

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年6月30日(30.06.2016)



(10) 国際公開番号

WO 2016/104684 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 21/338 (2006.01) H01L 21/336 (2006.01)
C01B 31/06 (2006.01) H01L 29/78 (2006.01)
H01L 21/205 (2006.01) H01L 29/812 (2006.01)
H01L 21/265 (2006.01) H01L 29/872 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/086187
- (22) 国際出願日: 2015年12月25日(25.12.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-265640 2014年12月26日(26.12.2014) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人北海道大学(NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION HOKKAIDO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒0600808 北海道札幌市北区北8条西5丁目 Hokkaido (JP). 国立研究開発法人産業技術総合研究所(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関1-3-1 Tokyo (JP). 国立研究開発法人物質・材料研究機構(NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE) [JP/JP]; 〒3050047 茨城県つくば市千現一丁目2番地1 Ibaraki (JP).
- (72) 発明者: 金子 純一(KANEKO, Junichi); 〒0600808 北海道札幌市北区北8条西5丁目 国立大学法人北海道大学内 Hokkaido (JP). 坪田 雅功(TSUBOTA, Masakatsu); 〒0600808 北海道札幌市北区北8条西5丁目 国立大学法人北海道大学内

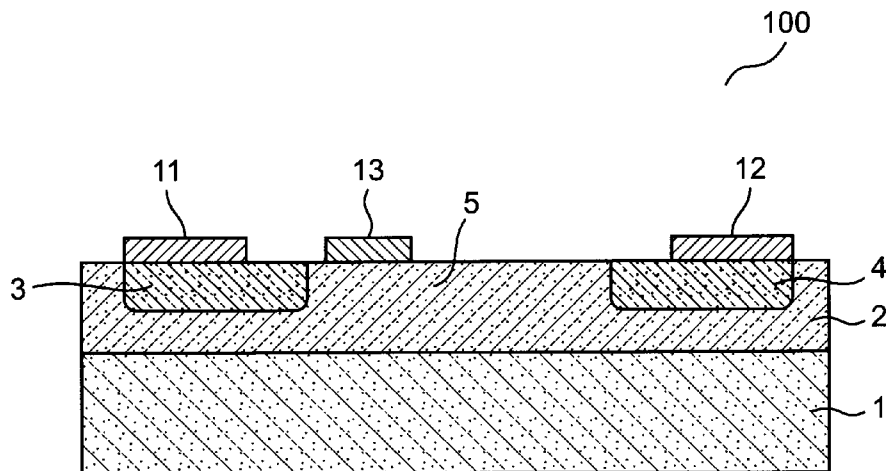
Hokkaido (JP). 梅澤 仁(UMEZAWA, Hitoshi); 〒5638577 大阪府池田市緑丘1丁目8番31号 国立研究開発法人産業技術総合研究所関西センター内 Osaka (JP). 鹿田 真一(SHIKATA, Shichiichi); 〒5638577 大阪府池田市緑丘1丁目8番31号 国立研究開発法人産業技術総合研究所関西センター内 Osaka (JP). 坪内 信輝(TSUBOUCHI, Nobuteru); 〒5638577 大阪府池田市緑丘1丁目8番31号 国立研究開発法人産業技術総合研究所関西センター内 Osaka (JP). 小泉 聡(KOIZUMI, Satoshi); 〒3050047 茨城県つくば市千現一丁目2番地1 国立研究開発法人物質・材料研究機構内 Ibaraki (JP).

- (74) 代理人: 鮫島 睦, 外(SAMEJIMA, Mutsumi et al.); 〒5300017 大阪府大阪市北区角田町8番1号梅田阪急ビルオフィスタワー青山特許事務所 Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

[続葉有]

(54) Title: DIAMOND SEMICONDUCTOR DEVICE

(54) 発明の名称: ダイヤモンド半導体デバイス



(57) Abstract: This diamond semiconductor device comprises a p-type region that is formed of diamond, and a p-type impurity in the p-type region is composed of boron including two isotopes ^{10}B and ^{11}B . The concentration ratio of the isotopes contained in the p-type region, namely $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ is smaller than the natural abundance ratio of the isotopes.

(57) 要約: ダイヤモンド半導体デバイスにおいて、ダイヤモンドからなるp型領域を有し、p型領域のp型不純物は、 ^{10}B と ^{11}B の2つの同位体を含むホウ素からなり、p型領域に含まれる同位体の濃度の比($^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$)は、同位体の天然存在比より小さい。

WO 2016/104684 A1



MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユー
ラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：ダイヤモンド半導体デバイス

技術分野

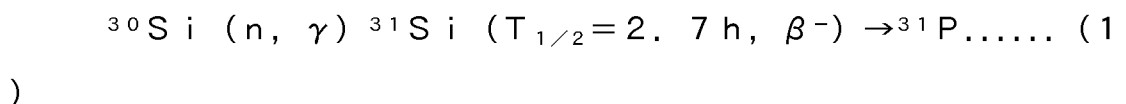
[0001] 本発明は、ダイヤモンド半導体デバイスに関し、特に、放射線に対して高い耐性を有するダイヤモンド半導体デバイスに関する。

