、セルキャパシタの電荷を排出して「０」を書き込むか、セルキャパシタを充電して「１」を書き込むことによって実行することができる。読み出しは、同様の方法で、センス増幅器を使用してセルキャパシタの充電状態を感知し、メモリ状態を判定することによって達成され得る。充電のパルスが増幅器によって検出された場合、セルは電荷を保持しているので「１」を読み出すが、かかるパルスがない場合は、「０」を示す。ＤＲＡＭでは、キャパシタが「１」の状態で充電された場合、状態を復元するために再充電する必要があるため、読み出しプロセスは破壊的なものとなる。更に、テクノロジーノードの進歩に伴ってデバイスのフットプリントが縮小していく中で、キャパシタの誘電体のリーク電流を減らしながら誘電率を高める必要性が高まっている。更に、電力が供給されている場合でも、キャパシタは時間が経つとリークにより電荷を失うため、ＤＲＡＭセルは定期的にアクティブにリフレッシュされてメモリ状態が復元される。従来の揮発性及び不揮発性メモリ技術に勝る利点を提供するメモリデバイスが必要とされている。

【課題を解決するための手段】

【０００５】

第１の態様では、半導体デバイスは、ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層を有するキャパシタを含み、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、ドーパントでドープされていないベース極性材料を含むキャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極を含む。キャパシタ積層体は、極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極のそれぞれの上に第１及び第２の障壁金属層を更に含む。

【０００６】

第２の態様では、半導体デバイスは、ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層を有するキャパシタ積層体を含み、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、ドーパントは、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース性極性材料の残留分極と異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極を更に含む。半導体デバイスは、極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化

物電極のそれぞれの上に第１及び第２の障壁金属層を更に含む。
【０００７】
第３の態様では、半導体デバイスは、ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層を有するキャパシタを含み、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極を含む。キャパシタ積層体は、極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極のそれぞれの上に第１及び第２の障壁金属層を更に含む。
【０００８】
第４の態様では、キャパシタは、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有する。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含む。ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、これにより、キャパシタの強誘電性スイッチング電圧は、ドーパントでドープされていないベース極性材料を含むキャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている。
【０００９】
第５の態様では、キャパシタは、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有する。ベース極性材料は、化学式ＡＢＯ$_3$を有するベース金属酸化物を含み、Ａ及びＢの各々は、ベース極性材料の結晶構造の交換可能な原子位置を占有する１又は複数の金属元素を表す。ドーパントは、ベース極性材料の１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含む。キャパシタは更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極を含む。結晶性極性層は、ペロブスカイト構造、六方晶結晶構造、又は超格子構造のうちの１つを有する。
【００１０】
第６の態様では、キャパシタは、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有する。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含む。ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、ドーパントは、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。
【００１１】
第７の態様では、半導体デバイスは、キャパシタを含み、キャパシタは、次に、ドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層を有する。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、ドーパントでドープされていないベース極性材料を含むキャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を含み、極性層は、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する。第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極は、その上に極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、極性層の少なくとも一部は、第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極上にシュードモルフィックに（ｐｓｅｕｄｏｍｏｒｐｈｉｃａｌｌｙ）形成される。
【００１２】
第８の態様では、半導体デバイスは、キャパシタを含み、キャパシタは、次に、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有する。ベース極性材料は、ペロブスカイト構造又は六方晶結晶構造のうちの１つを有する金属酸化物を含む。ドーパントは、金属（複数可）とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系、又は５ｆ系のうちの１

つの金属を含む。キャパシタ積層体は、結晶性極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を更に含み、結晶性極性層は、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方と同じ結晶構造を有する。

【００１３】

第９の態様では、半導体デバイスは、キャパシタを含み、キャパシタは、次に、ドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層を有し、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極を含み、極性層は、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する。第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極は、その上に極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、極性層の少なくとも一部は、第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極上にシュードモルフィックに形成される。

【００１４】

第１０の態様では、半導体デバイスは、シリコン基板上に形成されたトランジスタと、導電性ビアによってトランジスタに電気的に接続されたキャパシタと、を含む。キャパシタは、極性層の両側に上部及び下部導電性酸化物電極を含み、下部導電性酸化物電極は、トランジスタのドレインに電気的に接続されている。キャパシタは更に、ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層を有し、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、ドーパントでドープされていないベース極性材料を含むキャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する。半導体デバイスは更に、下部導電性酸化物電極と導電性ビアとの間に耐熱金属又は金属間化合物を含む下部障壁層を有する。

【００１５】

第１１の態様では、半導体デバイスは、シリコン基板上に形成されたトランジスタと、導電性ビアによってトランジスタに電気的に接続されたキャパシタと、を含む。キャパシタは、極性層の両側に上部及び下部導電性酸化物電極を含み、下部導電性酸化物電極は、トランジスタのドレインに電気的に接続されている。キャパシタは更に、ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層を有し、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、金属酸化物の金属（複数可）とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース性極性材料の残留分極と異なるような濃度で存在する。半導体デバイスは更に、極性層、上部導電性酸化物電極層、及び下部導電性酸化物電極層のうちの１又は複数の一方又は両方の側面に形成された障壁シーラント層を有する。

【００１６】

第１２の態様では、半導体デバイスは、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有するキャパシタを含み、強誘電体酸化物層は、ドーパントがドープされたベース強誘電体酸化物を含み、ドーパントは、ドープされていないベース強誘電体酸化物と比較して、ベース強誘電体酸化物の残留分極を少なくとも５％低下させる。

【００１７】

第１３の態様では、半導体デバイスは、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有し、強誘電体酸化物層は、第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する。

【００１８】

第１４の態様では、半導体デバイスは、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有するキャパシタを含み、強誘電体酸化物層は、キャパシタの両

端で約６００ｍＶより低い電圧で強誘電体転移を受ける。
【００１９】
第１５の態様では、半導体デバイスは、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有するキャパシタを含み、強誘電体酸化物層は、約５０ｎｍ未満の厚さを有する。
【００２０】
第１６の態様では、半導体デバイスは、約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有する強誘電体酸化物層を有し、強誘電体酸化物層は、強誘電体酸化物層の金属の原子サイトの総数に基づいて、約５．０％超の濃度のランタニド元素でドープされている。
【図面の簡単な説明】
【００２１】
【図１Ａ】種々の実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された極性層を有するキャパシタの側面図を概略的に示す。
【図１Ｂ】強誘電体層を有する強誘電体キャパシタの分極場（Ｐ－Ｅ）ループを概略的に示しており、非スイッチング及びスイッチングに関連する分極変化を示す。
【図１Ｃ】非スイッチング及びスイッチングに関連する強誘電体キャパシタの時間的電流応答を概略的に示す。
【図２Ａ】一部の実施形態による、キャパシタの極性層のペロブスカイト結晶構造を概略的に示す。
【図２Ｂ】一部の実施形態による、極性層のスイッチングに関連する六方晶結晶構造及び原子変位を概略的に示す。
【図２Ｃ】一部の実施形態による、極性層のスイッチングに関連する超格子結晶構造及び原子変位を概略的に示す。
【図３】種々の実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極層と、これらの間に挿入され、整合する結晶構造を有する極性層とを含むキャパシタの層の結晶構造を概略的に示す。
【図４Ａ】強誘電体材料の分極状態間の強誘電体転移に対応するヒステリシス、自由エネルギー曲線の関連する二重井戸、及び関連する原子変位を伴う分極場（Ｐ－Ｅ）ループを概略的に示す。
【図４Ｂ】ペロブスカイト結晶構造を有する強誘電体材料における強誘電体転移に対応する自由エネルギー曲線の二重井戸及び関連する原子変位を示す自由エネルギー曲線を概略的に示す。
【図４Ｃ】実施形態による、ベース強誘電体材料に種々の量のドーパントをドープし、それによって自由エネルギー曲線の二重井戸を調整することによって形成された強誘電体層の自由エネルギー曲線の計算を示すグラフである。
【図５】実施形態による、強誘電体メモリデバイスにおけるスイッチング及び不揮発性ストレージのエネルギーに関する考察を概略的に示す。
【図６】実施形態による、化学式ＡＢＯ$_3$を有するベース極性材料のコーナー位置を占有する金属Ａの原子を置換し得るドーパントＡ’でドープされた極性層の概略ペロブスカイト結晶構造を示す。
【図７】実施形態による、化学式ＡＢＯ$_3$を有するベース極性材料の中心位置を占有する金属Ｂの原子を置換し得るドーパントＢ’でドープされた極性層の概略ペロブスカイト結晶構造を示す。
【図８Ａ】実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された極性層を有するキャパシタの側面図を示す。
【図８Ｂ】実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極層間に挿入された極性層と第１及び第２の障壁層とを含むキャパシタの側面図を示す。
【図８Ｃ】実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された極性層、第１及び第２の障壁層、並びにキャパシタの垂直側壁上に形成されたシーラント障壁層を有するキャパシタの側面図を示す。

【図９】実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極の間に挿入された極性層を有するキャパシタに結合されたトランジスタを含むメモリデバイスの断面図を示す。
【図１０】実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極の間に挿入された極性層を有するキャパシタに結合されたｆｉｎＦＥＴトランジスタを含むメモリデバイスの斜視図を示す。
【発明を実施するための形態】
【００２２】
半導体メモリは、高性能、高信頼性、及び／又はポータブルコンピューティングデバイスを含む種々の用途で、高性能化及び低価格化の要求が高まっている。ストレージの用途では、消費電力、サイズ、衝撃／振動耐性などの観点から、ハードディスクドライブに代わって、固体メモリデバイスが種々の用途に使用されている。
【００２３】
メモリの低消費電力化、アクセス速度の高速化、メモリの大容量化を伴うメモリの需要の要求を反映して、埋め込みメモリの需要が増加している。埋め込みメモリは、マイクロプロセッサなどの他のユニットとオンチップで集積化されている。一部の埋め込みメモリは、メモリがオンチップバスを介して論理回路及びアナログ構成要素に直接集積化されているため、より高度な並列処理が可能となり、低消費電力かつ高性能なデバイスとして期待されている。更に、一部の埋め込みメモリの利点として、高集積化によるチップ数の削減、パッケージコストの削減、チップあたりのピン数の削減などが挙げられる。
【００２４】
埋め込み不揮発性メモリを含む不揮発性メモリでは、望ましい特性として、低消費電力、高速な書き込み／読み出し時間、ほぼ無限の書き込み／読み出しサイクル、Ｓｉ製造プロセスとの互換性、不揮発性、及びメモリセルを論理回路に追加するための低付加プロセスコストが挙げられる。
【００２５】
不揮発性は、待機メモリ電力を削減するのに特に役立つ。一部のアプリケーション、例えば高密度のスタンドアロンメモリ用途では、コストを削減するためにセルサイズを小さくすることが望ましい。他のアプリケーション、例えば埋め込みメモリでは、高密度のメモリセルを実現するよりも、望ましい電気的特性を達成することが重要な場合がある。
【００２６】
フラッシュメモリ又は電気的に消去可能なプログラマブル読み出し専用メモリ（ＥＥＰＲＯＭ）などの従来の不揮発性メモリは、これらの要求を部分的にしか満たしていない。これらは不揮発性であるが、書き込み／消去サイクルは一般的に約１００万サイクルに制限されている。更に、その書き込み／消去時間、電圧、エネルギー、及び電力消費量は、スタティックランダムアクセスメモリ（ＳＲＡＭ）及びダイナミックランダムアクセスメモリ（ＤＲＡＭ）などのランダムアクセスメモリを大幅に上回っている。
【００２７】
一部の埋め込みメモリは、ＳＲＡＭに基づいている。ＳＲＡＭは、追加のプロセスコストが比較的小さい一方で、セルサイズが比較的大きい揮発性メモリであり、比較的高い待機電力を消費する。他の一部の埋め込みメモリは、ＤＲＡＭに基づいている。ＤＲＡＭはＳＲＡＭよりも小さいセルサイズを提供するが、追加のプロセスコストが高く、また、比較的高い待機電力を消費する。
【００２８】
揮発性及び不揮発性メモリ技術の両方の有利な特徴は、強誘電体層を有するキャパシタを半導体メモリデバイス、例えば、強誘電体ランダムアクセスメモリ（ＦｅＲＡＭ）に使用することで実現することができる。図１Ａは、種々の実施形態による、第１及び第２の導電性酸化物電極層１０８、１１２の間に挿入された、記憶層１０４、例えば、強誘電体層を有するキャパシタ１００の側面図を概略的に示す。線形分極場（Ｐ－Ｅ）応答を有する誘電体を使用し得るＤＲＡＭセルキャパシタとは異なり、キャパシタ１００は、非線形Ｐ－Ｅ応答を含む強誘電体層を有する。本明細書に記載されるように、強誘電現象とは、結

晶が自発的な電気分極を示し、その分極の方向が外部電界の下で結晶学的に定義された状態間で再配向され得る現象を指す。強誘電体材料全体に外部電界が印加されると、原子又は分子の位置の小さなシフトによって生成された双極子は、結晶構造内の電荷の分布のシフトにより、電界方向に整列する傾向がある。電荷が除去された後、双極子は分極状態を保持し、これにより、残留（ｒｅｍｎａｎｔ）（残留と称することもある）分極を示す。

【００２９】

図１Ｂは、記憶層１０４、例えば、強誘電体層を有する図１Ａに関して示したキャパシタ１００などのキャパシタの分極場（Ｐ－Ｅ）ループ１２０を概略的に示している。Ｐ－Ｅループ１２０は、ポリドメイン強誘電体材料を含む強誘電体層のループを表し得る。図示のＰ－Ｅループ１２０では、初めて分極する前に、ゼロ電界での正味の分極がほぼゼロであるような強誘電性ドメインの統計的分布が最初に存在し得る。初期分極（Ｐ）は、Ｐ－Ｅ曲線部分１２２によって表され得る。強誘電体層が正の電界を印加することによって初めて分極されるとき、分極は、分極Ｐ＝０から始まり、＋Ｐｍａｘで飽和に達するまで、電界の増加とともに増加する。＋Ｐｍａｘで飽和に達した後、Ｐ－Ｅ曲線部分１２４に従って電界が減少すると、Ｅ＝０で分極が残り得る。この残りの分極は、本明細書では残留分極（＋Ｐｒ）と称される。分極をゼロに戻すために、負の電界を印加することができる。分極をゼロに戻すのに十分な電界は、本明細書では抗電界（Ｅｃ）と称される。Ｐ－Ｅ曲線部分１２４から、負の抗電界（－Ｅｃ）を印加して、分極を＋Ｐｒからゼロに減少させることができる。負の電圧又は電界の大きさが更に増加すると、ヒステリシスループは正の場合と同様に、逆の意味の挙動を示す。つまり、負のＰは、負の電界の増加とともに大きさが増加し、－Ｐｍａｘで飽和に達する。続いて、電界がその後、Ｐ－Ｅ曲線部分１２６に沿って大きさが減少すると、Ｅ＝０で、残留分極－Ｐｒが残り得る。このように、強誘電体層は、残留分極＋／－Ｐｒの特性を示す。これは、逆方向の印加電界によって反転され得、強誘電体キャパシタにヒステリシスＰ－Ｅループを生じさせる。

【００３０】

薄膜技術を使用することにより、動作電界又は動作電圧を標準のチップ供給電圧より低いレベルに下げることができる。ＦｅＲＡＭは、Ｐ－Ｅ特性を使用してデータを不揮発性状態に保持し、データを高速かつ頻繁に書き換えることができる。従って、ＦｅＲＡＭには、揮発性メモリ技術及び不揮発性メモリ技術の両方の利点がある。

【００３１】

引き続き図１Ｂを参照すると、種々のＦｅＲＡＭデバイスにおいて、電圧パルスがデジタル情報を読み書きするために使用されている。残留分極と同じ方向に電界パルスを印加すると、スイッチングが発生しない場合がある。強誘電体材料の誘電応答により、ＰｍａｘとＰｒとの間の分極ΔＰＮＳの変化が存在し得る。一方、残留分極とは逆方向に電界パルスを印加すると、スイッチングが発生し得る。例えば、初期分極が印加電界と反対方向である場合、強誘電体層の分極が反転し、スイッチング分極変化ΔＰｓが増加する。

【００３２】

図１Ｃは、図１Ａの記憶層１０４として強誘電体層を有するキャパシタ１００などの強誘電体キャパシタの、非スイッチング及びスイッチングにそれぞれ関連する時間電流応答曲線１４４及び１４０を概略的に示している。図１Ｂに関して上述した異なる残留分極の状態（＋Ｐｒ及び－Ｐｒ）は、印加電圧パルスに対する強誘電体キャパシタの異なる過渡電流挙動を引き起こし得る。瞬時電流、積分電流、電流の変化率などの電流－時間応答の違いに基づいて、残留分極＋Ｐ及び－Ｐに対応する状態間のスイッチングに関連する種々のパラメータを決定することができる。例えば、スイッチ電荷ΔＱＳ及び非スイッチ電荷ΔＱＮＳは、それぞれ、電流応答曲線１４０及び１４４を積分することによって決定することができる。電荷の差ΔＱ＝ＡΔＰ（Ａはキャパシタの面積）により、２つの論理状態を区別できる。

【００３３】

残留分極（Ｐｒ及び－Ｐｒ）を有する状態を使用して、ＦｅＲＡＭを、ＤＲＡＭよりも優れた不揮発性メモリとして実装できる。保存された情報が不揮発性であることにより、例

えば、リフレッシュを削減又は排除することによって、エネルギー消費を削減することができる。ＦｅＲＡＭは、フラッシュメモリなどの一部の不揮発性メモリ技術よりも優れている。例えば、ＦｅＲＡＭは、フラッシュメモリと比較して数桁高いサイクル耐久性を提供できる。ＦｅＲＡＭは、フラッシュメモリと比較して数桁速い書き込み時間（数ナノ秒～数十ナノ秒）も提供できる。ＦｅＲＡＭは、フラッシュメモリの数分の１の書き込み電圧及び読み出し電圧も提供できる。

【００３４】

強誘電体層の残留分極はスイッチング電荷に比例するため、不揮発性メモリとしての信頼性を高めるには、残留分極を適切に高くする必要がある。例えば、サブ１００ｎｍノードの場合、ΔＱ＝ＡΔＰ（Ａはキャパシタの面積、ΔＰはスイッチング分極）として表され得る強誘電体キャパシタのスイッチング電荷が約３０ｆＣ、２５ｆＣ、２０ｆＣ、１５ｆＣ、１０ｆＣ、５ｆＣの閾値、又はこれらの値のいずれかの間の範囲の値を下回ると、読み出しエラーが発生する可能性がある。種々の実施形態によるサブ１００ｎｍノードの不揮発性メモリデバイスの場合、スイッチング電荷に対応するスイッチング分極ΔＰは、約２０～６０μＣ／ｃｍ^2、６０～１００μＣ／ｃｍ^2、５０～１４０μＣ／ｃｍ^2、１４０～１８０μＣ／ｃｍ^2、１８０～２２０μＣ／ｃｍ^2、２２０～２６０μＣ／ｃｍ^2、又はこれらの値のいずれかの間の範囲の値であり得る。これは、残留分極Ｐｒ＞１０μＣ／ｃｍ^2、例えば、１０～３０μＣ／ｃｍ^2、３０～５０μＣ／ｃｍ^2、５０～７０μＣ／ｃｍ^2、７０～９０μＣ／ｃｍ^2、９０～１１０μＣ／ｃｍ^2、１１０～１３０μＣ／ｃｍ^2、又はこれらの値のいずれかの間の範囲の値に対応する。

【００３５】

実施形態による低電力不揮発性メモリデバイスの場合、強誘電体キャパシタの低電力及び／又はエネルギースイッチングには、低抗電圧が有利である。例えば、種々の低電力システム、例えば、埋め込みメモリとしてその中にＦｅＲＡＭを組み込んだシステムの場合、抗電圧（Ｅ$_C$）は、約１２００ｍＶ、１１００ｍＶ、１０００ｍＶ、９００ｍＶ、８００ｍＶ、７００ｍＶ、６００ｍＶ、５００ｍＶ、４００ｍＶ、３００ｍＶ、２００ｍＶ、又はこれらの値のいずれかの間の範囲の値であり得る。

【００３６】

これらの利点にもかかわらず、高度なテクノロジーノード（サブ１００ｎｍノードなど）のセルサイズが小さい場合は、超低電圧動作（例えば、約１２００ｍＶ未満）で比較的高い残留分極（十分なＯＮ／ＯＦＦ比、読み出しウィンドウ、不揮発性のためには、例えば１０μＣ／ｃｍ^2）及び比較的低い抗電圧（例えば、約１２００ｍＶ未満）を達成し、一部のアプリケーションで不揮発性（例えば、室温で１０年後の十分な読み出しウィンドウ）を実現することは、困難であった。例えば、一部の材料では、膜厚をある程度薄くすることで抗電圧を下げることができるが、膜厚をある一定以下にすると、多くの強誘電体材料では抗電界が大きくなり、抗電圧を下げることができなくなる。従って、個々のケースごとに、厚さのスケーリングが十分でない場合がある。これら及び他のニーズに対処するために、開示された技術ではメモリ用途のための強誘電体キャパシタが開示されており、これは、比較的高い残留分極（例えば、＞１０μＣ／ｃｍ^2）を同時に示しながら、超低電圧（例えば、＜１２００ｍＶ）でスイッチングすることができる。