背景技術

[0002] ダイヤモンドは、約 5.5 eV の広い禁制帯幅を持つワイドバンドギャップ半導体であり、高い耐放射線特性や 800℃ 程度の高温環境下でも動作が可能であるという長所を有する。このため原子炉、核融合炉、加速器等に使用するセンサーや前置増幅器等のような、高温、高放射線環境下で使用される半導体デバイスの材料として期待されている。

[0003] 半導体デバイスの材料として一般的な Si と比較した場合、ダイヤモンドは γ 線や X 線のような高エネルギー光子に対して 4 桁以上高い耐性を有する。

また、熱中性子に代表される低エネルギー中性子を照射した場合、Si では、以下の式 (1) の反応が起こり、Si に対して n 型ドーパントとして働くリン (P) が生成され半導体特性が劣化するが、構成元素が C であるダイヤモンドではこのような核反応は起きず、半導体特性の劣化はない。



一般に、上記式 (1) の核反応は、半導体のドーピング技術として用いられており、例えばダイヤモンドにドーピングした ^{10}B を Li に変換して n 型ドーパントにする方法として用いられる (例えば、特許文献 1 参照)。

先行技術文献

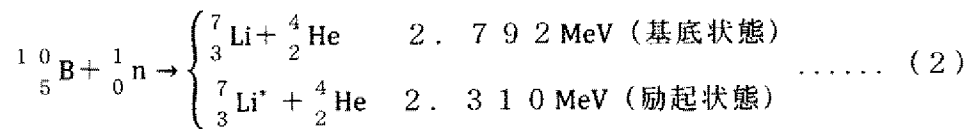
特許文献

[0004] 特許文献 1：特開平 07-106267 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] ダイヤモンドでは、中性子が照射されても、構成元素Cの核反応に起因する半導体特性の劣化は無いが、p型ドーパントとしてホウ素（B）を用いた場合には、中性子吸収能が高いホウ素 ^{10}B が中性子（n）を吸収して以下の式（2）に示す荷電粒子生成反応を起こし、発生した荷電粒子Li、Heが半導体特性に影響を与えるという問題があった。



[0006] そこで、本発明は、p型ドーパントとしてホウ素（B）を用いても荷電粒子生成反応の影響を受けないダイヤモンド半導体デバイスの提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 本発明は、ダイヤモンドからなるp型領域を有し、p型領域のp型不純物は、 ^{10}B と ^{11}B の2つの同位体を含むホウ素からなり、p型領域に含まれる同位体の濃度比（ $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ ）は、同位体の天然存在比より小さいことを特徴とするダイヤモンド半導体デバイスである。

発明の効果

[0008] 本発明にかかるダイヤモンド半導体デバイスは、放射線、特に中性子に対する耐性が高く、例えば高γ線や中性子存在環境下でも特性の劣化を起こすことなく使用できる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]本発明の実施の形態1にかかる電界効果トランジスタの断面図である。

[図2]比較例にかかる電界効果トランジスタの断面図である。

[図3]本発明の実施の形態1にかかる評価サンプルの二次イオン質量分析（SIMS）結果である。

[図4]本発明の実施の形態1にかかる比較サンプルのFT-IR測定結果である。

[図5]本発明の実施の形態1にかかる比較サンプルのホール測定結果である。

[図6]本発明の実施の形態1にかかる評価サンプルのラマン散乱測定結果である。

[図7]本発明の実施の形態1にかかる評価サンプルの透過率測定結果である。

[図8]本発明の実施の形態2にかかるMIMSFETの断面図である。

[図9]本発明の実施の形態3にかかるショットキダイオードの断面図である。

発明を実施するための形態

[0010] 自然界で安定して存在しうるホウ素（B）には、中性子を吸収した結果、高エネルギー荷電粒子を放出する ^{10}B と放出しない ^{11}B の2つの同位体があるが、その約20%が中性子吸収能の高い ^{10}B である。このため、ダイヤモンドの半導体デバイスだけでなく、SiやSiCの半導体デバイスでもp型ドーパントとしてホウ素が用いられることにより、上述の式（2）の反応が起こり、同様の問題が起こりうる。

[0011] しかしながら、SiやSiCを用いた半導体デバイスでは、中性子の照射による特性の劣化は、上述の式（1）の反応が支配的であり、式（2）に示すホウ素からの荷電粒子生成反応の影響よりも早い段階で影響が出る。このため、SiやSiCを用いた半導体デバイスでは、ホウ素からの荷電粒子生成反応の影響はこれまで殆ど問題にされてこなかった。

[0012] 本発明の実施の形態では、ダイヤモンドを用いた半導体デバイスにおいて、p型ドーパントとしてホウ素を用いる場合に、中性子吸収能の高い ^{10}B の割合を減らして ^{11}B を増やすことにより、つまり、p型領域に含まれるホウ素の同位体の濃度の比（ $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ ）を同位体の天然存在比より小さくすることにより、上記式（2）の発生を抑制し、電気特性の劣化を防止する。