【００３７】

本発明者らは、不揮発性メモリ用途、例えば、ＦｅＲＡＭのためのこれら及び他の望ましい性能パラメータを達成するために、種々のキャパシタ要素の組み合わせを組み合わせて設計する必要があることを発見した。特に、図１Ａを参照すると、キャパシタ１００は、上部又は第１の導電性酸化物電極層１０８と下部又は第２の導電性酸化物電極層１１２との間に挿入された記憶層１０４を含んでいる。種々の実施形態によれば、記憶層１０４は、設計された極性層を有する。極性層は、ベース極性材料を提供し、ベース極性材料にドーパントをドープすることによって設計されている。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含む。一部の実施形態では、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、キャパシタの強誘電性スイッチング

電圧が、ドーパントでドープされていないベース極性材料を含むキャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する。一部の他の実施形態では、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース性極性材料の残留分極と異なるような濃度で存在する。一部の実施形態では、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。キャパシタ１００積層体は、第１及び第２の導電性酸化物電極層１０８、１１２を更に含み、これらは、例えば、結晶構造、組成、厚さ、及び付加的な電極厚さを伴う積層に関して、記憶層１０４と併せて設計されている。一部の実施形態では、キャパシタ１００は、極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極のそれぞれの上に第１及び第２の障壁金属層を更に含む。

【００３８】

ベース極性材料は、本明細書に記載されるように、誘電体材料、常誘電体材料、又は強誘電体材料であり得る。

【００３９】

本明細書で説明するように、誘電体とは、電気を伝導する自由電子を有しないか、又はほとんど有しないため、実質的に電気を伝導しない電気絶縁体を指す。誘電体は、電界を印加することによって分極され得る。誘電体は、極性誘電体と非極性誘電体とに分類できる。

【００４０】

本明細書に記載されるように、極性絶縁体又は極性材料とは、永久的な電気双極子モーメントを有する単位格子又は分子単位を有する電気絶縁材料を指す。これらの材料では、外部電界がない場合、極性分子単位はランダムに配向する。その結果、外部電界がない場合、正味の双極子モーメントは実質的に存在しない。外部電界が印加されると、双極子は、正味の双極子モーメントが生成されるように、外部電界と整列することができる。

【００４１】

本明細書に記載されるように、非極性絶縁体又は非極性材料とは、永久的な電気双極子モーメントを有さない単位格子又は分子単位を有する電気絶縁材料を指す。これらの材料では、外部電界がない場合、正電荷の中心は単位格子内の負電荷の中心と整合するため、分子は実質的に正味の双極子モーメントを有さない。電界が印加されると、正電荷は電界方向の力を受け、負電荷は電界と反対の方向の力を受けるため、単位格子には内部に双極子が含まれることになる。これは、誘導双極子と称される。

【００４２】

本明細書に記載されるように、誘電分極を受ける材料、つまり誘電材料とは、分極されると、その誘導分極が、印加された外部電界に実質的に線形に比例して変化する絶縁材料を指す。すなわち、図１Ｂに関して上記で説明されたＰ－Ｅ曲線とは異なり、誘電体材料は、実質的に線形のＰ－Ｅ応答を示す。従って、分極曲線の傾きに対応する誘電率は、外部電界の関数として一定であり得る。

【００４３】

本明細書に記載されるように、常誘電分極を受ける材料、つまり常誘電材料とは、分極されると、誘導分極がＥに対して実質的に非線形に変化する絶縁材料を指す。すなわち、当該材料は、実質的に非線形のＰ－Ｅ曲線を示す。従って、分極曲線の傾きに対応する誘電率は、常誘電体材料の場合のように一定ではなく、外部電界の関数として変化する。しかしながら、図１Ｂに関して上記で説明されたＰ－Ｅ曲線とは異なり、常誘電体材料は、ヒステリシスを示さない。

【００４４】

本明細書に記載されるように、強誘電分極を受ける材料、つまり強誘電体とは、分極されると、誘導分極がＥに対して実質的に非線形に変化する絶縁材料を指す。図１Ｂに関して上記で説明したように常誘電体材料のように非線形Ｐ－Ｅ曲線を示すことに加えて、強誘

電分極を受ける材料、つまり強誘電材料とは、Ｅがゼロの場合でも残留非ゼロ分極を示す絶縁材料を指す。従って、当該材料は、図１Ｇに関して上記で説明したように、ヒステリシスを有する実質的に非線形のＰ－Ｅ曲線を示す。強誘電体材料の顕著な特徴として、反対方向に適切に強く印加されたＥによる残留分極の極性の反転が挙げられる。従って、分極は、現在の電界だけでなくその履歴にも依存するため、図１Ｂに関して上で論じたように、ヒステリシスループを示す。

【００４５】

一部の強誘電体材料は、キュリー温度（ＴＣ）と称される特定の相転移温度未満で実質的な強誘電性を示し、この温度を超えると常誘電性を示す。ＴＣより高い場合、残留分極が消失し、強誘電体材料が常誘電体材料に変化する。多くの強誘電体は、常誘電相が中心対称の結晶構造を有するため、Ｔｃを超えると圧電特性を完全に失う。従って、本明細書に記載されるように、別段記載されない限り、残留分極を有すると記載される材料、例えば、強誘電体材料は、ＴＣ未満の材料を指す。

【００４６】

半導体デバイスのためのドープ極性層

キャパシタの上記の性能パラメータを達成するために、種々の実施形態によれば、半導体デバイス、例えば、メモリデバイスは、キャパシタ、例えば、図１Ａに示されるように配置されたキャパシタ１００を含む。キャパシタは、記憶層１０４を含み、記憶層１０４は、次に、ドーパントでドープされた、例えば、置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有する。一部の実施形態では、ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含む。ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含む。ドーパントは、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。一部の他の実施形態では、ベース極性材料は、化学式ＡＢＯ$_3$を有するベース金属酸化物を含み、Ａ及びＢの各々は、ベース極性材料の結晶構造の交換可能な原子位置を占有する１又は複数の金属元素を表す。ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含む。キャパシタは更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極を含む。結晶性極性層は、ペロブスカイト構造、六方晶結晶構造、又は超格子構造のうちの１つを有する。キャパシタ積層体は、例えば、結晶構造及び／又は組成に関して、記憶層１０４と併せて設計された第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極１０８、１１２を更に含む。

【００４７】

種々の実施形態によれば、ベース極性材料は、ベース強誘電体材料、ベース常誘電体材料、誘電体材料、又はこれらの組み合わせを含む。本明細書に開示される実施形態によるベース極性材料のドーピングは、ベース極性材料の強誘電特性を変化させる。

【００４８】

一部の実施形態では、ベース極性材料がベース強誘電体材料を含む場合、ドーパントの濃度を増加させることにより、ベース強誘電体材料の残留分極が減少する。これらの実施形態では、極性層は強誘電体層であるが、ドーパントが存在しない場合より低い残留分極を有する。例えば、ドーパントの濃度は、極性層が実質的にゼロの残留分極を有する常誘電体層であるような濃度で存在し得る。しかしながら、実施形態はそのように限定されず、他の実施形態では、ベース極性材料がベース強誘電体材料を含む場合、ドーパントの濃度を増加させることにより、ベース強誘電体材料の残留分極が増加する。これらの実施形態では、極性層は強誘電体層であるが、ドーパントが存在しない場合よりも高い残留分極を有する。

【００４９】

一部の実施形態では、ベース極性材料がベース常誘電体材料又はベース誘電体材料を含む場合、ドーパントの濃度を増加させることにより、ベース常誘電体材料又はベース誘電体材料の残留分極が増加する。これらの実施形態では、ドーパントは元素を含み、ベース常

誘電体材料又はベース誘電体材料が強誘電体材料に変換されるような濃度で存在し、得られた極性層は強誘電体層となる。しかしながら、実施形態はそのように限定されず、他の実施形態では、ベース極性材料がベース強誘電体材料を含む場合、ドーパントの濃度を増加させても、ベース強誘電体材料の残留分極が増加しない場合がある。これらの実施形態では、ドーパントは元素を含み、ベース常誘電体材料又はベース誘電体材料が強誘電体材料に変換されないような濃度で存在し、その結果、得られた極性層は常誘電体層又は誘電体層である。

【００５０】

デバイスの観点から、明確なデジタル情報を取得するために、記憶層１０４が安定状態の間、例えば、＋Ｐｒ状態と－Ｐｒ状態との間で実質的に完全なスイッチングに供されることが重要であり得る。実質的な完全なスイッチングは、十分に高い電界及び十分に長いパルス幅によって達成され得る。スイッチング時間は、幾つか例を挙げると、ドメイン構造、エネルギー的に有利な強誘電性ドメインの核形成速度、強誘電性磁壁の移動度など、多くの要因に依存する。理論に拘束されることなく、抗電界よりも大きな十分な電界が適用されると仮定すると、スイッチング時間（ｔ０）の下限は、強誘電性磁壁が厚さ（ｄ）のキャパシタ膜内で以下の式によって１つの電極から別の電極に伝播する時間に関連付けることができる：

$t_0 = d / c$

ここで、ｃは磁壁の速度である。磁壁の速度は音速（～４０００ｍ／ｓ）に対応し得る。例えば、２００ｎｍの厚さの極性層の場合、ｔ０は約５０ｐｓになる。しかし、従来のＰｔ電極を用いた強誘電体積層体では、厚さｄを薄くするとスイッチング時間がある程度短くなり、それ以上薄くするとスイッチング速度が低下しないという、厚さ効果を示す場合がある。理論に拘束されることなく、かかる効果は、ｄの減少に伴う有効抗電界の増加を含む種々の要因に起因する可能性があるが、これは、極性層と電極（複数可）との間に形成される界面誘電体層に起因する可能性がある。かかる界面層は、界面層への電荷注入効果を生じさせ、スクリーニング効果をもたらし、それにより有効抗電界が増加する可能性がある。従って、本明細書に記載の種々の実施形態による強誘電体キャパシタの高速（例えば、＜２０ｎｓ）及び低電圧（例えば、＜１２００ｍＶ）スイッチングを可能にするために、本発明者らは、本明細書に記載されるように、厚さ、ドープされた極性層の組成、及び酸化物電極（例えば、ドープされた極性層に整合する結晶構造を有する）を最適化した。

【００５１】

これら及び他の利点を可能にするために、本明細書に開示される種々の実施形態では、記憶層１０４（図１Ａ）は、ドープされた強誘電体層であり、有利には、記憶層１０４の両端の電圧で強誘電体転移を受ける。当該電圧は、約１２００ｍＶ、１１００ｍＶ、１０００ｍＶ、９００ｍＶ、８００ｍＶ、７００ｍＶ、６００ｍＶ、５００ｍＶ、４００ｍＶ、３００ｍＶ、２００ｍＶ、１００ｍＶ、又はこれらの電圧のいずれかによって定義される範囲内の電圧より低い抗電圧に対応し得る。一部の実施形態では、これらの低い電圧は、比較的高い残留分極（例えば、＞１０μＣ／ｃｍ^2）を同時に示しながら達成され得る。比較的低い電圧の強誘電体転移と比較的高い残留分極の組み合わせは、本明細書に記載の特徴の種々の組み合わせによって達成される。

【００５２】

本明細書に開示される種々の実施形態では、記憶層１０４（図１Ａ）は強誘電体層であり、ドーパントでドープされた、比較的高い開始残留分極、例えば＞１０μＣ／ｃｍ^{2}を有するベース強誘電体材料から形成される。ここで、ドーパントは、ドープされていないベース強誘電体材料と比較して、ベース強誘電体材料の残留分極を少なくとも５％低下させる。

【００５３】

本明細書に開示される種々の実施形態では、極性層に整合する結晶構造を有し得る記憶層１０４（図１Ａ）は、第１及び第２の導電性酸化物電極層１０８、１１２の一方又は両方

の格子定数の約２５％、２０％、１５％、１０％、５％、２％、１％、又はこれらの値のいずれかによって定義された範囲内の割合内で整合する格子定数を有する。記憶層１０４の少なくとも一部と、第１及び第２の導電性酸化物電極層１０８、１１２の一方又は両方とは、シュードモルフィックであり得る。

【００５４】

従って、本明細書に開示される種々の実施形態によれば、高速及び低電圧のスイッチングを可能にするために、記憶層１０４は、約２００ｎｍ、１５０ｎｍ、１００ｎｍ、５０ｎｍ、２０ｎｍ、１０ｎｍ、５ｎｍ、２ｎｍ未満の厚さ、又はこれらの値のいずれかで定義された範囲の厚さを有する。一部の実装形態では、これらの厚さは、厚さがこれらの値の外側にある場合、所望のスイッチング電圧及び／又はスイッチング時間が達成され得ないような重要なパラメータであり得る。

【００５５】

更に、本明細書に開示される種々の実施形態では、記憶層１０４は、強誘電体酸化物層の金属原子の総数に基づいて、約５．０％超の濃度のドーパントでドープされる。ドープされた記憶層１０４は、ドーパントを含まない同じ組成を有する記憶層１０４とは約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なる残留分極を有し、約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の最終残留分極を有する。

【００５６】

上述のように、ベース極性材料は、誘電体材料、常誘電体材料、又は強誘電体材料であり得る。説明したように、一部の実施形態では、ドーパントは、自由エネルギー曲線の二重井戸ポテンシャルを低減する一方で、強誘電体材料であるベース極性材料の残留分極を低減し得る。一部の他の実施形態では、ドーパントは、常誘電体材料であるベース極性材料をドープすることによって残留分極を導入することができる。これは、自由エネルギー曲線の二重井戸ポテンシャルを伴い得る。更に一部の他の実施形態では、ドーパントは、誘電体材料であるベース極性材料をドープすることによって残留分極を導入することができる。これは、自由エネルギー曲線の二重井戸ポテンシャルを伴い得る。これらの実施形態では、ベース極性材料は誘電体材料を含み、ドーパントは、極性層が約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有するように、誘電体材料の強誘電性を増加させる。一部の実施形態では、誘電体材料は、Ｈｆ、Ｚｒ、Ａｌ、Ｓｉの酸化物又はこれらの混合物のうちの１又は複数を含む。一部の実施形態では、誘電体材料は、$Hf_{1-x}E_xO_y$で表される化学式を有し、ｘ及びｙの各々は、ゼロより大きく、Ｅは、Ａｌ、Ｃａ、Ｃｅ、Ｄｙ、Ｅｒ、Ｇｄ、Ｇｅ、Ｌａ、Ｓｃ、Ｓｉ、Ｓｒ、Ｓｎ、又はＹからなる群から選択される。一部の実施形態では、誘電体材料は、$Al_{1-x}R_xN$、$Ga_{1-x}R_xN$、又は$Al_{1-x-y}Mg_xNb_yN$で表される化学式を有し、ｘ及びｙの各々は、ゼロより大きく、Ｒは、Ａｌ、Ｃａ、Ｃｅ、Ｄｙ、Ｅｒ、Ｇｄ、Ｇｅ、Ｌａ、Ｓｃ、Ｓｉ、Ｓｒ、Ｓｎ、又はＹからなる群から選択される。

【００５７】

強誘電体キャパシタの極性層の結晶構造及び組成

種々の実施形態によれば、記憶層１０４（図１Ａ）は、ペロブスカイト結晶格子構造、六方晶結晶格子構造、又は超格子構造を有する結晶性極性層を有する。

【００５８】

一部の実施形態では、極性層は、$A_{(m-x)}A'_xB_{(n-y)}B'_yO_z$で表される化学式を有する強誘電体酸化物を含み、ｍ、ｎ及びｚは整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方は、ゼロより大きい。Ａ及びＡ’は、結晶構造の交換可能な原子位置を占有する金属であり、Ｂ及びＢ’は、結晶構造の交換可能な原子位置を占有する金属である。Ａ’及びＢ’の一方又は両方は、ドーパントであり得る。従って、これらの実施形態では、強誘電体酸化物は、化学式$A_{(m-x)}A'_xB_{(n-y)}B'_yO_z$を有するように１又は複数のドーパントＡ’及び／又はＢ’でドープされた、基本化学式AB_nO_zによって表され得るベース極性材料を含む。

【００５９】

上記の$A_{(m-x)}A'_xB_{(n-y)}B'_yO_z$で表される化学式では、Ａ及びＢは複数

の原子を表し得るため、強誘電体酸化物はドープされた固溶体である。すなわち、一部の実施形態では、強誘電体酸化物は、（A_1，A_2，・・・A_N）（m－x）A'_x（B_1，B_2，・・・B_M）（n－y）B'_yO_zで表される固溶体の一般式によって表され得る。ここで、m、n及びzは整数であり、x及びyの一方又は両方がゼロより大きい。A_1、A_2、・・・A_N及びA'は結晶構造内で交換可能な原子位置を占有し、B_1、B_2、・・・B_M及びB'は結晶構造内で交換可能な原子位置を占有する。A'及びB'の一方又は両方はドーパントであり得、A_1、A_2、・・・A_N及びB_1、B_2、・・・B_Mは合金元素である。従って、これらの実施形態では、強誘電体酸化物は、化学式（A_1，A_2，・・・A_N）（m－x）A'_x（B_1，B_2，・・・B_M）（n－y）B'_yO_zを有するように１又は複数のドーパントA'及び／又はB'でドープされた、基本化学式（A_1 A_2，・・・A_N）m（B_1，B_2，・・・B_M）nO_zによって表され得るベース極性材料を含む。同様に、A（m－x）A'_xB（n－y）B'_yO_zで表される化学式では、A'及びB'は複数の原子を表し得るため、強誘電体酸化物には複数のドーパント、例えば、交換可能な原子位置を占有する（A'_1，A'_2，・・・A'_N）x及び交換可能な原子位置を占有する（B'_1，B'_2，・・・B'_M）yがドープされる。ここで、A'_1，A'_2，・・・A'_N及びB'_1，B'_2，・・・B'_Mの各々は、ドーパントを表し得る。本明細書に記載の表現を単純化するために、一部の化合物は、下付き文字x、y、z、m、n、M及びNのうちの１又は複数なしで表され得、これらの化合物は、特に、電荷中性及び化学量論を満たすために下付き文字の適切な値を有することが理解される。例えば、（A_1，A_2，・・・A_N）（m－x）（A'_1，A'_2，・・・A'_N）x（B_1，B_2，・・・B_M）（n－y）（B'_1，B'_2，・・・B'_M）yO_zで表されるドープされた合金は、（A_1，A_2，・・・A_N）（A'_1，A'_2，・・・A'_N）（B_1，B_2，・・・B_M）（B'_1，B'_2，・・・B'_M）Oとして表され得るが、これに限定されない。

【００６０】

ドーパント（複数可）A'及び合金元素A_1、A_2、・・・A_N並びにドーパント（複数可）B'及び合金元素B_1、B_2、・・・B_Nは、結晶構造内のそれぞれの交換可能な原子位置を占有し得るが、ドーパント（複数可）は、得られた極性層に対して、特定の属性及び技術的効果、例えば、強誘電性特性を有する置換元素を指す。特に、本明細書に記載されるように、ドーパントとは、例えば、置換的に、ドーパントがそれが置換する原子とは異なる酸化状態を有する場合に、ベース材料中の原子を置換する元素を指す。更に、ドーパントは、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在し、ここで、有効な濃度により、他の強誘電特性の中でも、約５μＣ／ｃｍ^{2}より大きいドープされた極性層の残留分極が得られる。種々の実施形態では、ドーパントは、４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素であり得る。一部の実施形態では、ドーパントは、ランタニド元素又はニオブを含む。加えて、ドーパントA'及び／又はB'並びにこれらの濃度により、金属原子は、ベース極性材料の常誘電相の格子定数に基づいて、０．３～２％の範囲の原子位置の自発的歪みを達成し得る。種々の実施形態では、上記の特性を有するドーパントは、極性層中の金属原子の総数に基づいて、０．１パーセントより大きく２５パーセント未満の有効濃度で存在し、極性層は、約１２００ｍＶより低い電圧で強誘電体転移を受ける。極性層のこれら及び他の特性を達成するためにドーパント（複数可）を用いて結晶構造を設計することの追加の詳細は、以下で考察される。

【００６１】

図２Ａを参照すると、一部の実施形態によれば、結晶性極性層は、ペロブスカイト構造２０４Ａを有する。図示のペロブスカイト構造２０４Ａは、常誘電状態の結晶性酸化物を表している。これは、化学式ABO_3を有する。ここで、A及びBの各々は、１又は複数の金属カチオンを表し、Oは酸素アニオンを表す。上述のように、結晶性極性層は、Aで表される複数の元素（例えば、A_1，A_2，・・・A_N）及び／又はBで表される複数の元素（例えば、B_1，B_2，・・・B_N）を有し、A'（例えば、A'_1，A'_2，・・・A'_N）で表される１又は複数のドーパント及び／又はB'（例えば、B'_1，B'_2，・・・