[0013] また、半導体デバイスにおいて、p型領域は動作層もしくはp型導電層として用いるため、欠陥の混入を避け、平坦かつ高純度で、高い結晶性を有するように成長する必要がある。本発明の実施の形態では、p型領域に含まれるホウ素の同位体の濃度の比（ $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ ）を同位体の天然存在比より小さくし、更に結晶性を高めて成長させるために、例えば基板としてオフ角を制

御したダイヤモンドのオフ基板を用いて、その上に p 型ダイヤモンド層のエピタキシャル成長を行う。

[0014] (実施の形態 1)

図 1 は、全体が 100 で表される本発明の実施の形態 1 にかかる電界効果トランジスタの断面図である。電界効果トランジスタ 100 は、ダイヤモンド基板 1 を含む。ダイヤモンド基板 1 には、例えば、高圧高温合成 (HP/HT) 1b 型単結晶ダイヤモンド基板、高圧高温合成 11a 型単結晶ダイヤモンド基板、または化学気相合成単結晶ダイヤモンド基板からなり、表面が (001) 面や (111) 面の基板、または表面が (001) 面から $<110>$ 方向に $0.3 \sim 6^\circ$ 傾いたオフ基板が用いられる。

[0015] ダイヤモンド基板 1 の上には、p 型の単結晶ダイヤモンドからなるエピタキシャル層 2 を有する。エピタキシャル層 2 は p 型ドーパントとしてホウ素を含む。ホウ素の濃度は $10^{14} \sim 10^{18} \text{ atom/cm}^3$ である。エピタキシャル層 2 の中には、p 型 (導電層) のソース領域 3 およびドレイン領域 4 が設けられている。ソース領域 3 およびドレイン領域 4 は、p 型ドーパントとしてホウ素を含み、ホウ素の濃度は $10^{19} \sim 10^{22} \text{ atom/cm}^3$ である。ソース領域 3 とドレイン領域 4 との間に挟まれたエピタキシャル層 2 は、チャンネル領域 5 となる。

[0016] エピタキシャル層 2 の上には、ソース領域 3 に接続されたソース電極 11 と、ドレイン領域 4 に接続されたドレイン電極 12 が設けられている。またチャンネル領域 5 の上には、ソース電極 11 とドレイン電極 12 に挟まれるようにゲート電極 13 が設けられている。

[0017] 電界効果トランジスタ 100 では、ソース領域 3、ドレイン領域 4、およびチャンネル領域 5 に含まれる ^{10}B と ^{11}B の不純物濃度の割合は、自然界における割合 (天然存在比) $1 : 4$ より小さく ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} < 1 / 4$)、好ましくは国内で市販され入手が容易な 95%濃縮の ^{11}B エンリッチホウ酸に対応する $1 : 19$ 以下であり ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} \leq 1 / 19$)、より好ましくは $1 / 19$ 以下でかつ $1 / 200$ 以上であり、更に好ましくは約 $1 : 200$ ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} \approx 1 / 200$) である。

$^{11}\text{B} = 1 / 200$) である。

[0018] 電界効果トランジスタ 100 を製造するには、まず、高圧高温合成 (HP / HT) 1b 型単結晶ダイヤモンド基板、高圧高温合成 11a 型単結晶ダイヤモンド基板、または化学気相合成単結晶ダイヤモンド基板のような基板を準備する。

[0019] 次に、その上に、p 型ダイヤモンドエピタキシャル層 2 を成長させる。エピタキシャル層 2 の形成は、例えばマイクロ波プラズマ成長装置中で、マイクロ波プラズマ化学気相積層 (PCVD) 法、DC アーク法、熱フィラメント法を用いて行う。エタキシャル層 2 の成長は、例えば、材料ガスとしてメタン、エタン、ブタン、プロパン等の炭化水素系ガス、ドーパントガスとしてトリメチルボロン、ジボラン等、キャリアガスとして水素を用い、基板温度は例えば 850℃で行う。ドーパントガスは、例えばホウ素を $^{11}\text{B} \geq 99.7\%$ までエンリッチしたホウ酸から合成したトリメチルボロン、ジボラン等をいる。ソース領域 3 およびドレイン領域 4 は、例えばエピタキシャル層 2 を選択エッチングした後に、その部分に p 型のソース領域 3 およびドレイン領域 4 を選択成長させて形成する。

[0020] このように、電界効果トランジスタ 100 では、p 型ドーパントとして使用されるホウ素のうち、中性子吸収能の高い ^{10}B の割合を低減することにより、上述の式 (2) の発生を抑制し、電気特性の劣化を防止する。

[0021] このような電界効果トランジスタ 100 は、原子炉用途に用いる場合が想定されており、原子炉格納容器内で使用する BWR 用原子炉格納容器モニタ (CAMS)、PWR 用事故後監視計 (伝送器、PAM)、起動系モニタ用前置増幅器、マルチプレクサ等への適用が考えられる。

[0022] 電界効果トランジスタ 100 を原子炉格納容器内で使用する場合には、過酷事故への対応も要求される。例えば CAMS に適用した場合、暫定値ではあるが積算線量: 5 MGy (γ 線)、300℃の環境で、72 時間動作することが求められる。さらに定量的な数値は示されていないが、過酷事故時には再臨界の発生を考慮する必要があるため、可能な限り高い中性子耐性が必

要とされる。

[0023] 図2は比較例であり、全体が200で表される、一般的な電界効果トランジスタの断面図を示す。図2中、図1と同一符合は、同一または相当箇所を示す。電界効果トランジスタ200は、ソース領域3、ドレイン領域4、およびチャネル領域5に含まれるp型ドーパントを除いて、図1に示す実施の形態1にかかる電界効果トランジスタ100と同一構造である。

[0024] 即ち、電界効果トランジスタ200では、基板1およびエピタキシャル層2はダイヤモンドから形成され、ソース領域3、ドレイン領域4、およびチャネル領域5のp型ドーパントであるホウ素は自然界で安定な ^{10}B と ^{11}B を含み、その割合は自然界における一般的な割合（天然存在比）である1 : 4（ $^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} = 1 / 4$ ）となっている。

[0025] 原子炉格納容器内で使用する場合、図2に示すような中性子50が電界効果トランジスタ200に入射する。中性子50は、ソース領域3、ドレイン領域4、およびチャネル領域5中のホウ素と衝突する。電界効果トランジスタ200では、 ^{10}B と ^{11}B の割合が天然存在比である1 : 4（ $^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} = 1 / 4$ ）であるため、中性子吸収能の高い ^{10}B が中性子（n）を吸収して上述の式（2）に示す荷電粒子生成反応が起きる。この結果、主に ^7Li と ^4He からなる荷電粒子60が放出され、周囲のエピタキシャル層2に入射し、チャネル領域5等の結晶に損傷を与えて、電気伝導度等の電気特性を劣化させる。

[0026] これに対して、実施の形態1にかかる電界効果トランジスタ100では、ソース領域3、ドレイン領域4、およびチャネル領域5に含まれるホウ素中の ^{10}B の割合が天然存在比より低いため、式（2）に示す荷電粒子生成反応が抑制され、半導体デバイス200で見られたような電気特性の劣化を防止できる。以下にその評価例を示す。

[0027] サンプル

（1）評価サンプル

ダイヤモンド基板の上にp型ドーパントとしてホウ素を含むエピタキシャ

ル層を形成した評価サンプルを準備し、特性を評価した。具体的には、単結晶 I b 型のダイヤモンド基板を準備し、その上に、p 型ダイヤモンドのエピタキシャル層を成長させた。エピタキシャル層の成長は、マイクロ波プラズマ成長装置で、マイクロ波プラズマ化学気相堆積 (P C V D) 法を用いて作製した。成長条件は以下の通りである。

- [0028] 総ガス流量 : 1 0 0 0 s c c m
ガス圧力 : 1 1 0 T o r r
キャリアガス : 水素
材料ガス : メタン (4 %)
ドーパントガス : トリメチルボロン ($^{11}\text{B} \geq 99.7\%$)
メタン／水素比 : 1 %
R F パワー : 3.9 k W
基板 : I b 型単結晶ダイヤモンド (0 0 1) 基板
(オフ角 : $\langle 110 \rangle$ 方向に 3°)
基板温度 : 850 °C
成長時間 : 4 時間

[0029] (2) 比較サンプル

成長条件は、ドーパントガスとして通常のトリメチルボロン (天然存在比 : $^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} = 1 / 4$) を用いる以外は、評価サンプルと同様である。

- [0030] エピタキシャル層の予想膜厚は 10.5 μm で、p 型ドーピング濃度は $3 \sim 5 \times 10^{17} \text{ a t o m } / \text{ c m }^3$ である。

[0031] 評価方法

上述のように、ダイヤモンドの電気特性に影響を与えるのは ^{10}B から放出される高エネルギー荷電粒子 ^7Li 、 ^4He である。ここで評価方法としては原子炉等で中性子を発生させ、 $^{10}\text{B} (n, ^4\text{He}) ^7\text{Li}$ 反応により直接的に影響をすることも可能であるが、このような評価方法では、高速中性子による原子たたき出しや γ 線による影響も考慮する必要がある。

そこで、荷電粒子によって生じる影響のみを評価するために、サンプルに

対して、荷電粒子加速器により ^4He を照射することにより電気特性等に与える影響を評価した。つまり、式(2)の反応で発生する ^4He を評価サンプルに照射して、電気特性等に与える影響を評価した。

[0032] 評価サンプル、比較サンプルには、 $^4\text{He}^+$ イオンを3 MeVで2回照射した。それぞれのイオン照射量は以下のとおりである。

1回目： $1 \times 10^{12} \text{ ion/cm}^2$

2回目： $1 \times 10^{13} \text{ ion/cm}^2$

そして、Heイオンの照射前、1回目の照射後、2回目の照射後に評価を行った。評価内容は、比較サンプルについては以下の(1)と(2)、評価サンプルについては以下の(3)と(4)とした。