Ｂ’$_N$）で表される１又は複数のドーパントでドープされ得る。従来から示されているように、Ａサイトカチオンはコーナー部を占有し、Ｂサイトカチオンはペロブスカイト構造２０４Ａの体心に位置する。単位格子あたり３つの酸素原子がペロブスカイト構造２０４Ａの面上に存在する。種々のペロブスカイト構造は、これに限定されるものではないが、酸素八面体ネットワークの剛性及び明確に定義された酸素イオン半径１．３５Åから、約４Åに近い格子定数を有する。有利には、全体的な結晶構造を維持しながら、本明細書に記載の種々の有利な特性を達成するために、多くの異なるカチオンをドーパントとして、Ａサイト及びＢサイトの両方で置換することができる。種々の実施形態によれば、ドーパント原子は、Ａ又はＢサイトを占有して、置換的にドープされた固溶体を形成することができる。Ａサイトを占有するドーパントは、ベース極性材料に対して、Ｂサイトを占有するドーパントとは非常に異なる影響を及ぼし得ることが理解されよう。

【００６２】

引き続き図２Ａを参照する。立方晶ペロブスカイト構造を有する常誘電体材料であり得るチタン酸バリウム（ＢａＴｉＯ$_3$）を含む極性層の例示的な例では、ＡサイトはＢａ原子で占有され、Ｔｉ原子はＢサイトを占有してＯ原子の八面体に囲まれ、Ｏ原子は単位格子の各面の中央に配置されている。常誘電相において約１３０℃であり得るＢａＴｉＯ$_3$のキュリー温度を超えると、ペロブスカイト構造２０４Ａは、立方晶又は正方晶となり得る。常誘電相では、Ｏ原子は、単位格子の両側の面にあるＯ原子の各対に対して中間位置を占有し得る。キュリー温度以下では、強誘電相において、ペロブスカイト構造２０４Ａは、正方晶構造を有し得、当該正方晶構造では、Ｂ副格子（例えば、ＢａＴｉＯ$_3$のＴｉ副格子）及びＯ原子は、Ｂａ原子を基準として反対方向にシフトし得る。これらの原子シフトは、正方晶（常誘電相が立方晶である場合）又は更に伸長された正方晶（常誘電相が正方晶である場合）となる単位格子の小さな緩和を伴い、安定な分極（例えば、約２６μＣ／ｃｍ^2）を生成し得る。正方晶相では、立方対称性が破られ、［１００］、［０１０］、及び［００１］方向に沿った分極を有する６つの対称性等価変異体が生じる。

【００６３】

図２Ｂを参照すると、一部の実施形態によれば、結晶性極性層は、六方晶結晶構造２０４Ｂ－１／２０４－Ｂ－２を有する。六方晶結晶構造２０４－Ｂ１は側面図を表し、六方晶結晶構造２０４－Ｂ２は上面図を表す。六方晶結晶構造２０４Ｂ－１／２０４－Ｂ－２は、強誘電状態の結晶性酸化物を表し、化学式ＲＭｎＯ$_3$で表され得る。ここで、Ｒは金属カチオン、Ｍｎはマンガンカチオン、Ｏは酸素アニオンを表す。これらの実施形態では、上述のように、結晶性極性層は、交換可能な原子位置を占有するＲ（例えば、Ａ$_1$，Ａ$_2$，・・・Ａ$_N$）で表される複数の元素、及び／又は交換可能な原子位置を占有するＭｎ（例えば、Ｂ$_1$，Ｂ$_2$，・・・Ｂ$_N$）に加えて、複数の元素を有することができ、Ａ’（例えば、Ａ’$_1$，Ａ’$_2$，・・・Ａ’$_N$）で表される１又は複数のドーパント及び／又はＢ’（例えば、Ｂ’$_1$，Ｂ’$_2$，・・・Ｂ’$_N$）で表される１又は複数のドーパントでドープすることができる。一部の実施形態では、Ｒは、セリウム（Ｃｅ）、ジスプロシウム（Ｄｙ）、エルビウム（Ｅｒ）、ユーロピウム（Ｅｕ）、ガドリニウム（Ｇｄ）、ホルミウム（Ｈｏ）、ランタン（Ｌａ）、ルテチウム（Ｌｕ）、ネオジミウム（Ｎｄ）、プラセオジミウム（Ｐｒ）、プロメチウム（Ｐｍ）、サマリウム（Ｓｍ）、スカンジウム（Ｓｃ）、テルビウム（Ｔｂ）、ツリウム（Ｔｍ）、イッテルビウム（Ｙｂ）、及びイットリウム（Ｙ）からなる群から選択される元素である。六方晶結晶構造２０４Ｂ－１は、２層のＭｎＯ$_5$双角錐及び２層のＲ$^{3+}$イオンを示している。実施形態による六方晶結晶構造を有する結晶性極性層は、比較的大きな残留分極及び６００～１０００Ｋの範囲の比較的高いＴ$_C$を有し得る。図示の六方晶構造を有する結晶性極性層は、ＭｎＯ$_5$双角錐の最密層を有しており、これらは、ａｂ平面（図２Ｂのｘ－ｙ平面）のコーナー部を共有している。六方晶のｃ軸（図２Ｂのｚ方向）に沿って、ＭｎＯ$_5$の層はＲ$^{3+}$イオンによって十分に分離されている。Ｔ$_C$の下の双角錐型サイトを協調的に傾斜させると、Ｒ$^{3+}$イオンがｃ軸に沿って２つの非等価サイトに移動する。単位格子内の２つのＲ$^{3+}$イオンが上（下）に移動し、１つが下（上）に移動して、強誘電状態が生成される。酸素イオンもａｂ平面で移動

する。ピラミッド構造２０４Ｂ－３に示すように、R^{3+}イオン及び酸素イオンの両方の変位が強誘電分極に寄与する。

【００６４】

図２Ｃを参照すると、一部の実施形態によれば、結晶性極性層は、超格子構造２０４Ｃ－１を有する。図示の超格子構造２０４Ｃ－１は、常誘電状態の結晶性酸化物を表している。これは、化学式ABO_3を有し得、ここで、Ａ及びＢの各々は、２つ以上の金属カチオンを表し、Ｏは酸素アニオンを表す。上述のように、例えば、ＡはA_1，A_2，・・・A_Nを表すことができ、かつ／又はＢはB_1，B_2，・・・B_Nを表すことができ、極性層は、Ａ’（例えば、A_1'，A_2'，・・・A_N'）で表される１又は複数のドーパント及び／又はＢ’（例えば、B_1'，B_2'，・・・B_N'）で表される１又は複数のドーパントでドープされ得る。

【００６５】

種々の実施形態では、超格子構造は、１又は複数の$A_2B_2O_3$層と交互になった１又は複数の$A_1B_1O_3$層を有し得、超格子構造［$A_1B_1O_3$／$A_2B_2O_3$］$_n$として表され得る。ここで、ｎは、１～１００の層の交互の対の数である。超格子構造は、$A_1B_1O_3$層と$A_2B_2O_3$層との各々が２つ以上の原子単層を有し得るが、わずか２つの原子単層しか有さない規則化合物であり得る。図示の実施形態では、単位格子は、ｘ又は［１００］及びｙ又は［０１０］方向によって画定される５つの平行な平面によって画定され得る。図示の実施形態では、B_1及びB_2は同じであり、単位格子は、ｚ又は［００１］方向に式A_1BO_3で表される上半分及び式A_2BO_3で表される下半分を有し、各半分は、図２Ａに関して上述した原子位置に関して、ペロブスカイト構造２０４Ａに類推することができる。単位格子の上半分では、第１のカチオンA_1が上面と交差するコーナー部を占有し、第２のカチオンA_2が下面と交差するコーナー部を占有する。図２Ａに関して上記で説明したペロブスカイト構造２０４Ａと同様の方法で、Ｂサイトカチオンは体心に位置し、単位格子あたり３つの酸素原子が面上に存在する。単位格子の下半分は上半分の鏡像であり、対称面は上半分の下面であり、下半分の上面は上半分の下面によって画定される。従って、単位格子の下半分では、第２のカチオンA_2が上面と交差するコーナー部を占有し、第１のカチオンA_1が下面と交差するコーナー部を占有する。図２Ａに関して前述したペロブスカイト構造２０４Ａと同様の方法で、Ｂサイトカチオンは体心に位置し、単位格子あたり３つの酸素原子が面上に存在する。従って、［００１］方向では、A_1カチオン及びＯアニオンを有するA_1／Ｏ平面は、A_2カチオン及びＯアニオンを有するA_2／Ｏ平面と交互に配置される。ここで、Ｂカチオン及びＯアニオンを有する平面が交互のA_1／Ｏ平面及びA_2／Ｏ平面の各対の間に挿入され、それによって、A_1BO_3層とA_2BO_3層とを交互にすることで、原子層レベルで形成されるA_1BO_3／A_2BO_3超格子が形成される。矢印は、A_1BO_3／A_2BO_3超格子の種々のエネルギー低下歪みに関連する種々の原子運動を示している。超格子構造２０４Ｃ－１では、A_1及びA_2カチオン、Ｂカチオン、及びＯアニオンに示される上下の矢印は、極性層が強誘電体相転移を起こし、それによって分極（ＰＳ）が生じるときに、電界に応答して一部の超格子構造で発生する原子変位の方向を示している。超格子構造２０４Ｃ－２及び２４０Ｃ－３では、材料に応じて、酸素原子が指示された方向に回転することで、代替の分極状態が生じることが示されている。

【００６６】

種々の実施形態では、$SrTiO_3$層を有する超格子構造の交互の層の一方、及び交互の酸化物層の他方は、A_2TiO_3又は$A_2B_2O_3$で表される。更に図２Ｃを参照すると、超格子構造を有する極性層の例示的な例は、$PbTiO_3$を含む第２の層と交互になった$SrTiO_3$を含む第１の層を有する超格子を含む規則合金を含む。この例では、図２Ｃを参照すると、A_1カチオン、A_2カチオン、及びＢカチオンは、それぞれ、Ｐｂカチオン、Ｓｒカチオン、及びＴｉカチオンを表しており、超格子構造は、［$SrTiO_3$／$PbTiO_3$］$_n$で表される$PbTiO_3$（例えば、図２Ｃの単位格子の上半分）と交互になった$SrTiO_3$層（例えば、図２Ｃの単位格子の下半分）を含む。一部の実施形態

では、超格子構造は、［ＳｒＴｉＯ３／ＬａＡｌＯ３］ｎで表されるＬａＡｌＯ３と交互になったＳｒＴｉＯ３層を有する。

【００６７】

一部の実施形態では、極性層は、ＢａＴｉＯ３、ＰｂＴｉＯ３、ＫＮｂＯ３、ＮａＴａＯ３、ＢｉＦｅＯ３及びＰｂＺｒＴｉＯ３からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む。

【００６８】

一部の実施形態では、極性層は、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３－ＰｂＴｉＯ３、ＰｂＬａＺｒＴｉＯ３、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））Ｏ３及びＢａＴｉＯ３－ＢａＳｒＴｉＯ３からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む。

【００６９】

一部の実施形態では、極性層は、ＬｉＮｂＯ３、ＬｉＴａＯ３、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯからなる群から選択される強誘電体酸化物を含む。

【００７０】

一部の実施形態では、ベース強誘電体材料は、六方晶結晶構造を有し、ベース強誘電体材料は、ＬｕＦｅＯ３を含むか、又はＲＭｎＯ３で表される化学式を有し、Ｒは希土類元素である。

【００７１】

一部の実施形態では、極性層は、Ｐｂ（Ｔｉ１－ｙＺｒｙ）Ｏ３又はＰｂ（Ｔｉ１－ｙ－ｚＺｒｙＮｂｚ）Ｏ３を含み、ここで、ｙ及びｚの各々は、ゼロより大きい。

【００７２】

一部の実施形態では、極性層は、（Ｂｉ１－ｘＬａｘ）ＦｅＯ３、（Ｂｉ１－ｘＣｅｘ）ＦｅＯ３及びＢｉＦｅ１－ｙＣｏｙＯ３のうちの１つを含む。

【００７３】

記憶層と一体化された導電性酸化物電極

本明細書に記載の種々の極性層を酸化物電極と一体化してキャパシタを形成するための材料の選択、及びこれらの堆積プロセスは、デバイスアーキテクチャ、サーマルバジェット、性能、信頼性、一体化の困難さ、環境問題、コスト、及びキャパシタの他の材料を含む様々な要因に依存し得る。本明細書に開示されるメモリデバイス用のキャパシタを形成するための上部電極と下部電極との間の極性層の一体化は、多くの課題に直面している。例えば、強誘電体酸化物などの一部の極性層は、比較的高温（例えば、３００℃～８００℃）の酸素含有雰囲気中で堆積され、電極の少なくとも１つ（例えば、極性層が形成される下部電極）は、これらの条件下での酸化に耐性があり、極性酸化物の処理条件に耐える必要がある。このため、業界では、一部の極性層は、Ｐｔ及びＰｄなどの耐酸化性貴金属と一体化されている。しかし、貴金属はエッチングが困難であり、接着性が低いため、業界ではその一体化が制限されている。更に、貴金属は、その下地のＳｉ基板に拡散すると深い準位を形成し、トランジスタの性能を大幅に低下させる可能性がある。更に、一部の電極は、例えば、残留分極を減らすなど、極性層の強誘電特性に悪影響を与える可能性がある。

【００７４】

更に、本発明者らは、本明細書に記載の実施形態による導電性酸化物を含む上部及び下部電極の材料組成及び結晶構造を設計することにより、強誘電体キャパシタの種々の強誘電特性を、幾つか例を挙げると、スイッチング電圧、スイッチング時間、残留分極、飽和分極、抗電界、強誘電体転移温度、電極の導電率、リーク電流などを含めて維持又は改善できることを発見した。例えば、上述のように、従来の強誘電体キャパシタ、例えば、Ｐｔ電極を含むものは、極性層と電極（複数可）との間に界面層を生じさせることができる。これは、電荷注入及びスクリーニング効果をもたらし、これにより、極性層の有効抗電界を増加させることができる。従来の強誘電体積層体とは異なり、本明細書に記載の実施形

態における設計された電極は、これらの影響を低減又は排除することができる。更に、本明細書に記載の実施形態による導電性酸化物を含む上部及び下部電極は、拡散障壁として機能しており、一体化が困難なＰｔ又はＰｄなどの貴金属を使用せずに、上記の種々の極性層の一体化を可能にし得る。

【００７５】

これら及び他の目的に対処するために、種々の実施形態によれば、キャパシタ積層体は、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を含み、極性層は、本明細書に開示される極性層のいずれかであり得る。種々の実施形態では、極性層は、本明細書に記載されるようなドーパントでドープされた任意の結晶性ベース極性材料を含む。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は更に、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を含み、極性層は、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する。一部の他の実施形態では、半導体デバイスは、キャパシタ積層体を含み、キャパシタ積層体は、次に、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有する。ベース極性材料は、ペロブスカイト構造、六方晶結晶構造、又は超格子構造のうちの１つを有する金属酸化物を含む。ドーパントは、金属酸化物の金属（複数可）とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系、又は５ｆ系のうちの１つの金属を含む。キャパシタ積層体は、結晶性極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を更に含み、結晶性極性層は、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方と同じ結晶構造を有する。これらの望ましい効果を達成することができる例示的なキャパシタ積層体が、図３に関して示されている。

【００７６】

図３は、一部の実施形態による、第１（下部）及び第２（上部）の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００と、これらの間に挿入され、整合する結晶構造を有する極性層３０８と、を含むキャパシタ積層体３１２の層の結晶構造を概略的に示している。図示の実施形態では、整合する結晶構造は、図２Ａに関して上述したように、ペロブスカイト構造である。この実施形態では、極性層３０８は、$A_{(m-x)}A'_xB_{(n-y)}B'_yO_z$で表される化学式を有する強誘電体酸化物を含み、Ａ及びＡ’は、ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’は、ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ａ’及びＢ’の一方又は両方は、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚは、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方は、ゼロより大きい。上述のように、Ａは固溶体を形成する１又は複数の合金元素を表し、Ａは固溶体を形成する１又は複数の合金元素を表し、Ａ’及びＢ’の各々は１又は複数のドーパントを表し得る。第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方は、$C_{(p-u)}C'_uD_{(q-v)}D'_vO_w$で表される化学式を有する酸化物を含み、Ｃ及びＣ’は、ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、Ｄ及びＤ’は、ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、ｐ、ｑ、及びｗは、整数であり、ｕ及びｖの一方又は両方は、ゼロより大きい。追加の元素（例えば、Ｃ’’、Ｃ’’’など）は、Ｃ及びＣ’と交換可能な原子位置を占有することができ、追加の元素（例えば、Ｄ’’、Ｄ’’’など）は、Ｄ及びＤ’と交換可能な原子位置を占有して、固溶体を形成することができる。異なる元素及びこれらの原子分率を調整して、極性層３０８の格子定数により厳密に整合させるように格子定数を調整することができ、かつ／又は他のパラメータの中でも特に抵抗率を調整することができる。

【００７７】

本明細書に開示される種々の実施形態では、極性層３０８及び第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の組成は、極性層３０８が、極性層３０８に接触している第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方の格子

定数の約２５％、２０％、１５％、１０％、５％、２％、１％、０．５％、０．２％、０．１％又はこれらの値のいずれかによって定義された範囲内の割合で整合する格子定数を有するように調整することができる。

【００７８】

極性層３０８の少なくとも一部と、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方とは、シュードモルフィックであってもよく、又はシュードモルフィック的に歪んでいてもよい。例えば、実施形態によれば、極性層３０８は、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００にシュードモルフィックである約１０ｎｍ～５００ｎｍの横方向寸法を有する領域を有する。シュードモルフィック領域は、例えば、極性層３０８の粒子に対応し得る。いかなる理論にも拘束されることなく、当業者は、シュードモルフィック性が達成されるかどうかは、他の要因の中でも特に、層の厚さ及び格子不整合に依存しており、歪みエネルギーがミスフィット転位の形成のための臨界エネルギーを下回っている限り、少なくとも部分的なシュードモルフィック性が達成され得ることを理解するであろう。本発明者らは、当該層の比較的小さな格子不整合及び少なくとも部分的なシュードモルフィック形成により、接触抵抗を低減することができ、これにより、本明細書に記載されるように、強誘電体キャパシタの低電圧スイッチング（例えば、＜１２００ｍｅＶ）の実現に寄与し得ることを見出した。更に、結晶性極性層が形成される下部電極の材料組成及び結晶構造を設計することにより、１又は複数の粒子などの結晶性極性層の少なくとも一部をエピタキシャル成長させることができる。その結果、下部電極の平面格子定数及び／又は結晶対称性を、その上に形成された結晶性極性層に付与することができる。いかなる理論にも拘束されることなく、極性層と第１及び／又は第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極との間の格子不整合から生じるエピタキシャル歪みは、極性層と強く結合し得る。状況によっては、極性層のバルク状態図に存在しない新しい相（複数可）をエピタキシャル安定化することができ、歪み設計により、特定の強誘電特性を所望の値に調整することが可能となり得、かつ／又はミスフィット転位により、強誘電特性を調整するための歪みが部分的又は完全に緩和され得る。

【００７９】

従って、これら及び他の利点を得るために、本明細書に記載の種々の実施形態によれば、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方は、約０．５～５ｎｍ、５～１０ｎｍ、１０～１５ｎｍ、１５～２０ｎｍ、２０～２５ｎｍ、２５～３０ｎｍ、３０～３５ｎｍ、３５～４０ｎｍ、４０～４５ｎｍ、４５～５０ｎｍの厚さ、又はこれらの値のいずれかによって定義され、これらの値のいずれかを含む範囲の厚さを有する。更に、厚さを最適化して、電極のバルク抵抗によってスイッチング電圧に追加される直列電圧を低減することもできる。

【００８０】

極性層３０８が上記のようなペロブスカイト構造を有する一部の実施形態では、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方は、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ２Ｃｕ３Ｏ７、Ｂｉ２Ｓｒ２ＣａＣｕ２Ｏ８、ＬａＮｉＯ３、ＳｒＲｕＯ３、ＬａＭｎＯ３、ＳｒＭｎＯ３、ＬａＣｏＯ３、ＳｒＣｏＯ３又はＩｒＯ３からなる群から選択される酸化物を含む。

【００８１】

一部の実施形態では、ペロブスカイト構造を有する第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方の薄層（例えば、５ｎｍ～１５ｎｍ）は、上述のように、その上にペロブスカイト構造を有する極性層３０８が形成又は成長されて、歪み設計、低い接触抵抗、及び極性層３０８の強誘電特性の保存又は増強を含む種々の利点を達成するテンプレートとして役立ち得る。しかしながら、付加的な電極との積層体を形成することによって、電極の全体的な性能を更に改善させることができる。例えば、付加的な電極により、より高い導電性が提供され得、その結果、第１の導電性又は半導電性酸化物電極３０４及びその上に形成された第１の付加的な電極を含む第１の電極積層体は、同等又は同じ厚さを有する第１の導電性又は半導電性酸化物電極３０４と比較してより低い