[0033] (1) FT-IR測定によるB準位による吸収からのアクセプタ濃度の評価($N_A - N_D$)。

(2) ホール効果測定によるキャリア濃度、移動度、比抵抗の評価。

(3) X線回折(XRD)法によるTriple axis高分解能ロッキングカーブ結晶性評価。

(4) 紫外可視吸光(UV/VIS)測定により準位形成評価。

[0034] 評価結果

図3は、評価サンプルの二次イオン質量分析(SIMS)結果である。縦軸は水素、ホウ素、窒素、シリコンの濃度(二次イオン強度)を表し、横軸は評価サンプルの表面から深さを示す。図3では、表面から9 μm の深さにダイヤモンド基板の表面が存在している。また、この評価サンプルでは、 ^{11}B のドーピング濃度は $7 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$ で、 ^{10}B のドーピング濃度は $1 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$ となっている。表面近傍の値を代表値として $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ を求めると、 $^{10}\text{B}/^{11}\text{B} = (2 \times 10^{15}) / (4 \times 10^{17}) = 1/200$ となり、自然界での比率(天然存在率)1/4に比較して、 ^{10}B の割合が大幅に低減していることがわかる。

[0035] (1) FT-IR測定結果

図4は、比較サンプルのHeイオン照射前、1回目、2回目の照射後にお

ける F T - I R 測定結果である。

図 4 から分かるように、 2500 cm^{-1} (0.305 eV)、 2800 cm^{-1} (0.347 eV) および 4100 cm^{-1} (0.507 eV) 付近に存在する電気伝導に関係する吸収ピークが、照射前（実線）の値から、1 回目照射後（波線）、2 回目照射後（一点鎖線）と、He イオンの照射量が増えるほど低下している。このことから、He イオンの照射量が多くなるほど、アクセプタ濃度が低くなることがわかる。

[0036] (2) ホール測定結果

図 5 は、比較サンプルの He イオン照射前、1 回目照射後、2 回目照射後におけるホール測定結果であり、キャリア濃度、移動度および比抵抗の変化を示す。

図 5 から分かるように、照射前の値から、1 回目照射後、2 回目照射後と、He イオンの照射量が増えるほど、キャリア濃度、移動度は下がり、比抵抗は上昇することがわかる。

[0037] (3) X 線回折 (XRD) 測定結果

図 6 は、X 線回折 (XRD) 法による、評価サンプルの Triple axis 高分解能ロッキングカーブ結晶性評価の結果である。

図 6 から分かるように、評価サンプルでは、He イオン照射前後においてダイヤモンド結晶に対するラマン散乱光のピーク位置は変化せず、He イオンを照射しても、結晶に歪めは生じないことがわかる。また、He イオン照射前後においてピーク波長の半値幅は殆ど変化せず、結晶の乱れも発生していないことがわかる。

[0038] (4) 紫外可視吸光 (UV/VIS) 測定結果

図 7 は、紫外可視吸光 (UV/VIS) 測定による評価サンプルの準位形成の評価結果である。横軸は吸収光の波長、縦軸は透過率 T である。評価は、He イオン照射前と、2 回目の照射後に行った。

図 7 から分かるように、He イオンを照射しても評価サンプルでは透過特性は殆ど変化せず、He イオン照射による欠陥の発生は殆ど無いことがわか

る。

[0039] このように、評価サンプルでは、Heイオンを照射しても、ダイヤモンド結晶の歪や結晶の乱れ、欠陥の発生が認められず、荷電粒子の衝突による特性の劣化は発生しない。これは、p型エピタキシャル層に含まれるホウ素の同位体の不純物濃度の比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) を天然存在比より小さくする（表面で $^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} = 1 / 200$ ）ことにより、上記式（2）に示す荷電粒子生成反応が抑制されているためと考えられる。

[0040] 一方、比較サンプルでは、1回目のイオン照射後においても、FT-IR測定でアクセプタ濃度の低下が、またホール測定でキャリア濃度および移動度の低下、比抵抗の上昇が見られる。このことから、通常のホウ素 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} = 1 / 4$: 天然存在比) をドーピング材料として使用した場合、中性子照射によりダイヤモンド半導体デバイスの性能に影響が生じていることがわかる。そして、ドーピングに用いるホウ素の割合を例えば $^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} = 1 / 200$ とすることで、この発生を50倍の中性子照射量まで遅らせることが可能となる。

[0041] （実施の形態2）

図8は、全体が300で表される、実施の形態2にかかるMIMSFET (Metal Insulator Metal Semiconductor FET) の断面図である。図1と同一符合は、同一または相当箇所を示す。MIMSFET 300では、単結晶Ib型のダイヤモンド基板1の上に、p⁺ダイヤモンドエピタキシャル層20が設けられている。エピタキシャル層20の上には、例えばTiからなる金属層21と、例えばAl₂O₃からなる絶縁層22が積層されている。さらに、絶縁層22の両側にはソース電極11とドレイン電極12とが設けられ、また、絶縁層22の上にはゲート電極13が設けられている。

[0042] 電界効果トランジスタ100と同様に、MIMSFET 300では、p⁺ダイヤモンドエピタキシャル層20はp型ドーパントとしてホウ素を含む。ホウ素は、自然界で安定な ^{10}B と ^{11}B からなり、その割合は自然界における割合1 : 4より小さく ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B} < 1 / 4$)、好ましくは1 : 19以下であ

り ($^{10}\text{B}/^{11}\text{B} \leq 1/19$)、より好ましくは $1/19$ 以下でかつ $1/200$ 以上であり、更に好ましくは約 $1:200$ ($^{10}\text{B}/^{11}\text{B} = 1/200$) となっている。

[0043] 実施の形態2にかかるMIMSFET300では、 p^+ ダイヤモンドエピタキシャル層20に含まれるホウ素中の ^{10}B の割合を天然存在比より低くすることにより、中性子が照射されても式(2)に示す荷電粒子生成反応が抑制され、電気特性の劣化を防止できる。

[0044] (実施の形態3)

図9は、全体が400で表される、実施の形態3にかかるショットキダイオードの断面図である。図1と同一符合は、同一または相当箇所を示す。ショットキダイオード400では、単結晶**1b**型のダイヤモンド基板**1**の上に、ダイヤモンドの**p**型導電層**30**、ダイヤモンドの高純度層**31**が積層されている。**p**型導電層**30**の上には、例えばAuからなるアノード電極**40**が設けられる。一方、高純度層**31**の上には、例えばMoやRuからなるカソード電極が設けられ、ショットキ接合を形成する。

[0045] ショットキダイオード400では、ダイヤモンドからなる**p**型導電層**30**は**p**型ドーパントとしてホウ素を含む。ホウ素は、自然界で安定な ^{10}B と ^{11}B からなり、その割合は自然界における割合 $1:4$ より小さく ($^{10}\text{B}/^{11}\text{B} < 1/4$)、好ましくは $1:19$ 以下 ($^{10}\text{B}/^{11}\text{B} \leq 1/19$) であり、より好ましくは $1/19$ 以下でかつ $1/200$ 以上であり、更に好ましくは約 $1:200$ ($^{10}\text{B}/^{11}\text{B} = 1/200$) となっている。

[0046] 実施の形態3にかかるショットキダイオード400では、**p**型導電層**30**に含まれるホウ素中の ^{10}B の割合を天然存在比より低くすることにより、中性子が照射されても式(2)に示す荷電粒子生成反応が抑制され、電気特性の劣化を防止できる。

[0047] 実施の形態1～3では、電界効果トランジスタ、MIMSFET、ショットキダイオードについて説明したが、本発明は、MISFET、MOSFET、バイポーラトランジスタ等、他の**p**型領域を有するダイヤモンド半導体

デバイスに適用することにより、デバイスの放射線特性を向上させることができる。

産業上の利用可能性

[0048] 高温、高放射線環境下で使用される半導体デバイス、特に原子炉格納容器内で使用されるBWR用原子炉格納容器モニタ（CAMS）、PWR用事故後監視計（伝送器、PAM）、起動系モニタ用前置増幅器、マルチプレクサ等として利用できる。

符号の説明

- [0049]
- 1 ダイヤモンド基板
 - 2 エピタキシャル層
 - 3 ソース領域
 - 4 ドレイン領域
 - 5 チャネル領域
 - 1 1 ソース電極
 - 1 2 ドレイン電極
 - 1 3 ゲート電極
 - 1 0 0 電界効果トランジスタ

請求の範囲

[請求項1]

ダイヤモンドからなる p 型領域を有し、
該 p 型領域の p 型不純物は、 ^{10}B と ^{11}B の 2 つの同位体を含むホウ素からなり、
該 p 型領域に含まれる該同位体の濃度の比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) は、該同位体の天然存在比より小さいことを特徴とするダイヤモンド半導体デバイス。

[請求項2]

ダイヤモンドの基板と、
該基板の上に設けられ、ドーパントとしてホウ素を含むダイヤモンドの活性層と、
該活性層中に設けられ、ドーパントとしてホウ素を含むダイヤモンドのソース領域およびドレイン領域と、
該ソース領域およびドレイン領域の上にそれぞれ設けられたソース電極およびドレイン電極と、
該ソース領域と該ドレイン領域で挟まれた該活性層からなるチャンネル領域の上に設けられたゲート電極とを含み、
該ソース領域、該ドレイン領域、および該活性層に含まれるホウ素は ^{10}B と ^{11}B の 2 つの同位体を含み、その濃度の比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) は該同位体の天然存在比より小さいことを特徴とするダイヤモンド半導体デバイス。

[請求項3]