全体的な電気抵抗率を提供し得る。同様に、第２の導電性又は半導電性酸化物電極３００及びその上に形成された第２の付加的な電極を含む第２の電極積層体は、同等又は同じ厚さを有する第２の導電性又は半導電性酸化物電極３００と比較してより低い全体的な電気抵抗率を提供し得る。更に、付加的な電極は、例えば、酸素拡散のための拡散障壁として機能し得る。本発明者らは、これら及び他の利点が、導電性二元酸化物を含む付加的な電極を使用して達成できることを発見した。これらの実施形態では、極性層３０８は、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方に直接接触し、キャパシタは、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方に形成された付加的な電極を更に含む。ここで、付加的な電極は、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、テルリウム酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物又はレニウム（Ｒｅ）酸化物からなる群から選択される導電性二元金属酸化物を含む。二元酸化物は非ペロブスカイト構造を有するが、より高い導電性を提供する。その上に形成されたペロブスカイト構造を有する導電性又は半導電性酸化物電極により、比較的低温でのペロブスカイト構造を有する極性層３０８の成長、例えば、エピタキシャル成長のためのシード又はテンプレートが提供され得る。

【００８２】

本明細書に記載されるように、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方、又はそれぞれ第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００を含む第１及び第２の電極積層体の一方又は両方は、それぞれ、十分に高い導電性を有し、その結果、それらは、低電圧スイッチング、例えば、＜１２００ｍｅＶに適した導電性電極として機能し得る。従って、種々の実施形態では、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方、又はそれぞれ第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００を含む第１及び第２の電極積層体の一方又は両方は、それぞれ、約０、１、０．０５、０．０２、０．０１、０．００５、０．００２、０．００１、０．０００５オーム－ｃｍより低い抵抗率、又はこれらの値のいずれかで定義された範囲の抵抗率を有する。

【００８３】

図３に関する上記の説明において、極性層３０８と、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方との間の整合結晶構造の図示の例は、ペロブスカイト構造であるが、実施形態はそのように限定されず、一部の他の実施形態によれば、ペロブスカイト構造を有する第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００について本明細書に記載の種々の材料及び積層体の組み合わせは、図２Ｃに関して上記の超格子構造を有する極性層３０８と一体化できることを理解されよう。

【００８４】

更に一部の他の実施形態では、極性層３０８と、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方との間の整合する結晶構造は、図２Ｂに関して上述したような六方晶構造であり得る。

【００８５】

更に一部の他の実施形態では、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方の結晶構造は、デラフォサイト構造、スピネル構造、又は立方構造であり得る。これらの実施形態では、第１及び第２の導電性又は半導電性酸化物電極３０４、３００の一方又は両方は、ＰｔＣｏＯ$_2$及びＰｄＣｏＯ$_2$、ＡｌドープZnO、並びに六方晶結晶構造を有する極性層と一体化され得るデラフォサイト構造を有する他の導電性酸化物のうちの１又は複数と、Fe_3O_4、LiV_2O_4及びスピネル構造を有する他の酸化物並びに／又は特にペロブスカイト又は超格子構造を有する極性層と一体化され得る立方晶構造を有するＳｎドープIn_2O_3と、を含み得る。

【００８６】

ベース極性材料のドーピングによる、強誘電体キャパシタの低電圧スイッチング及び不揮発性のための極性層設計

前述のように、半導体デバイス、例えば、ＦｅＲＡＭデバイス用の強誘電体キャパシタで

は、極性層が比較的高い残留分極を有し、超低電圧用途のための比較的低い強誘電体転移電圧を有するものを達成することは困難であった。また、不揮発性メモリ用途では、例えば、室温で少なくとも１０年経過してもデータが読み出せるように極性層を設計することが、更に大きな課題となっている。これら及びその他のニーズに対処するために、以下では、不揮発性メモリ用途で超低電圧（例えば、＜１２００ｍＶ）でスイッチングさせ、一方で比較的高い残留分極（例えば、＞１０μＣ／ｃｍ^2）を同時に示し得る強誘電体キャパシタ、例えば、ＦｅＲＡＭの設計アプローチが開示される。種々の実施形態によれば、キャパシタは、本明細書に記載されるようなドーパントでドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層を有する。ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、キャパシタ又は極性層の強誘電性スイッチング電圧が、ドーパントを含まないベース極性材料の強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在し、かつ／又は極性層の残留分極が、ドーパントを含まないベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する。キャパシタ積層体は、極性層の両側に第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を更に含み、極性層は、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内に整合する格子定数を有する。

【００８７】

本明細書に記載の設計アプローチを使用すると、キャパシタ又はそれに含まれる記憶層１０４（図１Ａ）は、約１２００ｍＶ、１１００ｍＶ、１０００ｍＶ、９００ｍＶ、８００ｍＶ、７００ｍＶ、６００ｍＶ、５００ｍＶ、４００ｍＶ、３００ｍＶ、２００ｍＶ、１００ｍＶより低いスイッチング電圧を有するか、又は強誘電体転移温度未満のこれらの値のいずれかによって定義された範囲内の電圧である。更に、記憶層１０４（図１Ａ）は、５～３０μＣ／ｃｍ^2、３０～５０μＣ／ｃｍ^2、５０～７０μＣ／ｃｍ^2、７０～９０μＣ／ｃｍ^2、９０～１１０μＣ／ｃｍ^2、１１０～１３０μＣ／ｃｍ^2、１３０～１５０μＣ／ｃｍ^2、又はこれらの値のいずれかで定義された範囲の値の残留分極を有し得る。

【００８８】

図４Ａは、安定した残留分極状態間の強誘電体転移によるスイッチングに対応する二重井戸曲線の２つのウェル間のポテンシャル障壁によって引き起こされるヒステリシスに関連する分極場（Ｐ－Ｅ）ループ４００Ａ、及び関連する原子変位を概略的に示している。図２Ａ及び１Ｂに関して上述したように、Ｐ－Ｅループ４００Ａは、極性層が常誘電性ペロブスカイト構造２０４Ａ（図２Ａ）を有する常誘電相にある分極Ｐ＝０から開始し、＋Ｐｍａｘで飽和に達するまで、磁場の増加とともに分極が増加することを特徴とする。＋Ｐｍａｘで飽和に達した後、電界がその後減少すると、Ｅ＝０で、残留分極＋Ｐｒが残り、極性層は第１の強誘電相となる。キュリー温度以下では、第１の強誘電相において、ペロブスカイト構造２０４Ａ－１は、正方晶構造を有し得、当該正方晶構造では、Ｂ副格子及びＯ原子は、Ａ原子を基準として反対方向にシフトし得る。負の電界を増加させて－Ｐｍａｘで飽和し、その後、電界を減少させてＥ＝０に戻すと、残留分極－Ｐｒが残り、極性層は第２の強誘電体相となる。キュリー温度以下では、第２の強誘電相において、ペロブスカイト構造２０４Ａ－２は、正方晶構造を有し得、当該正方晶構造では、Ｂ副格子及びＯ原子は、Ａ原子を基準として反対方向にシフトし得、第１の強誘電相に関して反対のそれぞれの方向にシフトし得る。

【００８９】

図４Ｂは、ペロブスカイト結晶構造を有する強誘電体層の残留分極状態と関連する原子変位との間の強磁性遷移によるスイッチングに対応する二重井戸ポテンシャルを示す概略自由エネルギー曲線４００Ｂを示している。本明細書では、例示のみを目的とし、極性層の結晶構造に限定することなく、ペロブスカイト構造を有する極性層に関して、極性層における強誘電性スイッチング現象を説明する。図示のように、二重井戸ポテンシャル自由エネルギー曲線４００Ｂの２つの極小値は、残留分極＋Ｐｒ及び－Ｐｒを有する第１及び第

２の強誘電状態を表しており、これらは、正方晶ペロブスカイト構造２０４Ａ－１及び２０４Ａ－２によってそれぞれ表される。２つの強誘電状態は、二重井戸エネルギー障壁ΔＥによって分離されている。本発明者らは、比較的大きな分極値を維持しつつ自由エネルギー曲線のこのエネルギー障壁を下げることで、超低遷移電圧及び不揮発性メモリ状態を有する強誘電体キャパシタが得られることを見出した。

【００９０】

図４Ｃは、グラフ４００Ｃであり、実施形態による、超低遷移強誘電体転移電圧を達成するために、ベースの強誘電体酸化物層に種々の量のドーパントをドープし、それによって安定した残留分極状態間のエネルギー障壁を調整することによって形成された強誘電体酸化物層の自由エネルギー曲線の二重井戸ポテンシャルの計算を示す。図示の例では、計算に使用されたベース強誘電体酸化物は$PbZrTiO_3$であり、ドーパントは、極性層が$PbLaZrTiO_3$を含むようにペロブスカイト構造のＡサイトを置換的に交換可能に占有するＬａである。図示の例では、ベース強誘電体酸化物は、約９０μＣ／ｃｍ^{2}の開始残留分極及び約２９０ｍｅＶの開始二重井戸ポテンシャルを有する。Ｌａを最大２５％添加すると、二重井戸のエネルギー障壁は約１００ｍｅＶ減少して約１９０ｍｅＶになり、残留分極が約１５μＣ／ｃｍ^{2}減少する。この計算例では、約２００ｍＶという超低電圧でスイッチング可能な不揮発性メモリに適した極性層を満足すると同時に、不揮発性のために約７５μＣ／ｃｍ^{2}という比較的高い残留分極を示す組成を示している。

【００９１】

本発明者らは、例示された実施例におけるアプローチが、用途依存のパラメータ、例えば、遷移（例えば、スイッチング）電圧及び／又は残留分極に応じて、本明細書に記載の種々のベース極性材料及びドーパントに一般化できることを発見した。実施形態によれば、開始ベース強誘電体酸化物は、例えば、図４Ｃに関して示されるように、ドーピングによる同じものの減少を考慮して、かつ所望のレベルの不揮発性を説明するために、比較的高い残留分極を有する。実施形態によれば、ベース極性材料がベース強誘電体材料である場合、ベース強誘電体材料の組成は、ベース強誘電体材料の残留分極及びドープされた極性材料の残留分極が約５～３０μＣ／ｃｍ^2、３０～５０μＣ／ｃｍ^2、５０～７０μＣ／ｃｍ^2、７０～９０μＣ／ｃｍ^2、９０～１１０μＣ／ｃｍ^2、１１０～１３０μＣ／ｃｍ^2、１３０～１５０μＣ／ｃｍ^2、又はこれらの値のいずれかで定義された範囲の値であるように選択又は調整される。用途に応じて、ベース極性材料がベース強誘電体材料である場合、ベース強誘電体材料の組成は、ベース強誘電体材料の二重井戸エネルギー障壁及びドープされた極性材料の二重井戸障壁が２００～３００ｍｅＶ、３００～４００ｍｅＶ、４００～５００ｍｅＶ、５００～６００ｍｅＶ、６００～７００ｍｅＶ、７００～８００ｍｅＶ、９００～１０００ｍｅＶ、又はこれらの値のいずれかで定義された範囲の値であるように選択又は調整される。比較的高い残留分極及び比較的高い二重井戸エネルギー障壁を有する開始ベース強誘電体材料に、本明細書に記載のドーパントが添加される。添加されたドーパントは、二重井戸のエネルギー障壁を０～１００ｍｅＶ、１００～２００ｍｅＶ、２００～３００ｍｅＶ、３００～４００ｍｅＶ、４００～５００ｍｅＶ、又はこれらの値のいずれかで定義された範囲の値だけ低下させることができる。添加されたドーパントは、残留分極を約５％、１０％、２０％、３０％、４０％、５０％、６０％、７０％、又はこれらの値のいずれかによって定義された範囲の値まで低下させることができる。

【００９２】

本発明者らは、二重井戸ポテンシャル調整のアプローチがまた、強誘電体キャパシタを高いデータ保持性能に調整することを可能にし得ることを発見した。バックスイッチングを引き起こす可能性のある種々の影響のため、強誘電状態は、残留分極を確立した後、理想的にはその残留分極を無期限に保持することはできない。この分極は、時間とともにわずかに減少する。これは保持損失と称され得、スイッチング電荷と非スイッチング電荷との差が時間とともに小さくなるという特徴がある。保持損失は、ヒステリシスの残留分極の長期的な緩和として観察される。これは、書き込みパルスによって状態が保存された一定

期間後、読み出しパルスなどを使用して保持電荷を測定することで求められる。
【００９３】
多くの不揮発性メモリ用途の場合、強誘電体キャパシタは、デジタル情報を１０年以上、例えば少なくとも室温で保存する必要がある。理論に拘束されることなく、分極は、減衰率ｍでｔ$_0$から始まる対数減衰に従うことができ、これは、概して、以下の式で表され得る。
Ｐ（ｔ）＝Ｐ（ｔ$_0$）－ｍｌｏｇ（ｔ／ｔ$_0$）
ここで、
ｍ∝ｅｘｐ（－Ｗ／ｋＴ）
である。式中、Ｗは活性化エネルギー、ｋはボルツマン定数であり、上記の二重井戸ポテンシャルに関連付けられ得る。残留分極がｔ＝ｔ$_C$で臨界閾値Ｐ$_C$を下回ると、センス増幅器はメモリ状態を区別できなくなる場合がある。保持損失は、以下の式を使用して統計的に分析できる。
ｌｏｇｌｏｇ（ｔ$_C$／ｔ$_0$）∝（Ｗ／ｋＴ）
【００９４】
本発明者らは、強誘電体キャパシタの二重井戸ポテンシャル及び残留分極が本明細書に開示される種々の実施形態による場合、保持損失は、室温以上の温度で少なくとも１０年後にデータ保持障害を引き起こさない可能性があることを発見した。
【００９５】
図５は、いかなる理論にも拘束されることなく、実施形態による、強誘電体キャパシタを含む半導体デバイスにおけるスイッチング及び不揮発性ストレージのエネルギーの考察を概略的に示している。本発明者らは、上述したように、データ保持損失に対するエネルギー障壁が、図４Ａ～４Ｃに関して上記の自由エネルギー曲線の二重井戸ポテンシャルに関連付けられ得る、例えば、比例することを発見した。理論に拘束されることなく、データ保持のエネルギー障壁Ｅ（Ｐ）は、ギンツブルグ－ランダウ理論で次のように表される秩序パラメータＰに関連付けることができる。
Ｆ（Ｐ，Ｔ）＝ｇ$_2$Ｐ^2／２＋ｇ$_4$Ｐ^4／４＋ｇ$_6$Ｐ^6／６－ＰＥ／２
式中、ｇ$_2$、ｇ$_4$、ｇ$_6$は係数、ＰＥはポテンシャルエネルギーである。Ｆ（Ｐ，Ｔ）の１次及び２次導関数の最小値により、相転移が定義される。有利には、実施形態による強誘電体キャパシタについての上記の二重井戸ポテンシャル障壁に基づいて、スイッチングエネルギーＥ$_{SWITCH}$とメモリデバイスの保持のためのエネルギー障壁との比（λ）は、１のオーダーであり得る。他のメモリ技術でも同じような比率があるが、一部のスピントルク伝達メモリ技術では、より高い比率、例えば２桁高い比率になり得る。
【００９６】
強誘電体キャパシタの極性層のドーパント設計
上述のように、種々の実施形態では、強誘電体酸化物層が比較的高い残留分極を有し、比較的低い強誘電体転移電圧を有する半導体デバイス、例えば、ＦｅＲＡＭデバイスの実施形態による強誘電体キャパシタを達成するために、強誘電体キャパシタは、比較的高い残留分極を有するベース極性材料をドープして、例えば、自由エネルギー曲線の二重井戸エネルギー障壁を低下させるように調整することによって形成される（例えば、図４Ｂ）。以下では、これら及び他の目的を達成するためのドーパントの設計について説明する。
【００９７】
上述のように、極性層は、Ａ$_{(m-x)}$Ａ’$_x$Ｂ$_{(n-y)}$Ｂ’$_y$Ｏ$_z$で表される化学式を有する強誘電体酸化物を含んでおり、ｍ、ｎ及びｚは整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方は、ゼロより大きい。Ａ及びＡ’は、結晶構造の交換可能な原子位置を占有する金属であり、Ｂ及びＢ’は、結晶構造の交換可能な原子位置を占有する金属である。Ａ’及びＢ’の一方又は両方は、ドーパントであり得る。上述のように、Ａ’イオンは、それが置換するＡイオンに対して異なる酸化状態を有し得、かつ／又はＢ’イオンは、それが置換するＢイオンに対して異なる酸化状態を有し得る。従って、これらの実施形態では、強誘電体酸化物は、化学式Ａ$_{(m-x)}$Ａ’$_x$Ｂ$_{(n-y)}$Ｂ’$_y$Ｏ$_z$を有するように１又は複数の

ドーパントＡ’及び／又はＢ’でドープされた、基本化学式mAB_nO_zによって表され得るベース極性材料を含む。以下では、結晶構造内の異なる原子サイトを占有するドーパントＡ’及びＢ’の設計並びにこれらの有利な効果について説明する。図６では、Ａ’に対応するドーパントが記載されており、図７では、Ｂ’に対応するドーパントが記載されている。

【００９８】

図６は、実施形態による、化学式ABO_3を有するベース極性材料のコーナー位置を占有する金属Ａの原子を置換し得るドーパントＡ’６００でドープされた極性層の概略ペロブスカイト結晶構造６００を示している。例示の目的で、ペロブスカイト構造を有する極性層のドーパント設計について説明する。ただし、本明細書に記載の本発明の概念は、六方晶結晶構造及び超格子構造を含む他の結晶構造を有する極性層に同様の方法で適用することができる。

【００９９】

上述のように、Ａ’ドーパントはペロブスカイト構造の単位格子のコーナー位置を占有する。Ａ’は、それが置換するＡ原子とは異なる酸化状態を有し得る。Ａ’ドーパント及びこれらの濃度は、これらに限定されないが、他のパラメータの中でも、スイッチング電圧及び／又は残留分極などのスイッチングパラメータを調整するように選択することができる。いかなる理論にも拘束されることなく、スイッチングパラメータは、例えば、上記のように自由エネルギー曲線の二重井戸ポテンシャルを調整することによって調整することができる（例えば、図４Ｂ）。図２Ｃに関して上記のような超格子構造を有する極性層では、図２Ｃに関して上述したように、分極に関連する原子運動のモード又は程度を変化させることによって、スイッチングパラメータを調整することができる。Ａ’ドーパントは、他の要因の中でも特に、Ａ原子とは異なる酸化状態を有しながら、Ａ原子を置換的に置換する能力に基づいて選択することができる。これは、他の要因の中でも特に、原子価及び原子半径、並びに結晶構造内のＡ原子に対するＡ’ドーパントの原子分極率（α）の違いに依存し得る。種々の実施形態では、Ａ’ドーパントのαは、スイッチング電圧を調整するためのＡ原子のαに対して、約２％、５％、１０％、２０％、５０％、１００％、２００％、５００％、１０００％、２０００％、又はこれらの値のいずれかによって定義される範囲内の割合であり得る。

【０１００】

種々の実施形態によれば、Ａ’は、４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属であり得る。例えば、Ａ’は、図４Ｃに示されている例示的な実装形態における４ｆ系のＬａ、又は４ｄ若しくは５ｄ系におけるＮｂなどのランタニド元素であり得る。

【０１０１】

実施形態によれば、Ａ’の量は、０．１～５原子％、５～１０原子％、１０～１５原子％、１５～２０原子％、２０～２５原子％又はこれらの値のいずれかによって定義される範囲内の原子％、例えば、０．１～２０原子％、であり得る。

【０１０２】

図７は、実施形態による、化学式ABO_3を有するベース極性材料の中心位置を占有する金属Ｂの原子を置換し得るドーパントＢ’でドープされた極性層の概略ペロブスカイト結晶構造を示す。上述のように、Ｂ’ドーパントはペロブスカイト構造の単位格子の中心位置を占有する。Ｂ’ドーパント及びこれらの濃度を選択して、他のパラメータの中でも特に、リーク電流などの電荷移動特性を調整することができる。Ｂ’ドーパントは、他の要因の中でも特に、原子とは異なる酸化状態を有しながら、Ｂ原子を置換的に置換する能力に基づいて選択することができる。これは、他の要因の中でも特に、原子価及び原子半径に依存し得る。本発明者らは、３ｄ系の遷移金属が、極性層の電界下での電荷移動を低減するのに特に有利であり得ることを発見した。