ダイヤモンドの基板と、
該基板の上に設けられ、ドーパントとしてホウ素を含むダイヤモンドの導電性層と、
該導電性層の上に設けられたダイヤモンドの高純度層と、
該導電性層の上に設けられたアノード電極と、
該高純度層の上に設けられたカソード電極とを含み、
該導電性層に含まれるホウ素は ^{10}B と ^{11}B の 2 つの同位体を含み、その濃度の比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) は該同位体の天然存在比より小さい

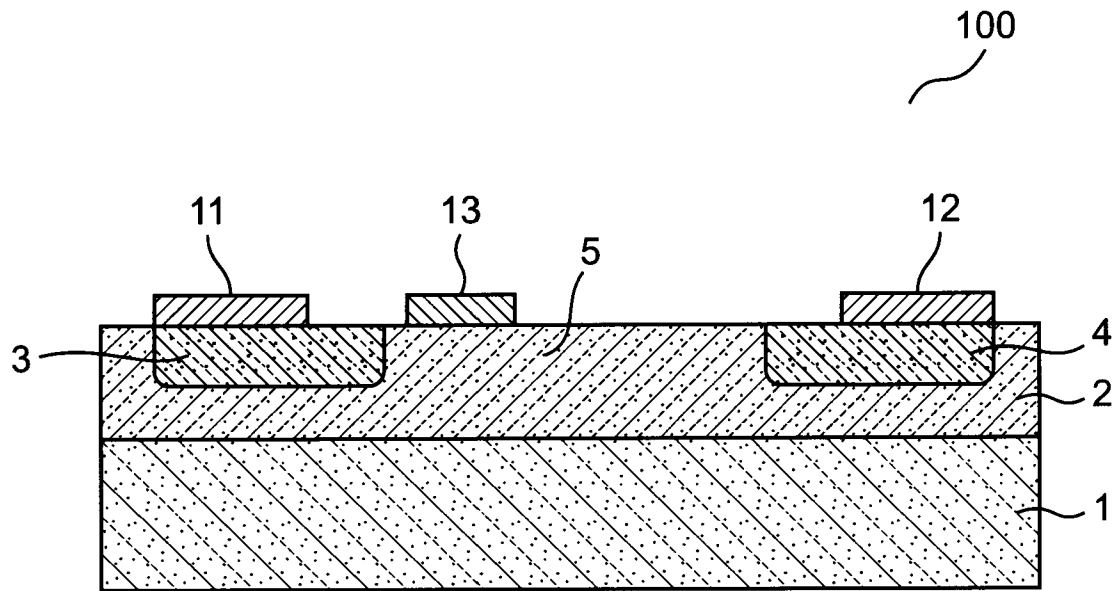
ことを特徴とするダイヤモンド半導体デバイス。

[請求項4] 上記同位体の濃度比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) は、 $1 / 19$ またはそれより小さいことを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載のダイヤモンド半導体デバイス。

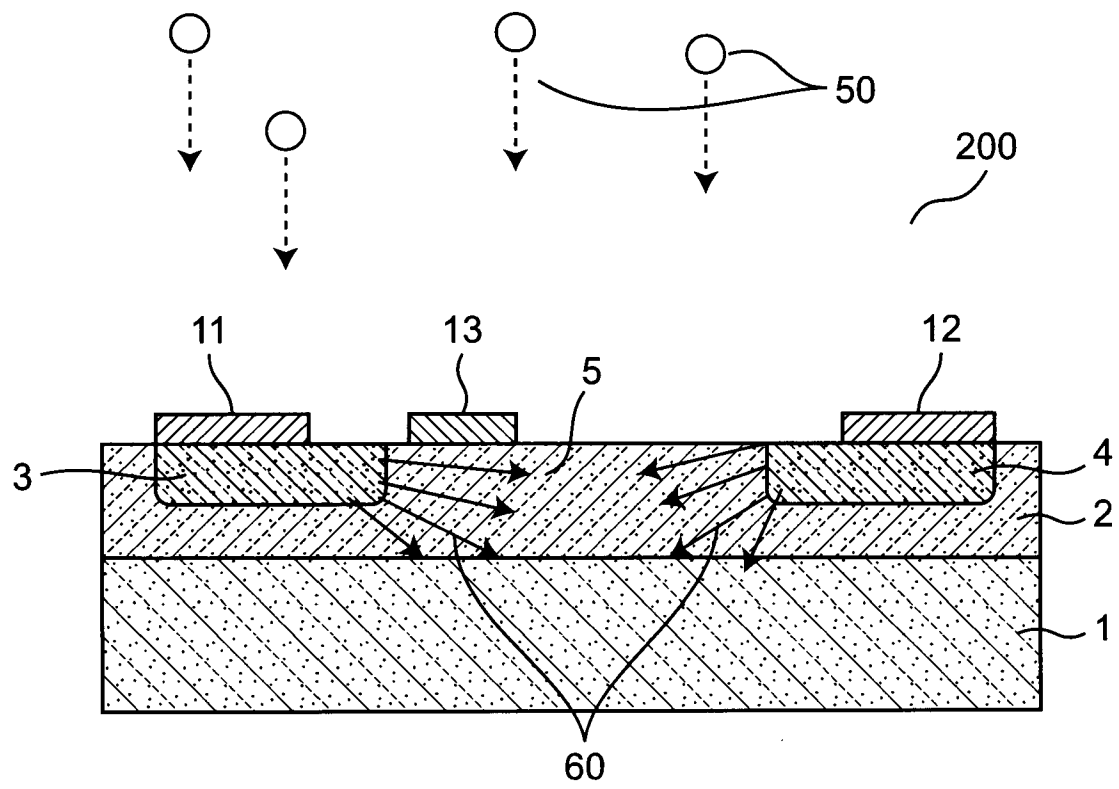
[請求項5] 上記同位体の濃度比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) は、 $1 / 200$ またはそれより小さいことを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載のダイヤモンド半導体デバイス。