【０１０３】

実施形態によれば、Ｂ’は、比較的低い原子番号を有する遷移金属元素である。例えば、Ｂ’は、Ｍｎ、Ｓｃ、Ｔｉ、Ｖ、Ｃｒ、Ｃｏ、Ｎｉ、Ｃｕ、Ｚｎ又は他の４ｄ系金属から

なる群から選択される元素であり得る。
【０１０４】
実施形態によれば、Ｂ’の量は、０．１～５原子％、５～１０原子％、１０～１５原子％、１５～２０原子％、２０～２５原子％又はこれらの値のいずれかによって定義される範囲内の原子％、例えば、０．１～２０原子％、であり得る。
【０１０５】
拡散障壁
上述のように、本明細書に記載の強誘電体キャパシタの種々の層は、特定の濃度の種々の化学元素を含み、これは、低電圧動作及び高残留分極などのデバイス特性にとって重要であり得る。製造時の使用及び製造後の使用を通じてデバイスの特性を維持するには、強誘電体キャパシタの層の化学組成及び界面を種々の処理工程で維持する必要がある。更に、強誘電体キャパシタの一部の要素は、集積回路の他の回路に悪影響を与え得る。特に、一部の実施形態による強誘電体キャパシタは、トランジスタなどのＣＭＯＳデバイスがラインのフロントエンド（ＦＥＯＬ）に形成された後に、ラインのバックエンド（ＢＥＯＬ）の一部として形成される。その結果、強誘電体キャパシタからＣＭＯＳ回路に関連する周囲の特徴部への化学元素の拡散が生じ、種々の障害を引き起こす場合がある。逆に、強誘電体キャパシタからＣＭＯＳ回路に関連する周囲の特徴部に化学元素の拡散が生じる場合がある。例えば、電極の一体化に関して上述したように、製造のためのその後のプロセス、例えば、酸化物を含む極性層を形成するためのプロセスは、比較的高温（例えば、５００℃～８００℃）の酸化環境下であり得る。従って、強誘電体キャパシタ領域からＣＭＯＳ回路に関連する特徴部への酸素の拡散を抑制するために拡散障壁層が必要となる場合がある。例えば、強誘電体キャパシタは、トランジスタに電気的に接続するコンタクトビア又はプラグ、例えば、トランジスタのドレイン上に形成することができる。コンタクトビア又はプラグは、例えば、多結晶Ｓｉ、Ｗ又はWSi_xで形成することができる。結果として、酸素障壁は、接触ビアの酸化及び／又は下部電極と接触ビアとの間の反応を抑制することによって、トランジスタと強誘電体キャパシタの下部電極との間の電気的接触を維持するのに役立ち得る。更に、障壁自体と、接触ビア及び下部電極との間の反応を抑制する必要がある。これら及び他のニーズに応えるために、実施形態による強誘電体キャパシタは、垂直拡散障壁を含み得る。
【０１０６】
図８Ａ、８Ｂ及び８Ｃは、種々の実施形態による、キャパシタ積層体８００Ａ、８００Ｂ、及び８００Ｃの側面図をそれぞれ概略的に示しており、各々が、第１及び第２の導電性酸化物電極層８０８、８１２の間に挿入された記憶層８０４を含む。記憶層８０４、上部又は第１の導電性酸化物電極層８０８、及び下部又は第２の導電性酸化物電極層８１２は、上記に開示された種々の実施形態に従って構成することができ、その詳細な説明は簡潔にするために省略する。記憶層８０４は、上記のような酸化環境及び／又は比較的高温下で堆積される酸化物層を有する極性層を有する。
【０１０７】
キャパシタ積層体８００Ｂを参照すると、一部の実施形態では、第１及び第２の導電性酸化物電極層８０８、８１２の一方又は両方に隣接して、記憶層８０４の反対側において、それぞれ上部及び下部障壁層８１６、８２０が形成されている。種々の実施形態では、上部及び下部障壁層８１６、８２０の一方又は両方は、金属又は金属間化合物、例えば、耐熱金属又は耐熱金属間化合物などの導電性障壁層材料を含み、これは、高い導電性を提供しながら拡散を抑制することができる。
【０１０８】
一部の実施形態では、上部及び下部障壁層８１６、８２０は、Ｔｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ｔｉ合金、Ｎｉ－Ｇａ合金、Ｎｉ－Ｍｎ－Ｇａ合金、Ｆｅ－Ｇａ合金、金属ホウ酸塩、金属炭化物、金属窒化物、Ｔａ金属、Ｗ金属及びＣｏ金属のうちの１又は複数を含む。
【０１０９】

一部の実施形態では、上部及び下部障壁層８１６、８２０は、Ti_3Al、TiAl、$TiAl_3$、Ni_3Al、$NiAl_3$　NiAl、Ni_2MnGa、FeGa及びFe_3Gaなどの金属間化合物を含む。一部の実施形態では、上部及び下部障壁層８１６、８２０は、IrO_xを含み、ここで、ｘ＝０～２である。有利なことに、上述のように、IrO_xはまた、低い電気抵抗を有する付加的な電極としての機能を果たし得る。従って、これらの実施形態では、強誘電体キャパシタ積層体上の層の数を減らすことができる。

【０１１０】

上述のように、製造時の使用及び製造後の使用を通じてデバイス特性を維持するために、実施形態によれば、強誘電体キャパシタへの原子の拡散、及び強誘電体キャパシタからの原子の拡散は、上部及び下部障壁層８１６、８２０を使用して抑制される。垂直方向の拡散を抑制することに加えて、同様の一体化方式では、強誘電体キャパシタとの間の原子の水平方向の拡散も抑制する必要があり得る。例えば、実施形態による水平拡散障壁は、例えば、水素拡散を抑制するのに役立ち得る。水素は、最終成形ガス（Ｈ２／Ｎ２）のアニーリング中に表面と界面を不動態化するために多くの半導体バックエンドプロセスで使用されている。ただし、水素は、一部の強誘電体キャパシタの強誘電特性を著しく損傷又は破壊する可能性がある。従って、後続の熱工程中に強誘電体キャパシタの１又は複数の層の水素への曝露を抑制するための効果的な側壁障壁層が必要である。

【０１１１】

キャパシタ積層体８００Ｃを参照すると、一部の実施形態において、キャパシタ積層体８００Ａ又は８００Ｂには、その上に、記憶層１０４、第１の酸化物電極層８０８、第２の導電性酸化物電極層８１２、上部障壁層８１６、及び下部障壁層８２０のうちの１又は複数の一方又は両方の側面上に、障壁シーラント層８２４が形成され得る。上部及び下部障壁層８１６、８２０とは異なり、障壁シーラント層（複数可）８２４は、電気的に絶縁性であり、第１及び第２の酸化物電極層８０８、８１２にわたる電気的短絡を防止する。一部の実施形態では、障壁シーラント層（複数可）８２４は、金属酸化物、例えば、Ｍｇ含有酸化物又はＡｌ含有酸化物を含む。金属酸化物は、例えば、ＭｇＯ、ＴｉＡｌＯ及びＬａＡｌＯのうちの１又は複数を含み得る。一部の実施形態では、障壁シーラント層（複数可）８２４は、コンフォーマルに堆積された層であり、かつ／又は堆積後の等方性エッチングによってスペーサ構造として形成される。

【０１１２】

代替の障壁シーラント層８２４も可能である。例えば、一部の実施形態では、障壁層８２４の一方又は両方は、酸化、フッ素化及び／又は塩素化によって形成される第１及び第２の導電性酸化物電極層８０８、８１２及び記憶層８０４のうちの１又は複数の側壁を含む。

【０１１３】

代替の極性層及び構成

上記において、記憶層の種々の組成について説明した。代替の構成も可能である。

【０１１４】

常誘電体材料と称される一部の材料は、上記の強誘電体材料と同様に、印加電界の関数として非線形分極を示す。ただし、強誘電体材料とは異なり、常誘電体材料は、電界が除去されても残留分極を示さない。一部の実施形態では、強誘電体酸化物層の代わりに、又はそれに加えて、常誘電体酸化物層がキャパシタ積層体に含まれる。得られたキャパシタは、例えば、揮発性メモリ用途に使用することができる。

【０１１５】

これらの実施形態では、キャパシタ８００Ａ、８００Ｂ及び８００Ｃ（図８Ａ～８Ｃ）と同様に配置されたキャパシタは、ドーパントで置換的にドープされたベース強誘電体材料を含む結晶性極性層を有する。ベース強誘電体材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含む。ドーパントは、１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、ドーパントは、ベース強誘電体材料の残留分極が最初に約５μＣ／cm^2を超えてほぼゼロになるような濃度で存在する。一部の実施形態では、キャパシタは、記憶

層８０４、第１の導電性酸化物電極層８０８及び第２の導電性酸化物電極層８１２のうちの１又は複数が不均一な組成、例えば、厚さ内の任意の点から垂直方向の一方又は他方で増加又は減少する段階的な組成を有することを除いて、キャパシタ８００Ａ、８００Ｂ、及び８００Ｃ（図８Ａ～８Ｃ）と同様に配置される。

【０１１６】

強誘電体キャパシタを含むメモリセル

図９は、実施形態による、上記の種々のキャパシタ構成で実装され得る例示的なＦｅＲＡＭセル９００の断面図を示している。ＦｅＲＡＭセル９００は、ソース９３２とドレイン９３４との間のチャネル領域上に形成されたゲート誘電体９３６及びゲート電極９３８を含むアクセストランジスタ又は選択金属酸化物半導体（ＭＯＳ）トランジスタを含む。電源又は感知回路（図示せず）は、ソース９３２及び／又はドレイン９３４に電気的に接続され得、ゲート電極９３８によってゲートされ得る。トランジスタは、第１のレベルの誘電体層９４０、例えば、SiO_2で覆われている。ドレインコンタクト９４２、例えば、シリコンプラグを形成して、ドレイン９３４に接触させて、トランジスタを強誘電体キャパシタに電気的に接続することができる。

【０１１７】

強誘電体キャパシタは、ドレインコンタクト９４２上に形成され得る。キャパシタは、種々の実施形態によれば、第１の／上部電極（積層体）８０８Ａ／８０８Ｂと第２の／下部電極（積層体）８１２Ａ／８１２Ｂとの間に挿入された記憶層８０４を含む。上述のように、第１の／上部電極層８０８Ａ／８０８Ｂ及び第２の／下部電極８１２Ａ／８１２Ｂの一方又は両方は、複数の層を有し得る。例えば、第１の電極８０８Ａ／８０８Ｂは、記憶層８０４の結晶構造と整合する結晶構造を有し得る第１の導電性酸化物８０８Ａと、二元導電性金属酸化物を含む付加的な電極８０８Ｂとを含み得る。同様に、第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂは、記憶層８０４の結晶構造と整合する結晶構造を有し得る第２の導電性酸化物８１２Ａと、二元導電性金属酸化物を含む付加的な電極８１２Ｂとを含み得る。強誘電体キャパシタの第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂは、ドレインコンタクト９４２を介してトランジスタのドレイン９３４に電気的に接続されている。

【０１１８】

更に図９を参照すると、図８Ｂに関して上記で説明したように、下部障壁層８２０は、第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂの間に形成されて、拡散障壁として機能し、その上のキャパシタの任意の層との間を通る望ましくない拡散を抑制することができる。これには、例えば、記憶層８０４の堆積中及び／又はポストアニーリング中のドレインコンタクト９４２への酸素拡散が含まれる。同様に、図示されていないが、上部障壁層は、そこを通る拡散を抑制するために、第１の電極８０８Ａ／８０８Ｂ上に形成され得る。拡散障壁層は、例えば、図８Ｂに関して、上記の組成及び構成のいずれかを有し得る。

【０１１９】

更に図９を参照すると、強誘電体キャパシタには、横方向の拡散を抑制するために、１又は複数の障壁シーラント層がその上に更に形成され得る。例えば、図９には、犠牲障壁層の残りの部分８１２も示されている。犠牲障壁は、記憶層８０４を堆積する前に、堆積中又は堆積後のアニール中に、記憶層８０４への、かつ記憶層８０４からの原子の拡散を抑制するために、ブランケット層として形成され得る。続いて、犠牲障壁層を除去して、下にある第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂを露出させ、第１のレベルの誘電体層９４０を露出させ、これにより、図示の犠牲層の残りの部分８１２が得られる。残りの部分８１２は、第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂへの、第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂからの、かつ／又は第２の電極８１２Ａ／８１２Ｂを通る横方向の拡散を抑制するための恒久的な障壁シーラント層として機能する。更に、図示されていないが、強誘電体キャパシタの一方又は両方の側壁表面に更に障壁シーラント層を形成して、記憶層８０４及び／又は第１の電極８０８Ａの側面（複数可）を覆うことができる。障壁シーラント層の各々は、例えば、図８Ｃに関して、上記の組成及び構成のいずれかを有し得る。

【０１２０】

図示されていないが、複数のトランジスタ及びキャパシタは、メモリアレイを形成するように構成され得る。トランジスタゲート９３８、ソース９３２、及びキャパシタの上部電極８０８Ａ／８０８Ｂの各々は、強誘電性メモリセルの書き込み、不揮発性記憶、及び読み出しを可能にするために、メタライゼーションレベル（図示せず）によって個別に接触され、個別に制御され得る。

【０１２１】

動作中、ＦｅＲＡＭセル９００への書き込みは、セルキャパシタの記憶層８０４全体にわたって電界を印加することによって達成され得、これにより、例えば、図１Ｂ及び１Ｃに関して上記のような強誘電体転移が誘導される。例えば、記憶層８０４がペロブスカイト酸化物を含む場合、電界は、一部の金属原子を（電荷の極性に応じて）「上」又は「下」配向に誘導し、それによって論理「１」又は「０」を記憶し得る。一部の実施形態では、読み出し動作は、アクセストランジスタを使用して、セルキャパシタを特定の状態、例えば「０」状態に保持することによって達成され得る。セルキャパシタが既に「０」状態を保持している場合、出力線に比較的低い電流又は検出不可能な電流が流れ得る。一方、セルが「１」状態を保持している場合、金属原子が再配向され得、これは、「下」側の金属から電子を押し出すときに、出力に電流のパルスを伴い得る。このパルスの存在は、セルが「１」を保持していることを示し得る。このプロセスはセルを上書きするため、ＦｅＲＡＭセル１２００の読み出しは破壊的なプロセスであり得、セルが変更された場合は、セルは再書き込みされ得る。

【０１２２】

図１０は、実施形態によるＦｅＲＡＭセル１０００を含む半導体デバイスの斜視図を示している。ＦｅＲＡＭセル１０００は、ＦｅＲＡＭセル９００（図９）に類似しており、ラインのバックエンド（インターコネクト／メタライゼーションレベル）に統合された強誘電体キャパシタ８００を含むが、ラインのフロントエンドにあるトランジスタは、サブ１００ｎｍノードなどの高度なテクノロジーノード用のフィン電界効果トランジスタ（ＦｉｎＦＥＴ）として実装されている。ＦｉｎＦＥＴトランジスタは、ソース９３２とドレイン９３４との間に水平に延在するフィン形状のチャネルと、フィン形状のチャネルの上面及び側面を包むゲート９３８の電極と、を含む。ゲート９３８は、ワード線に電気的に接続することができ、ドレイン９３４は、強誘電体キャパシタ８００を介してビット線に電気的に接続することができる。

【０１２３】

ＦｅＲＡＭセル９００（図９）及び１０００（図１０）は、統合プロセッサ（ＣＰＵ）に電気的に接続され得、ＳＲＡＭ及び／又はＤＲＡＭセルに加えて、又は少なくとも部分的にそれの代わりに統合され、図示の例示的なコンピューティングアーキテクチャにおいて、Ｌ２及び／又はＬ３キャッシュメモリを形成し得る。

【０１２４】

付加的な実施形態

１．キャパシタを含む半導体デバイスであって、

前記キャパシタは、

ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する、極性層と、

前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極と、

前記極性層の両側にある前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極上にそれぞれ配設された第１及び第２の障壁金属層と、

を含む、ことを特徴とする半導体デバイス。

２．前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増

加させることにより、前記強誘電性スイッチング電圧が減少する、実施形態１に記載の半導体デバイス。
３．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態２に記載の半導体デバイス。
４．前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なっている、実施形態１に記載の半導体デバイス。
５．前記極性層が、ペロブスカイト結晶構造を有し、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’$_x$Ｂ（ｎ－ｙ）Ｂ’$_y$Ｏ$_z$で表される化学式を有する強誘電体酸化物を含み、Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方がドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方がゼロより大きい、実施形態２に記載の半導体デバイス。
６．前記極性層が、ＢａＴｉＯ$_3$、ＰｂＴｉＯ$_3$、ＫＮｂＯ$_3$、ＮａＴａＯ$_3$、ＢｉＦｅＯ$_3$及びＰｂＺｒＴｉＯ$_3$からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態２に記載の半導体デバイス。
７．前記極性層が、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ$_3$、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ$_3$－ＰｂＴｉＯ$_3$、ＰｂＬａＺｒＴｉＯ$_3$、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）Ｏ$_3$、ＢａＴｉＯ$_3$－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））Ｏ$_3$、ＢａＴｉＯ$_3$－ＢａＳｒＴｉＯ$_3$、Ｂｉ$_{1-x}$Ｌａ$_x$ＦｅＯ$_3$、Ｂｉ$_{1-x}$Ｃｅ$_x$ＦｅＯ$_3$及びＢｉＦｅ$_{1-y}$Ｃｏ$_y$Ｏ$_3$からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態２に記載の半導体デバイス。
８．前記極性層が、ＬｉＮｂＯ$_3$、ＬｉＴａＯ$_3$、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯからなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態２に記載の半導体デバイス。
９．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態２に記載の半導体デバイス。
１０．前記ベース強誘電体材料が、六方晶結晶構造を有し、前記ベース強誘電体材料が、ＬｕＦｅＯ$_3$を含むか、又はＲＭｎＯ$_3$で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、実施形態２に記載の半導体デバイス。
１１．前記ベース強誘電体材料が、第１の層と、前記第１の層とは異なる第２の層と、を交互に含む超格子を含み、前記第１の層が、ＡＢＯ$_3$で表される化学式を有し、前記第２の層が、ＣＤＯ$_3$で表される化学式を有し、Ａ及びＢが、異なる金属元素であり、Ｃ及びＤが、異なる金属元素であり、Ｃ及びＤの各々が、Ａ及びＢの一方又は両方と異なる、実施形態２に記載の半導体デバイス。
１２．前記第１の層が、ＳｒＴｉＯ$_3$を含み、前記第２の層が、ＰｂＴｉＯ$_3$及びＬａＡｌＯ$_3$の一方又は両方を含む、実施形態１１に記載の半導体デバイス。
１３．前記極性層が強誘電性であり、約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有する、実施形態２に記載の半導体デバイス。
１４．前記極性層が約５０ｎｍ未満の厚さを有する、実施形態１に記載の半導体デバイス。
１５．前記ドーパントは、前記極性層が常誘電性であり、実質的にゼロの残留分極を有するような濃度で存在する、実施形態２に記載の半導体デバイス。
１６．前記ベース極性材料が、Ｈｆ、Ｚｒ、Ａｌ、Ｓｉ又はＧａのうちの１又は複数を含む誘電体材料を含み、前記ドーパントは、前記極性層が約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有するように強誘電性を増加させる、実施形態１に記載の半導体デバイス。
１７．前記第１及び第２の金属層の一方又は両方が、拡散障壁として機能する耐熱金属を含む、実施形態１に記載の半導体デバイス。
１８．トランジスタを更に含み、前記キャパシタが、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、実施形態１に記載の半導体デバイス。
１９．前記極性層は、前記半導体デバイスが不揮発性メモリデバイスであるように、少なくとも１日間持続する前記残留分極を有する、実施形態１８に記載の半導体デバイス。

２０．キャパシタを含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタは、
ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントが、前記１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、前記ドーパントは、前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース性極性材料の残留分極と異なるような濃度で存在する、極性層と、
前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極と、
前記極性層の両側にある前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極上にそれぞれ配設された第１及び第２の障壁金属層と、
を含む、ことを特徴とする半導体デバイス。
２１．前記極性層の前記残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なっている、実施形態２０に記載の半導体デバイス。
２２．前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、実施形態２０に記載の半導体デバイス。
２３．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態２２に記載の半導体デバイス。
２４．前記極性層が、ペロブスカイト構造又は六方晶結晶構造のうちの１つを有する、実施形態２０に記載の半導体デバイス。
２５．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態２４に記載の半導体デバイス。
２６．前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する、実施形態２０に記載の半導体デバイス。
２７．キャパシタを含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタは、
ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する、極性層と、
前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極と、
前記極性層の両側にある前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極上にそれぞれ配設された第１及び第２の障壁金属層と、
を含む、ことを特徴とする半導体デバイス。
２８．前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体材料の前記残留分極が減少する、実施形態２７に記載の半導体デバイス。
２９．前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、実施形態２７に記載の半導体デバイス。
３０．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態２９に記載の半導体デバイス。
３１．ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有するキャパシタであって、
前記ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方を含み、
前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、これにより、前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシ

タの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なる、ことを特徴とするキャパシタ。
３２．前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより前記強誘電性スイッチング電圧が減少する、実施形態３１に記載のキャパシタ。
３３．前記強誘電性スイッチング電圧が約１２００ｍＶより低い、実施形態３２に記載のキャパシタ。
３４．前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体材料の前記残留分極が減少する、実施形態３１に記載のキャパシタ。
３５．前記極性層が、ペロブスカイト結晶構造を有し、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’ｘＢ（ｎ－ｙ）Ｂ’ｙＯｚで表される化学式を有する強誘電体酸化物を含み、Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方が、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態３２に記載のキャパシタ。
３６．前記極性層が、ＢａＴｉＯ３、ＰｂＴｉＯ３、ＫＮｂＯ３、ＮａＴａＯ３、ＢｉＦｅＯ３及びＰｂＺｒＴｉＯ３からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態３２に記載のキャパシタ。
３７．前記極性層が、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３－ＰｂＴｉＯ３、ＰｂＬａＺｒＴｉＯ３、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－ＢａＳｒＴｉＯ３、Ｂｉ１－ｘＬａｘＦｅＯ３、Ｂｉ１－ｘＣｅｘＦｅＯ３及びＢｉＦｅ１－ｙＣｏｙＯ３からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態３２に記載のキャパシタ。
３８．前記極性層が、ＬｉＮｂＯ３、ＬｉＴａＯ３、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯからなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態３２に記載のキャパシタ。
３９．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態３８に記載のキャパシタ。
４０．前記ベース強誘電体材料が、六方晶結晶構造を有し、前記ベース強誘電体材料が、ＬｕＦｅＯ３を含むか、又はＲＭｎＯ３で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、実施形態３２に記載のキャパシタ。
４１．前記ベース強誘電体材料が、第１の層と、前記第１の層とは異なる第２の層と、を交互に含む超格子を含み、前記第１の層が、ＡＢＯ３で表される化学式を有し、前記第２の層が、ＣＤＯ３で表される化学式を有し、Ａ及びＢが、異なる金属元素であり、Ｃ及びＤが、異なる金属元素であり、Ｃ及びＤの各々が、Ａ及びＢの一方又は両方と異なる、実施形態３２に記載のキャパシタ。
４２．前記第１の層が、ＳｒＴｉＯ３を含み、前記第２の層が、ＰｂＴｉＯ３及びＬａＡｌＯ３の一方又は両方を含む、実施形態４１に記載のキャパシタ。
４３．前記ドーパントは、前記極性層が常誘電性であり、実質的にゼロの残留分極を有するような濃度で存在する、実施形態３２に記載のキャパシタ。
４４．前記ベース極性材料が、誘電体材料を含み、前記ドーパントは、前記極性層が約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有するように前記誘電体材料の強誘電性を増加させる、実施形態３１に記載のキャパシタ。
４５．前記誘電体材料が、Ｈｆ、Ｚｒ、Ａｌ、Ｓｉの酸化物又はこれらの混合物のうちの１又は複数を含む、実施形態４４に記載のキャパシタ。
４６．前記誘電体材料が、Ｈｆ１－ｘＥｘＯｙで表される化学式を有し、ｘ及びｙの各々が、ゼロより大きく、Ｅが、Ａｌ、Ｃａ、Ｃｅ、Ｄｙ、Ｅｒ、Ｇｄ、Ｇｅ、Ｌａ、Ｓｃ、Ｓｉ、Ｓｒ、Ｓｎ、又はＹからなる群から選択される、実施形態４４に記載のキャパシタ。
４７．前記誘電体材料が、Ａｌ１－ｘＲｘＮ、Ｇａ１－ｘＲｘＮ、又はＡｌ１－ｘ－ｙＭ

ｇｘＮｂｙＮで表される化学式を有し、ｘ及びｙの各々が、ゼロより大きく、Ｒが、Ａｌ、Ｃａ、Ｃｅ、Ｄｙ、Ｅｒ、Ｇｄ、Ｇｅ、Ｌａ、Ｓｃ、Ｓｉ、Ｓｒ、Ｓｎ又はＹからなる群から選択される、実施形態４４に記載のキャパシタ。

４８．前記ベース極性材料が、ベース常誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース常誘電体材料の前記残留分極が増加する、実施形態３１に記載のキャパシタ。

４９．前記ドーパントの前記濃度が、前記極性層の層法線方向に傾斜している、実施形態３１に記載のキャパシタ。

５０．ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有するキャパシタであって、

前記ベース極性材料は、化学式ＡＢＯ３を有するベース金属酸化物を含み、Ａ及びＢの各々が、前記ベース極性材料の結晶構造の交換可能な原子位置を占有する１又は複数の金属元素を表し、

前記ドーパントは、前記ベース極性材料の前記１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、

前記キャパシタは、前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極を含み、

前記結晶性極性層が、ペロブスカイト構造、六方晶結晶構造、又は超格子構造のうちの１つを有する、ことを特徴とするキャパシタ。

５１．前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体材料の前記残留分極が減少する、実施形態５０に記載のキャパシタ。

５２．前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なっている、実施形態５０に記載のキャパシタ。

５３．前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、実施形態５０に記載のキャパシタ。

５４．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態５３に記載のキャパシタ。

５５．前記ベース金属酸化物が、ベース強誘電体金属酸化物を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体金属酸化物の前記残留分極が減少する、実施形態５０に記載のキャパシタ。

５６．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態５５に記載のキャパシタ。

５７．前記ドーパントが、０パーセントより大きく２５パーセント未満の濃度で存在し、前記極性層が、約１２００ｍＶより低い電圧で強誘電体転移を受ける、実施形態５６に記載のキャパシタ。

５８．前記極性層が、単結晶層である、実施形態５０に記載のキャパシタ。

５９．前記極性層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極の一方又は両方と形成された一方又は両方の界面において、前記ペロブスカイト構造の体心位置を占有する金属で終端する、実施形態５１に記載のキャパシタ。

６０．前記極性層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極の一方又は両方と形成された一方又は両方の界面において、前記ペロブスカイト構造のコーナー位置を占有する金属で終端する、実施形態５１に記載のキャパシタ。

６１．ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有するキャパシタであって、

前記ベース極性材料は、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方を含み、

前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、前記ドーパントは、前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような

濃度で存在する、ことを特徴とするキャパシタ。
６２．前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、実施形態６１に記載のキャパシタ。
６３．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態６１に記載のキャパシタ。
６４．前記ベース金属酸化物が、ベース強誘電体金属酸化物を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体金属酸化物の前記残留分極が減少する、実施形態６１に記載のキャパシタ。
６５．前記結晶性極性層が、ペロブスカイト構造、六方晶結晶構造、又は超格子構造のうちの１つを有する、実施形態６１に記載のキャパシタ。
６６．キャパシタを含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタは、
ドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する、極性層と、
前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極であって、前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極と、
を含み、
前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極が、その上に前記極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、前記極性層の少なくとも一部が、前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極上にシュードモルフィックに形成される、ことを特徴とする半導体デバイス。
６７．前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、実施形態６６に記載の半導体デバイス。
６８．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態６７に記載の半導体デバイス。
６９．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、約１ｎｍ～５ｎｍの厚さを有する、実施形態６６に記載の半導体デバイス。
７０．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、０．０１オーム－ｃｍ未満の電気抵抗率を有する、実施形態６７に記載の半導体デバイス。
７１．前記極性層と、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方とが、同じ結晶構造を有する、実施形態６６に記載の半導体デバイス。
７２．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態７１に記載の半導体デバイス。
７３．前記極性層は、約１０ｎｍ～５００ｎｍの横方向寸法を有する領域を含み、当該領域において、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方はシュードモルフィックである、実施形態７２に記載の半導体デバイス。
７４．前記同じ結晶構造が、ペロブスカイト構造であり、前記極性層が、$BaTiO_3$、$PbTiO_3$、$KNbO_3$、$NaTaO_3$、$BiFeO_3$　$PbZrTiO_3$、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）O_3、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）O_3－$PbTiO_3$、$PbLaZrTiO_3$、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）O_3、$BaTiO_3$－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））O_3、$BaTiO_3$－$BaSrTiO_3$、$LiNbO_3$、$LiTaO_3$、$LiFeTaOF$、$SrBaNbO$、$BaNaNbO$、$KNaSrBaNbO$、$Bi_{1-x}La_xFeO_3$、$Bi_{1-x}Ce_x$

ＦｅＯ３及びＢｉＦｅ１－ｙＣｏｙＯ３からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態７１に記載の半導体デバイス。
７５．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ２Ｃｕ３Ｏ７、Ｂｉ２Ｓｒ２ＣａＣｕ２Ｏ８、ＬａＮｉＯ３、ＳｒＲｕＯ３、ＬａＭｎＯ３、ＳｒＭｎＯ３、ＬａＣｏＯ３又はＳｒＣｏＯ３からなる群から選択される酸化物を含む、実施形態７４に記載の半導体デバイス。
７６．前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方に直接接触し、前記半導体デバイスが、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の上に形成された付加的な電極を更に含み、当該付加的な電極は、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物又はレニウム（Ｒｅ）酸化物からなる群から選択される導電性二元金属酸化物を含む、実施形態７５に記載の半導体デバイス。
７７．前記同じ結晶構造が、六方晶結晶構造であり、前記極性層が、ＬｕＦｅＯ３を含むか、又はＲＭｎＯ３で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、実施形態７１に記載の半導体デバイス。
７８．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、六方晶構造、デラフォサイト構造、スピネル構造又は立方晶構造のうちの１つを有する、実施形態６６に記載の半導体デバイス。
７９．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、ＰｔＣｏＯ２、ＰｄＣｏＯ２、ＡｌドープＺｎＯ、Ｆｅ３Ｏ４、ＬｉＶ２Ｏ４、又はＳｎドープＩｎ２Ｏ３のうちの１又は複数を含む、実施形態７８に記載の半導体デバイス。
８０．トランジスタを更に含み、前記キャパシタが、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、実施形態６６に記載の半導体デバイス。
８１．キャパシタ積層体を含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタ積層体は、ドーパントで置換的にドープされたベース極性材料を含む結晶性極性層を有し、
前記ベース極性材料は、ペロブスカイト構造又は六方晶結晶構造のうちの１つを有する金属酸化物を含み、
前記ドーパントは、前記金属酸化物の金属とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属を含み、
前記キャパシタ積層体は、前記結晶性極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極を含み、
前記結晶性極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方と同じ結晶構造を有する、ことを特徴とする半導体デバイス。
８２．前記結晶性極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する、実施形態８１に記載の半導体デバイス。
８３．前記同じ結晶構造が、ペロブスカイト結晶構造であり、前記極性層が、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’ｘＢ（ｎ－ｙ）Ｂ’ｙＯｚで表される化学式を有する強誘電体酸化物を含み、Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方が、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態８２に記載の半導体デバイス。
８４．前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極の一方又は両方が、Ｃ（ｐ－ｕ）Ｃ’ｕＤ（ｑ－ｖ）Ｄ’ｖＯｗで表される化学式を有する酸化物を含み、Ｃ及びＣ’が、前記ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、Ｄ及びＤ’が、前記ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、ｐ、ｑ、及びｗが、整数であり、ｕ及びｖの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態８３に記載の半導体デバイス。
８５．前記極性層が、ＢａＴｉＯ３、ＰｂＴｉＯ３、ＫＮｂＯ３、ＮａＴａＯ３、ＢｉＦ

ｅＯ３　ＰｂＺｒＴｉＯ３、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ３－ＰｂＴｉＯ３、ＰｂＬａＺｒＴｉＯ３、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））Ｏ３、ＢａＴｉＯ３－ＢａＳｒＴｉＯ３、ＬｉＮｂＯ３、ＬｉＴａＯ３、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯ、Ｂｉ$_{1-x}$Ｌａ$_x$ＦｅＯ３、Ｂｉ$_{1-x}$Ｃｅ$_x$ＦｅＯ３及びＢｉＦｅ$_{1-y}$Ｃｏ$_y$Ｏ３からなる群から選択されるペロブスカイト構造を有する強誘電体酸化物を含む、実施形態８４に記載の半導体デバイス。

８６．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ$_2$Ｃｕ$_3$Ｏ$_7$、Ｂｉ$_2$Ｓｒ$_2$ＣａＣｕ$_2$Ｏ$_8$、ＬａＮｉＯ３、ＳｒＲｕＯ３、ＬａＭｎＯ３、ＳｒＭｎＯ３、ＬａＣｏＯ３又はＳｒＣｏＯ３からなる群から選択される酸化物を含む、実施形態８５に記載の半導体デバイス。

８７．前記極性層が、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方に直接接触し、前記半導体デバイスが、第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の上に形成された付加的な電極を更に含み、当該付加的な電極は、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物又はレニウム（Ｒｅ）酸化物からなる群から選択される導電性二元金属酸化物を含む、実施形態８６に記載の半導体デバイス。

８８．前記同じ結晶構造が、六方晶結晶構造であり、前記極性層が、ＬｕＦｅＯ３を含むか、又はＲＭｎＯ３で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、実施形態８２に記載の半導体デバイス。

８９．トランジスタを更に含み、前記キャパシタが、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、実施形態８２に記載の半導体デバイス。

９０．前記極性層は、前記半導体デバイスが不揮発性メモリデバイスであるように、少なくとも１日間持続する前記残留分極を有する、実施形態８９に記載の半導体デバイス。

９１．キャパシタを含む半導体デバイスであって、

前記キャパシタは、

ドーパントがドープされた結晶性ベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記極性層の残留分極が、前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と約５μＣ／ｃｍ^{2}超異なるような濃度で存在する、極性層と、

前記極性層の両側にある第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性体酸化物電極と、

を含み、

前記極性層は、前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有し、

前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極が、その上に前記極性層を成長させるためのテンプレートとして機能し、これにより、前記極性層の少なくとも一部が、前記第１の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極上にコヒーレントに歪んでいる、ことを特徴とする半導体デバイス。

９２．前記ベース極性材料が、ベース強誘電体材料を含み、前記ドーパントの前記濃度を増加させることにより、前記ベース強誘電体材料の前記残留分極が減少する、実施形態９１に記載の半導体デバイス。

９３．前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なっている、実施形態９１に記載の半導体デバイス。

９４．前記強誘電性スイッチング電圧が、約１２００ｍＶより低い、実施形態９３に記載の半導体デバイス。

９５．前記第１及び第２の結晶性導電性又は半導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ$_2$Ｃｕ$_3$Ｏ$_7$、Ｂ

ｉ$_2$Ｓｒ$_2$ＣａＣｕ$_2$Ｏ$_8$、ＬａＮｉＯ$_3$、ＳｒＲｕＯ$_3$、ＬａＭｎＯ$_3$、ＳｒＭｎＯ$_3$、ＬａＣｏＯ$_3$又はＳｒＣｏＯ$_3$からなる群から選択される酸化物を含む、実施形態９１に記載の半導体デバイス。

９６．シリコン基板上に形成されたトランジスタと、
導電性ビアによって前記トランジスタに電気的に接続されたキャパシタと、
を含む半導体デバイスであって、
前記キャパシタは、
極性層の両側にある上部及び下部導電性酸化物電極であって、前記下部導電性酸化物電極が、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、上部及び下部導電性酸化物電極と、
ドーパントがドープされたベース極性材料を含む極性層であって、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記１又は複数の金属元素とは異なる金属元素を含み、前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧が、前記ドーパントでドープされていない前記ベース極性材料を含む前記キャパシタの強誘電性スイッチング電圧と約１００ｍＶ超異なるような濃度で存在する、極性層と、
前記下部導電性酸化物電極と前記導電性ビアとの間に耐熱金属又は金属間化合物を含む下部障壁層と、
を含む、ことを特徴とする半導体デバイス。

９７．前記極性層が、３００℃超の温度の酸化環境で形成された金属酸化物を含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

９８．前記上部導電性酸化物電極上に耐熱金属又は金属間化合物を含む上部障壁層を更に含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

９９．前記上部及び下部障壁層の一方又は両方が、Ｔｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ｔｉ合金、Ｎｉ－Ｇａ合金、Ｎｉ－Ｍｎ－Ｇａ合金、Ｆｅ－Ｇａ合金、金属ホウ酸塩、金属炭化物、金属窒化物、Ｔａ金属、Ｗ金属及びＣｏ金属のうちの１又は複数を含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１００．前記上部及び下部障壁層の一方又は両方が、Ｔｉ$_3$Ａｌ、ＴｉＡｌ、ＴｉＡｌ$_3$、Ｎｉ$_3$Ａｌ、ＮｉＡｌ$_3$　ＮｉＡｌ、Ｎｉ$_2$ＭｎＧａ、ＦｅＧａ及びＦｅ$_3$Ｇａのうちの１又は複数を含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０１．前記誘電体層、前記上部酸化物電極層、及び前記下部導電性酸化物電極層のうちの１又は複数の一方又は両方の側面に形成された障壁シーラント層を更に含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０２．前記障壁シーラント層が、Ａｌ又はＭｇを含む金属酸化物を含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０３．前記極性層が、ＢａＴｉＯ$_3$、ＰｂＴｉＯ$_3$、ＫＮｂＯ$_3$、ＮａＴａＯ$_3$、ＢｉＦｅＯ$_3$　ＰｂＺｒＴｉＯ$_3$、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ$_3$、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）Ｏ$_3$－ＰｂＴｉＯ$_3$、ＰｂＬａＺｒＴｉＯ$_3$、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）Ｏ$_3$、ＢａＴｉＯ$_3$－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））Ｏ$_3$、ＢａＴｉＯ$_3$－ＢａＳｒＴｉＯ$_3$、ＬｉＮｂＯ$_3$、ＬｉＴａＯ$_3$、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯ、Ｂｉ$_{1-x}$Ｌａ$_x$ＦｅＯ$_3$、Ｂｉ$_{1-x}$Ｃｅ$_x$ＦｅＯ$_3$及びＢｉＦｅ$_{1-y}$Ｃｏ$_y$Ｏ$_3$からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０４．前記極性層、前記上部導電性酸化物電極及び前記下部導電性酸化物電極のうちの１又は複数の両面の一方に接触する絶縁シーラント層を更に含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０５．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０６．前記ベース強誘電体材料が、六方晶結晶構造を有し、前記ベース強誘電体材料が、ＬｕＦｅＯ$_3$を含むか、又はＲＭｎＯ$_3$で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素である、実施形態９６に記載の半導体デバイス。

１０７．シリコン基板上に形成されたトランジスタと、
導電性ビアによって前記トランジスタに電気的に接続されたキャパシタと、
を含む、半導体デバイスであって、
前記キャパシタは、極性層の両側にある上部及び下部導電性酸化物電極であって、前記下部導電性酸化物電極が、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、上部及び下部導電性酸化物電極を含み、
前記極性層は、ドーパントがドープされたベース極性材料を含み、前記ベース極性材料が、１又は複数の金属元素と、酸素又は窒素の一方又は両方と、を含み、前記ドーパントは、前記金属酸化物の金属とは異なる４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの金属元素を含み、前記極性層の残留分極が前記ドーパントを含まない前記ベース極性材料の残留分極と異なるような濃度で存在し、
前記キャパシタは、前記極性層、前記上部導電性酸化物電極層及び前記下部導電性酸化物電極層のうちの１又は複数の一方又は両方の側面に形成された障壁シーラント層を有する、ことを特徴とする半導体デバイス。
１０８．前記極性層が、５００℃超の温度の酸化環境で形成された金属酸化物を含む、実施形態１０７に記載の半導体デバイス。
１０９．前記障壁シーラント層が、金属酸化物を含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１０．前記障壁シーラント層が、Ａｌ又はＭｇの金属酸化物を含む、実施形態１０９に記載の半導体デバイス。
１１１．前記障壁シーラント層が、ＭｇＯ、ＴｉＡｌＯ又はＬａＡｌＯからなる群から選択される酸化物を含む、実施形態１１０に記載の半導体デバイス。
１１２．前記障壁シーラント層が、前記上部及び下部導電性酸化物電極層並びに前記極性層の１又は複数の酸化、フッ素化及び／又は塩素化の部分を含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１３．前記下部導電性酸化物電極と前記導電性ビアとの間の下部障壁層及び前記上部導電性酸化物電極上の上部障壁層の一方又は両方を更に含み、前記下部及び上部障壁層の前記一方又は両方が、耐熱金属又は金属間化合物を含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１４．前記上部及び下部障壁層の一方又は両方が、Ｔｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ｔｉ合金、Ｎｉ－Ｇａ合金、Ｎｉ－Ｍｎ－Ｇａ合金、Ｆｅ－Ｇａ合金、金属ホウ酸塩、金属炭化物、金属窒化物、Ｔａ金属、Ｗ金属及びＣｏ金属のうちの１又は複数を含む、実施形態１１３に記載の半導体デバイス。
１１５．前記極性層が、$BaTiO_3$、$PbTiO_3$、$KNbO_3$、$NaTaO_3$、$BiFeO_3$及び$PbZrTiO_3$からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１６．前記極性層、前記上部導電性酸化物電極、及び前記下部導電性酸化物電極のうちの１又は複数における両面の一方に接触する絶縁シーラント層を更に含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１７．前記極性層が、$BaTiO_3$、$PbTiO_3$、$KNbO_3$、$NaTaO_3$、$BiFeO_3$　$PbZrTiO_3$、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）O_3、Ｐｂ（Ｍｇ，Ｎｂ）O_3－$PbTiO_3$、$PbLaZrTiO_3$、Ｐｂ（Ｓｃ，Ｎｂ）O_3、$BaTiO_3$－Ｂｉ（Ｚｎ（Ｎｂ，Ｔａ））O_3、$BaTiO_3$－$BaSrTiO_3$、$LiNbO_3$、$LiTaO_3$、ＬｉＦｅＴａＯＦ、ＳｒＢａＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、ＫＮａＳｒＢａＮｂＯ、$Bi_{1-x}La_xFeO_3$、$Bi_{1-x}Ce_xFeO_3$及び$BiFe_{1-y}Co_yO_3$からなる群から選択される強誘電体酸化物を含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１８．前記ドーパントが、ランタニド元素又はニオブを含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１１９．前記ベース強誘電体材料が、六方晶結晶構造を有し、前記ベース強誘電体材料が、$LuFeO_3$を含むか、又は$RMnO_3$で表される化学式を有し、Ｒが希土類元素であ

る、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１２０．前記上部及び下部導電性酸化物電極の一方又は両方が、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ３、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３、ＹＢａ２Ｃｕ３Ｏ７、Ｂｉ２Ｓｒ２ＣａＣｕ２Ｏ８、ＬａＮｉＯ３、ＳｒＲｕＯ３、ＬａＭｎＯ３、ＳｒＭｎＯ３、ＬａＣｏＯ３又はＳｒＣｏＯ３からなる群から選択される酸化物を含む、実施形態１０８に記載の半導体デバイス。
１２１．第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有するキャパシタを含む半導体デバイスであって、前記強誘電体酸化物層が、ドーパントがドープされたベース強誘電体酸化物を含み、前記ドーパントが、ドープされていないベース強誘電体酸化物と比較して、前記ベース強誘電体酸化物の残留分極を少なくとも５％低下させる、ことを特徴とする半導体デバイス。
１２２．第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有する半導体デバイスであって、前記強誘電体酸化物層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方の格子定数の約２０％以内で整合する格子定数を有する、ことを特徴とする半導体デバイス。
１２３．第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有するキャパシタを含む半導体デバイスであって、前記強誘電体酸化物層が、約６００ｍＶより低い電圧で強誘電体転移を受ける、ことを特徴とする半導体デバイス。
１２４．第１及び第２の導電性酸化物電極層の間に挿入された強誘電体酸化物層を有するキャパシタを含む半導体デバイスであって、前記強誘電体酸化物層が、約５０ｎｍ未満の厚さを有する、ことを特徴とする半導体デバイス。
１２５．約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有する強誘電体酸化物層を有する半導体デバイスであって、前記強誘電体酸化物層が、前記強誘電体酸化物層の金属の原子サイトの総数に基づいて、約５．０％超の濃度のランタニド元素でドープされている、ことを特徴とする半導体デバイス。
１２６．前記ベース強誘電体酸化物が、約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有する、実施形態１２１に記載の半導体デバイス。
１２７．前記強誘電体酸化物層が、約２００ｍＶより低い電圧で強誘電体相転移を受ける、実施形態１２１～１２６のいずれかに記載の半導体デバイス。
１２８．前記強誘電体酸化物層が、約２ｎｍ～２００ｎｍの厚さを有する、実施形態１２１～１２７のいずれかに記載の半導体デバイス。
１２９．前記強誘電体酸化物層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方の結晶格子構造と同じ結晶格子構造を有する、実施形態１２１～１２８のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３０．前記強誘電体酸化物層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方の格子定数の約１０％以内で整合する格子定数を有する、実施形態１２１～１２９のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３１．前記強誘電体酸化物層が、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’$_x$Ｂ（ｎ－ｙ）Ｂ’$_y$Ｏ$_z$で表される化学式で表される化学式を有し、Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方が、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態１２１～１３０のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３２．前記Ａ’が、４ｄ系、５ｄ系、４ｆ系又は５ｆ系のうちの１つの元素である、実施形態１３１に記載の半導体デバイス。
１３３．前記Ａ’が、ランタニド元素である、実施形態１３１又は１３２に記載の半導体デバイス。
１３４．前記ドーパントが、Ｌａを含む、実施形態１３１～１３３のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３５．Ａ’の量が、Ａ及びＡ’の量に基づいて、約０．１原子％～２０原子％である、実

施形態１３１～１３４のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３６．Ｂ’が、Ｍｎ、Ｓｃ、Ｔｉ、Ｖ、Ｃｒ、Ｃｏ、Ｎｉ、Ｃｕ及びＺｎからなる群から選択される元素である、実施形態１３１～１３５のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３７．前記第１及び第２の結晶性導電性酸化物電極の一方又は両方が、Ｃ（ｐ－ｕ）Ｃ’ｕＤ（ｑ－ｖ）Ｄ’ｖＯｗで表される化学式を有する酸化物を含み、Ｃ及びＣ’が、前記ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、Ｄ及びＤ’が、前記ペロブスカイト結晶構造の交換可能な原子位置を占有し、ｐ、ｑ、及びｗが整数であり、ｕ及びｖの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態１２１～１３６のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３８．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、約１ｎｍ～５ｎｍの厚さを有する、実施形態１２１～１３７のいずれかに記載の半導体デバイス。
１３９．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、０．０１オーム－ｃｍ未満の抵抗率を有する、実施形態１２１～１３８のいずれかに記載の半導体デバイス。
１４０．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物、レニウム（Ｒｅ）酸化物、（Ｌａ，Ｓｒ）ＣｏＯ$_3$、ＳｒＲｕＯ$_3$、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ$_3$、ＹＢａ$_2$Ｃｕ$_3$Ｏ$_7$、Ｂｉ$_2$Ｓｒ$_2$ＣａＣｕ$_2$Ｏ$_8$、ＬａＮｉＯ$_3$及びＳｒＴｉＯ$_3$のうちの１又は複数を含む、実施形態１２１～１３９のいずれかに記載の半導体デバイス。
１４１．前記強誘電体酸化物層は、約１０ｎｍ～５００ｎｍの横方向寸法を有する領域を含み、当該領域において、前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方はシュードモルフィック層を形成する、実施形態１２１～１４０のいずれかに記載の半導体デバイス。
１４２．前記強誘電体酸化物層が、ペロブスカイト構造を有する、実施形態１２１～１４０のいずれかに記載の半導体デバイス。
１４３．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｂｉを含む、実施形態１４２に記載の半導体デバイス。
１４４．前記ベース強誘電体酸化物が、ＢｉＦｅＯ$_3$を含む、実施形態１４２又は１４３に記載の半導体デバイス。
１４５．前記強誘電体酸化物層が、Ｂｉ$_{1-x}$Ｌａ$_x$ＦｅＯ$_3$、Ｂｉ$_{1-x}$Ｃｅ$_x$ＦｅＯ$_3$及びＢｉＦｅ$_{1-y}$Ｃｏ$_y$Ｏ$_3$のうちの１つを含む、実施形態１４２～１４４のいずれかに記載の半導体デバイス。
１４６．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｐｂを含む、実施形態１４２に記載の半導体デバイス。
１４７．前記ベース強誘電体酸化物が、ＰｂＴｉＯ$_3$を含む、実施形態１４２又は１４６に記載の半導体デバイス。
１４８．前記強誘電体酸化物層が、ＰｂＴｉ$_{1-y}$Ｚｒ$_y$Ｏ$_3$又はＰｂＴｉ$_{1-y-z}$Ｚｒ$_y$Ｎｂ$_z$Ｏ$_3$を含み、ｙ及びｚの各々が、ゼロより大きい、実施形態１４２、１４６及び１４７のいずれかに記載の半導体デバイス。
１４９．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、ＳｒＲｕＯ$_3$、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ$_3$及びＮｂドープＳｒＴｉＯ$_3$のうちの１又は複数を含む、実施形態１４２～１４８のいずれかに記載の半導体デバイス。
１５０．前記強誘電体酸化物層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方と形成された一方又は両方の界面において、前記ペロブスカイト構造の体心位置を占有する金属で終端する、実施形態１４２～１４９のいずれかに記載の半導体デバイス。
１５１．前記強誘電体酸化物層が、前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方と形成された一方又は両方の界面において、前記ペロブスカイト構造のコーナー位置を占有する金属で終端する、実施形態１４２～１４９のいずれかに記載の半導体デバイス。
１５２．前記強誘電体酸化物層が、六方晶構造を有する、実施形態１４１～１４１のいずれかに記載の半導体デバイス。

１５３．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｍｎを含む、実施形態１５２に記載の半導体デバイス。
１５４．前記ベース強誘電体酸化物が、ＡＭｎＯ３を含み、Ａが、セリウム（Ｃｅ）、ジスプロシウム（Ｄｙ）、エルビウム（Ｅｒ）、ユーロピウム（Ｅｕ）、ガドリニウム（Ｇｄ）、ホルミウム（Ｈｏ）、ランタン（Ｌａ）、ルテチウム（Ｌｕ）、ネオジミウム（Ｎｄ）、プラセオジミウム（Ｐｒ）、プロメチウム（Ｐｍ）、サマリウム（Ｓｍ）、スカンジウム（Ｓｃ）、テルビウム（Ｔｂ）、ツリウム（Ｔｍ）、イッテルビウム（Ｙｂ）、及びイットリウム（Ｙ）からなる群から選択される元素である、実施形態１５２又は１５３に記載の半導体デバイス。
１５５．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、Ｉｒ２Ｏ３又はＩｒＯ２を含む、実施形態１５２～１５４のいずれかに記載の半導体デバイス。
１５６．前記強誘電体酸化物層は、自発分極が構造相転移を伴う間接型強誘電体材料を含む、実施形態１２１～１４１のいずれかに記載の半導体デバイス。
１５７．前記ベース強誘電体酸化物層が、Ｌｕを含む、実施形態１５６に記載の半導体デバイス。
１５８．前記ベース強誘電体酸化物が、別の酸化物と交互になったＳｒＴｉＯ３を含む超格子を含む、実施形態１５６又は１５７に記載の半導体デバイス。
１５９．前記ベース強誘電体酸化物が、ＰｂＴｉＯ３と交互になったＳｒＴｉＯ３を含む超格子を含む、実施形態１５６～１５８のいずれかに記載の半導体デバイス。
１６０．前記ベース強誘電体酸化物が、ＬａＡｌＯ３と交互になったＳｒＴｉＯ３を含む超格子を含む、実施形態１５６～１５８のいずれかに記載の半導体デバイス。
１６１．電界を印加すると、前記強誘電体酸化物層が、約２５０ｍＶ未満のエネルギー障壁によって分離された二重ポテンシャル井戸の極小値の間でエネルギー的に変動する、実施形態１２１～１６０のいずれかに記載の半導体デバイス。
１６２．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方の上には、前記強誘電体酸化物層の反対側に形成された障壁層が形成されている、実施形態１２１～１６１のいずれかに記載の半導体デバイス。
１６３．前記障壁層が、耐熱金属又は金属間化合物を含む、実施形態１６２に記載の半導体デバイス。
１６４．前記障壁層が、Ｔｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ａｌ合金、Ｎｉ－Ｔｉ合金、Ｎｉ－Ｇａ合金、Ｎｉ－Ｍｎ－Ｇａ合金、Ｆｅ－Ｇａ合金、金属ホウ酸塩、金属炭化物、金属窒化物、Ｔａ金属、Ｗ金属及びＣｏ金属のうちの１又は複数を含む、実施形態１６２又は１６３に記載の半導体デバイス。
１６５．前記強誘電体酸化物層、前記第１の酸化物電極層及び前記第２の導電性酸化物電極層のうちの１又は複数の両面の一方に接触する側方障壁層を更に含む、実施形態１２１～１６５のいずれかに記載の半導体デバイス。
１６６．前記側方障壁層が、金属酸化物を含む、実施形態１６５に記載の半導体デバイス。
１６７．前記側方障壁層が、Ａｌ又はＭｇを含む金属酸化物を含む、実施形態１６５又は１６６に記載の半導体デバイス。
１６８．前記強誘電体酸化物層の残留分極が、不揮発性である、実施形態１２１～１６７のいずれかに記載の半導体デバイス。
１６９．前記強誘電体酸化物層の残留分極は、前記強誘電体酸化物層が常誘電体となるように揮発性である、実施形態１２１～１６８のいずれかに記載の半導体デバイス。
１７０．前記強誘電体酸化物層、前記第１の酸化物電極層、及び前記第２の導電性酸化物電極層のうちの１又は複数が、積層方向に垂直な垂直方向に傾斜した組成を有する、実施形態１２１～１６９のいずれかに記載の半導体デバイス。
１７１．トランジスタを更に含み、前記キャパシタが、前記トランジスタのドレインに電気的に接続されている、実施形態１２１～１７０のいずれかに記載の半導体デバイス。
１７２．約１０μＣ／ｃｍ^{2}超の残留分極を有する強誘電体酸化物層を有し、前記強誘電

体酸化物層が、前記強誘電体酸化物層の金属の原子サイトの総数に基づいて、約５．０％超の濃度のランタニド元素を含むドーパントでドープされたベース強誘電体酸化物を含む、ことを特徴とする物質の組成物。
１７３．前記強誘電体酸化物層が、約２００ｍＶより低い電圧で強誘電体相転移を受ける、実施形態１７２に記載の組成物。
１７４．前記強誘電体酸化物層が、約２ｎｍ～２００ｎｍの厚さを有する、実施形態１７２又は１７３に記載の組成物。
１７５．前記強誘電体酸化物層が、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’$_x$Ｂ（ｎ－ｙ）Ｂ’$_y$Ｏ$_z$で表される化学式を有し、Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方が、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態１７２～１７４のいずれかに記載の組成物。
１７６．前記Ａ’が、前記ランタニド元素である、実施形態１７５に記載の組成物。
１７７．前記Ａ’が、Ｌａである、実施形態１７６に記載の組成物。
１７８．Ａ’の量が、Ａの量に基づいて約０．１原子％～２０原子％である、実施形態１７５～１７７のいずれかに記載の組成物。
１７９．Ｂ’が、Ｍｎ、Ｓｃ、Ｔｉ、Ｖ、Ｃｒ、Ｃｏ、Ｎｉ、Ｃｕ及びＺｎからなる群から選択される元素である、実施形態１７５～１７７のいずれかに記載の組成物。
１８０．前記強誘電体酸化物層が、ペロブスカイト構造を有する、実施形態１７２～１７９のいずれか一項に記載の組成物。
１８１．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｂｉを含む、実施形態１８０に記載の組成物。
１８２．前記ベース強誘電体酸化物が、ＢｉＦｅＯ$_3$を含む、実施形態１８０又は１８１に記載の組成物。
１８３．前記強誘電体酸化物層が、Ｂｉ$_{1-x}$Ｌａ$_x$ＦｅＯ$_3$、Ｂｉ$_{1-x}$Ｃｅ$_x$ＦｅＯ$_3$及びＢｉＦｅ$_{1-y}$Ｃｏ$_y$Ｏ$_3$のうちの１つを含む、実施形態１８０～１８２のいずれかに記載の組成物。
１８４．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｐｂを含む、実施形態１８０に記載の組成物。
１８５．前記ベース強誘電体酸化物が、ＰｂＴｉＯ$_3$を含む、実施形態１８４に記載の組成物。
１８６．前記強誘電体酸化物層が、ＰｂＴｉ$_{1-y}$Ｚｒ$_y$Ｏ$_3$又はＰｂＴｉ$_{1-y-z}$Ｚｒ$_y$Ｎｂ$_z$Ｏ$_3$を含み、ｙ及びｚの各々が、ゼロより大きい、実施形態１８４又は１８５に記載の組成物。
１８７．前記強誘電体酸化物層が、六方晶構造を有する、実施形態１７２～１７９のいずれかに記載の組成物。
１８８．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｍｎを含む、実施形態１８７に記載の組成物。
１８９．前記ベース強誘電体酸化物が、Ｙｉ$_{1-x}$Ｍｎ$_x$Ｏ$_3$を含む、実施形態１８７又は１８８に記載の組成物。
１９０．前記強誘電体酸化物層は、自発分極が構造相転移を伴う間接型強誘電体材料を含む、実施形態１７２～１７９のいずれかに記載の組成物。
１９１．前記ベース強誘電体酸化物層が、Ｌｕを含む、実施形態１９０に記載の組成物。
１９２．前記ベース強誘電体酸化物が、別の酸化物と交互になったＳｒＴｉＯ$_3$を含む超格子を含む、実施形態１９０又は１９１に記載の組成物。
１９３．前記ベース強誘電体酸化物が、ＰｂＴｉＯ$_3$と交互になったＳｒＴｉＯ$_3$を含む超格子を含む、実施形態１９０～１９２のいずれかに記載の組成物。
１９４．前記ベース強誘電体酸化物が、ＬａＡｌＯ$_3$と交互になったＳｒＴｉＯ$_3$を含む超格子を含む、実施形態１９０～１９２のいずれか一項に記載の組成物。
１９５．電界を印加すると、前記強誘電体酸化物層が、約２５０ｍＶ未満のエネルギー障壁によって分離された二重ポテンシャル井戸の極小値の間でエネルギー的に変動する、実施形態１７２～１９４のいずれかに記載の組成物。

１９６．前記強誘電体酸化物層の残留分極が、不揮発性である、実施形態１７２～１９５のいずれかに記載の組成物。
１９７．前記強誘電体酸化物層の残留分極は、前記強誘電体酸化物層が常誘電体となるように揮発性である、実施形態１７２～１９６のいずれか一項に記載の組成物。
１９８．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、導電性二元酸化物を更に含み、ＳｒＲｕＯ３、（Ｌａ，Ｓｒ）ＭｎＯ３及びＮｂドープＳｒＴｉＯ３のうちの前記１又は複数が、前記二元酸化物と前記強誘電体酸化物層との間に挿入される、実施形態１４９に記載の半導体デバイス。
１９９．前記二元酸化物が、イリジウム（Ｉｒ）酸化物、ルテニウム（Ｒｕ）酸化物、パラジウム（Ｐｄ）酸化物、オスミウム（Ｏｓ）酸化物及びレニウム（Ｒｅ）酸化物からなる群から選択される、実施形態１９８に記載の半導体デバイス。
２００．前記第１及び第２の導電性酸化物電極層の一方又は両方が、デラフォサイト構造を有する六方晶の導電性酸化物を含む、実施形態１５２～１５４のいずれかに記載の半導体デバイス。
２０１．前記デラフォサイト構造を有する前記六方晶の導電性酸化物が、ＰｔＣｏＯ２、ＰｄＣｏＯ２、及びＡｌドープＺｎＯのうちの１又は複数を含む、実施形態２００に記載の半導体デバイス。
２０２．前記障壁層が、Ｔｉ３Ａｌ、ＴｉＡｌ、ＴｉＡｌ３、Ｎｉ３Ａｌ、ＮｉＡｌ３ ＮｉＡｌ、Ｎｉ２ＭｎＧａ、ＦｅＧａ及びＦｅ３Ｇａのうちの１又は複数を含む、実施形態１６４に記載の半導体デバイス。
２０３．前記側方障壁層が、ＭｇＯ、ＴｉＡｌＯ及びＬａＡｌＯからなる群から選択される酸化物を含む、実施形態１６５又は１６６に記載の半導体デバイス。
２０４．前記側方障壁層が、酸化、フッ素化及び／又は塩素化によって不動態化される前記第１及び第２の導電性酸化物電極層並びに前記強誘電体酸化物層のうちの１又は複数の一方又は両方の側壁を含む、実施形態１６５に記載の半導体デバイス。
２０５．前記強誘電体酸化物層が、Ａ（ｍ－ｘ）Ａ’ｘＢ（ｎ－ｙ）Ｂ’ｙＯｚで表される化学式を有し、Ａ及びＡ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、Ｂ及びＢ’が、前記ペロブスカイト結晶構造において交換可能な原子位置を占有し、前記Ａ’及び前記Ｂ’の一方又は両方が、ドーパントであり、ｍ、ｎ及びｚが、整数であり、ｘ及びｙの一方又は両方が、ゼロより大きい、実施形態１２５に記載の半導体デバイス又は実施形態１７２に記載の物質の組成物。
２０６．前記ドーパント元素が、前記強誘電体酸化物層の前記金属の原子サイトの前記総数に基づいて約１２．５％超の濃度で存在する、実施形態２０５に記載の半導体デバイス又は実施形態８５に記載の物質の組成物。
２０７．前記強誘電体酸化物層の前記金属が、Ｂｉである、実施形態２０５に記載の半導体デバイス又は実施形態８５に記載の物質の組成物。
２０８．前記強誘電体酸化物層が、ＢｉＦｅＯ３である、実施形態２０５に記載の半導体デバイス又は実施形態８５に記載の物質の組成物。
２０９．前記ドーパントが、前記ベース極性材料の金属と交換可能な原子格子位置を占有し、前記極性層では、前記ドーパントが、前記ベース極性材料の前記金属とは異なる酸化状態を有する、実施形態１～１２０のいずれかに記載の半導体デバイス、キャパシタ又は組成物。

【０１２５】

本開示の態様は、種々の電子機器に実装することができる。電子機器の例には、これらに限定されないが、家庭用電子製品、家庭用電子製品の一部、電子試験装置、基地局などのセルラー通信インフラストラクチャなどが含まれ得る。電子機器の例には、これらに限定されないが、スマートフォンなどの携帯電話、スマートウォッチ又はイヤピースなどのウェアラブルコンピューティングデバイス、電話、テレビ、コンピュータモニタ、コンピュータ、モデム、ハンドヘルドコンピュータ、ラップトップコンピュータ、タブレットコンピュータ、携帯情報端末（ＰＤＡ）、電子レンジ、冷蔵庫、自動車用電子システムなどの

車両用電子システム、ステレオシステム、ＤＶＤプレーヤー、ＣＤプレーヤー、ＭＰ３プレーヤーなどのデジタル音楽プレーヤー、ラジオ、カムコーダー、デジタルカメラなどのカメラ、ポータブルメモリチップ、洗浄機、乾燥機、洗浄／乾燥機、周辺機器、時計などが含まれ得る。更に、電子機器は、未完成の製品を含み得る。本開示の態様は、高出力、高周波数帯域、線形性の向上、及び／又は効率性の向上が望まれる種々の無線通信技術で特に実装することができ、これには、幾つか例を挙げると、レーダー、コミュニティアンテナテレビ（ＣＡＴＶ）、レーダー妨害装置、無線通信基地局などの軍事及び宇宙アプリケーションが含まれる。

【０１２６】

文脈上明らかに他の意味に解すべき場合を除き、本明細書及び特許請求の範囲を通して、用語「含む（ｃｏｍｐｒｉｓｅ）」、「含んでいる（ｃｏｍｐｒｉｓｉｎｇ）」、「含む（ｉｎｃｌｕｄｅ）」、「含んでいる（ｉｎｃｌｕｄｉｎｇ）」などの用語は、排他的又は網羅的な意味とは対照的に、包括的な意味で、すなわち、「含むがこれらに限定されない」という意味で解釈されるべきである。本明細書で概して使用される「結合される」という用語は、直接接続され得るか、又は１又は複数の中間要素を介して接続され得る２つ以上の要素を指す。同様に、本明細書で概して使用される「接続される」という用語は、直接接続され得るか、又は１又は複数の中間要素を介して接続され得る２つ以上の要素を指す。加えて、「本明細書において」、「上記で」、「下記で」という用語、及び同様の意味の用語は、本出願において使用される場合、本出願の任意の特定の部分ではなく、本出願全体を指すものとする。文脈が許す場合、単数又は複数を使用する上記の詳細な説明の用語はまた、それぞれ、複数又は単数を含み得る。２つ以上の項目のリストを参照する「又は」という用語は、次の用語の解釈、すなわち、リスト内の任意の項目、リスト内の全ての項目、及びリスト内の項目の任意の組み合わせの全てを包含する。

【０１２７】

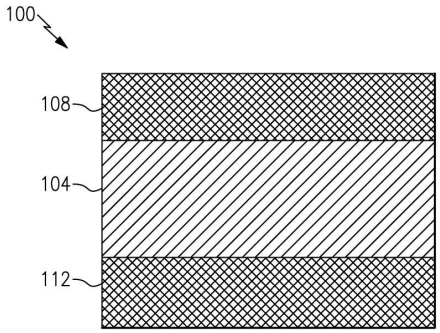
更に、「できる（ｃａｎ）」、「できる（ｃｏｕｌｄ）」、「可能性がある（ｍｉｇｈｔ）」、「可能性がある（ｍａｙ）」、「例えば（ｅ．ｇ．）」、「例えば（ｆｏｒ　ｅｘａｍｐｌｅ）」、「など（ｓｕｃｈ　ａｓ）」などの本明細書で使用される条件付き言語は、特に別段の記載がない限り、又は使用される文脈内で別様に理解されない限り、概して、特定の実施形態が特定の特徴、要素及び／又は状態を含むが、他の実施形態は含まないことを伝えることが意図される。従って、かかる条件付き言語は、概して、特徴、要素、及び／若しくは状態が１又は複数の実施形態に何らかの形で必要であること、あるいはこれらの特徴、要素、及び／若しくは状態が含まれるか、又は特定の実施形態で実行されることを意味することを意図しない。

【０１２８】

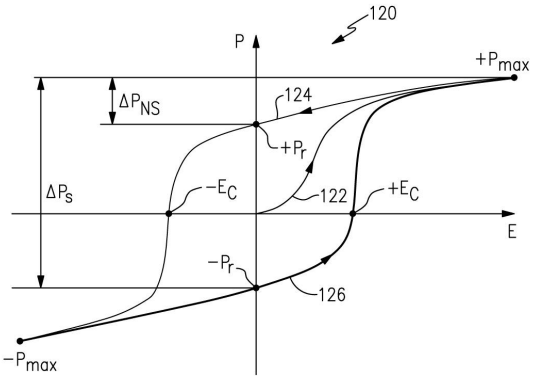
特定の実施形態が説明されているが、これらの実施形態は例としてのみ提示されており、本開示の範囲を限定することを意図するものではない。実際、本明細書に記載の新規の装置、方法、及びシステムは、他の種々の形態で具体化することができる。更に、本明細書に記載の方法及びシステムの形態における種々の省略、置換、及び変更は、本開示の趣旨から逸脱することなく行うことができる。例えば、ブロックが所与の配置で提示されているが、代替の実施形態は、異なる構成要素及び／又は回路トポロジーで同様の機能を実行することができ、一部のブロックは、削除、移動、追加、細分化、結合、及び／又は修正されてもよい。これらのブロックの各々は、種々の方法で実装され得る。上記の種々の実施形態の要素及び行為の任意の適切な組み合わせを組み合わせて、更なる実施形態を提供することができる。上記の種々の特徴及びプロセスは、互いに独立して実装され得るか、又は種々の方法で組み合わされ得る。本開示の特徴の全ての可能な組み合わせ及びサブコンビネーションは、本開示の範囲内にあることが意図される。

【図面】

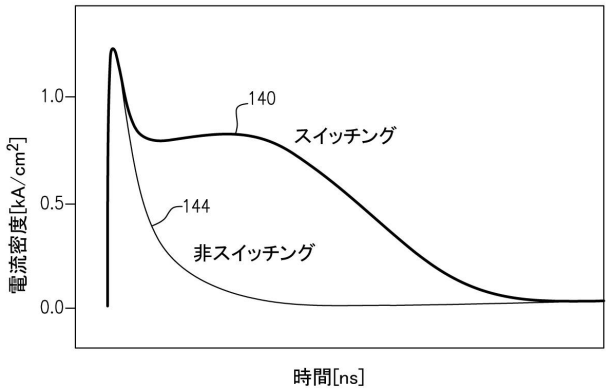
【図１Ａ】



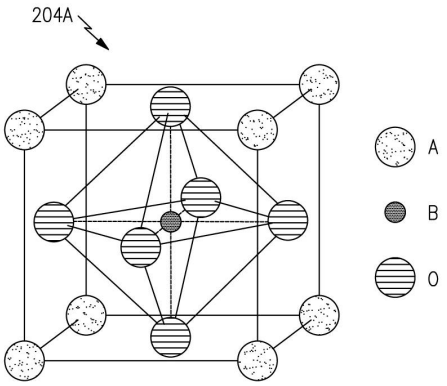
【図１Ｂ】



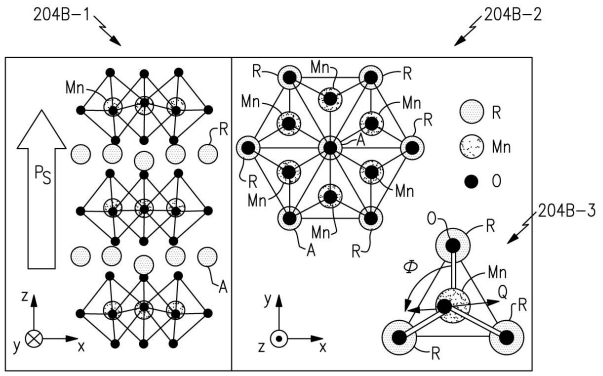
【図１Ｃ】



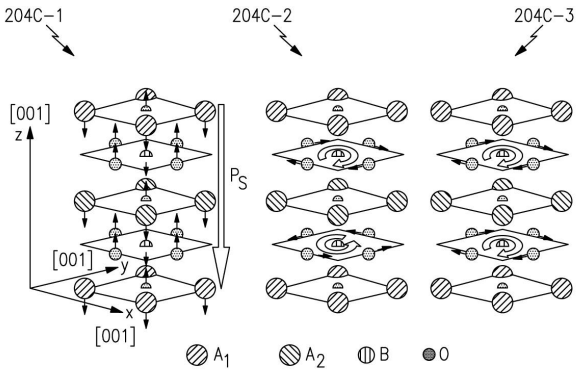
【図２Ａ】



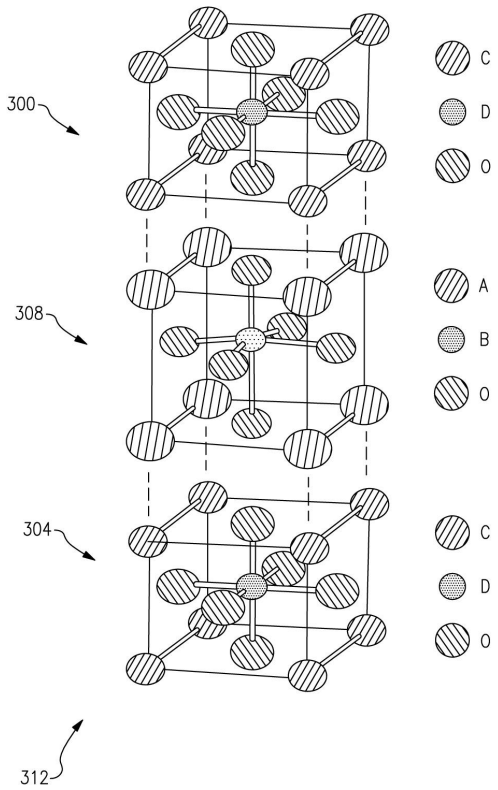
【図２Ｂ】



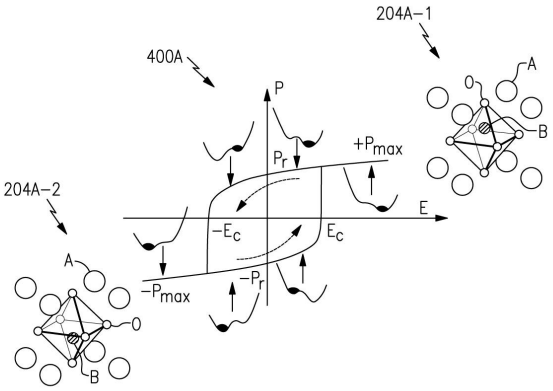
【図２Ｃ】



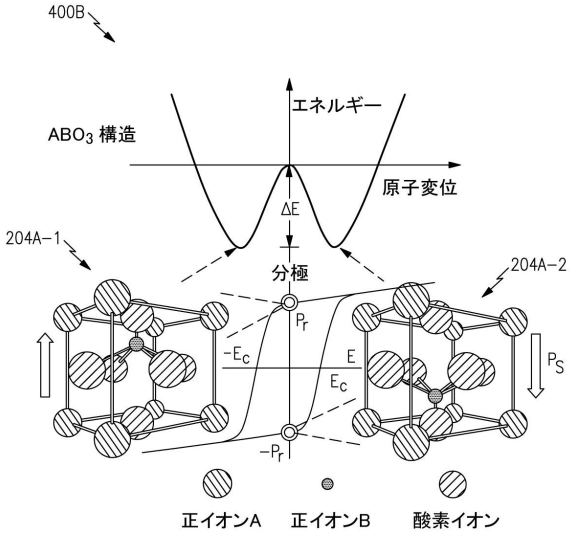
【図３】



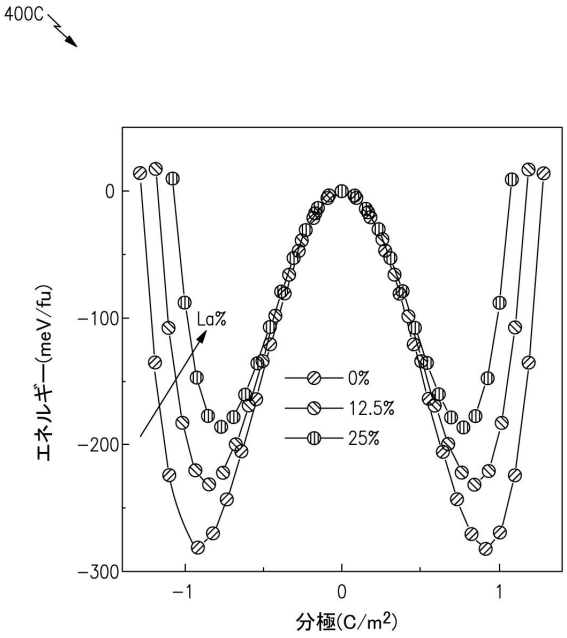
【図４Ａ】



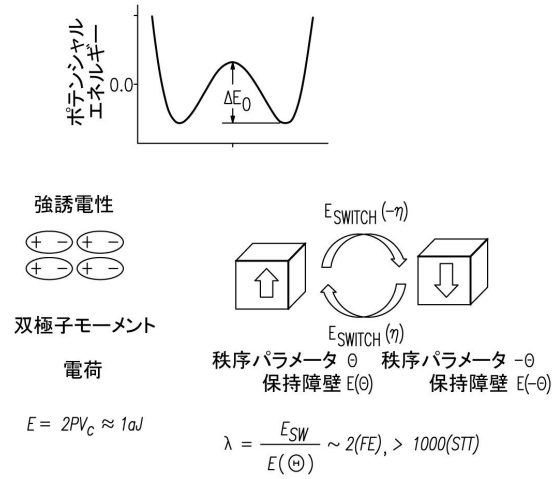
【図４Ｂ】


400B
エネルギー
ABO_3 構造
原子変位
ΔE
204A−1
分極
204A−2
P_r
$-E_c$
E
E_c
P_S
$-P_r$
正イオンA
正イオンB
酸素イオン

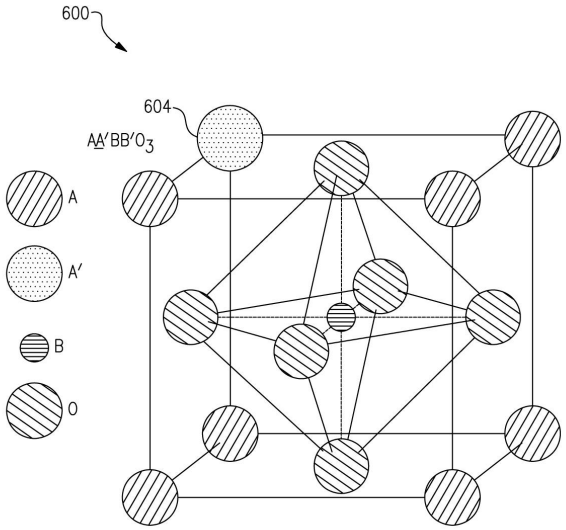
【図４Ｃ】


400C
0
−100
−200
−300
エネルギー(meV/fu)
La%
0%
12.5%
25%
−1
0
1
分極(C/m²)

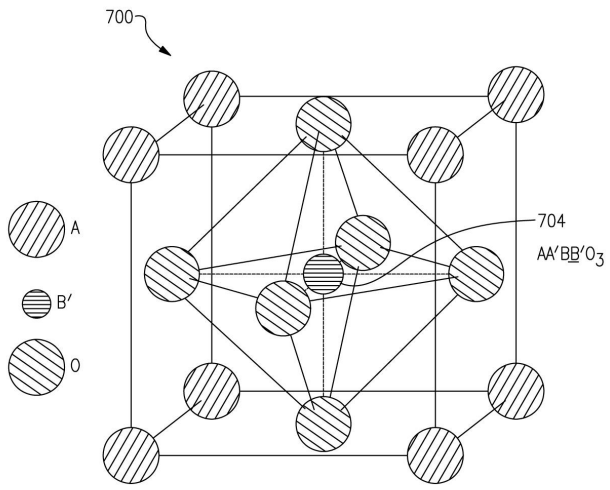
【図５】


ポテンシャルエネルギー
0.0
ΔE_0
強誘電性
双極子モーメント
電荷
$E = 2PV_c \approx 1aJ$
$E_{SWITCH}(-\eta)$
$E_{SWITCH}(\eta)$
秩序パラメータ Θ
保持障壁 E(Θ)
秩序パラメータ −Θ
保持障壁 E(−Θ)
$\lambda = \frac{E_{SW}}{E(\Theta)} \sim 2(FE), > 1000(STT)$

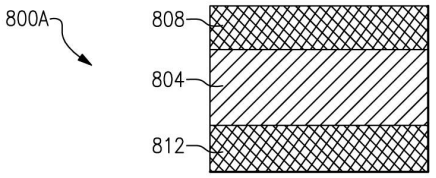
【図６】


600
604
$AA'BB'O_3$
A
A′
B
O

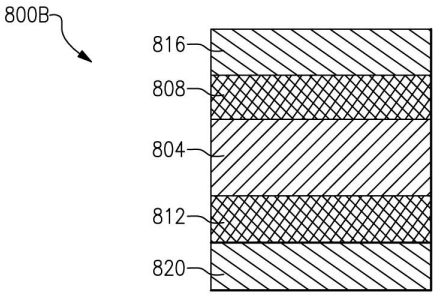
【図７】



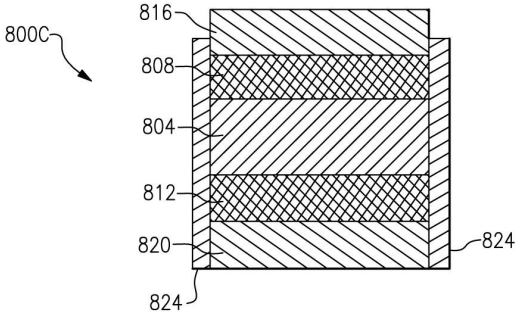
【図８Ａ】



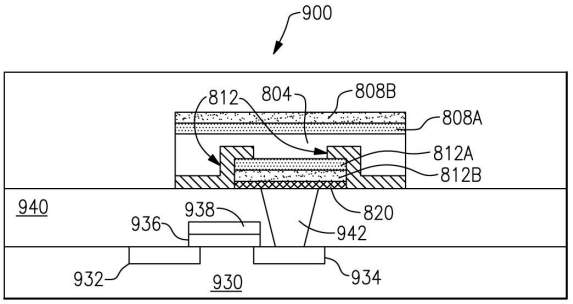
【図８Ｂ】



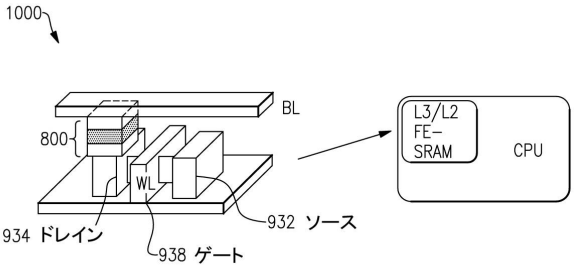
【図８Ｃ】



【図９】


900
812
804
808B
808A
812A
812B
940
938
936
820
942
932
930
934

【図１０】


1000
BL
800
WL
L3/L2
FE-
SRAM
CPU
934 ドレイン
938 ゲート
932 ソース

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US2020/027108

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC(8) - H01G 4/30; H01G 4/00; H01G 4/33 (2020.01)
CPC - H01L 28/40; H01L 28/60; H01L 28/75 (2020.05)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
see Search History document

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
see Search History document

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
see Search History document

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2015/0358151 A1 (HELMHOLTZ-ZENTRUM DRESDEN-ROSSENDORF E V) 10 December 2015 (10.12.2015) entire document	1-33
A	US 2002/0030246 A1 (EISENBEISER et al) 14 March 2002 (14.03.2002) entire document	1-33
A	US 2002/0076906 A1 (HILT et al) 20 June 2002 (20.06.2002) entire document	1-33
A	US 2019/0096897 A1 (MICRON TECHNOLOGY INC) 28 March 2019 (28.03.2019) entire document	1-33

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
25 May 2020	12 JUN 2020
Name and mailing address of the ISA/US Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 Facsimile No. 571-273-8300	Authorized officer Blaine R. Copenheaver Telephone No. PCT Helpdesk: 571-272-4300

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2019)

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IR,IS,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

(72)発明者　マニパトゥルーニ サシカンス
アメリカ合衆国 ９４１０５ カリフォルニア州 サンフランシスコ ナンバー１９２５２４ ステュアート ストリート １８０
(72)発明者　タレハ ゴーラフ
アメリカ合衆国 ９４１０５ カリフォルニア州 サンフランシスコ ナンバー１９２５２４ ステュアート ストリート １８０

Ｆターム（参考）　5E001　AB01 AE01 AE02 AE03
5F083　FR02 JA38 JA42 JA43 JA44 JA45 JA60

【要約の続き】
電極上にシュードモルフィックに形成される。