[請求項6] 上記同位体の濃度比 ($^{10}\text{B} / ^{11}\text{B}$) は、 $1 / 19$ 以下でかつ $1 / 200$ 以上であることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載のダイヤモンド半導体デバイス。

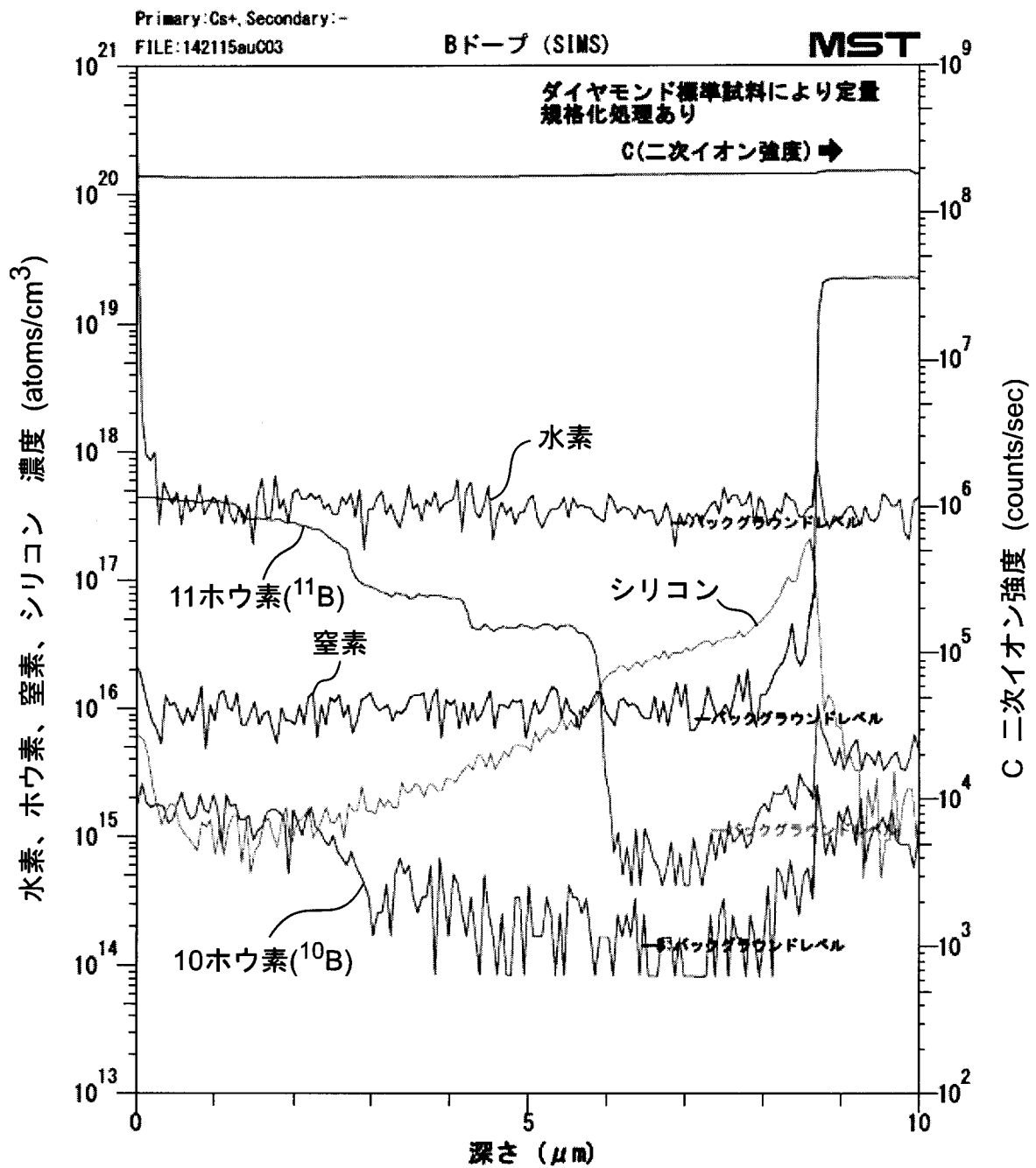
[図1]



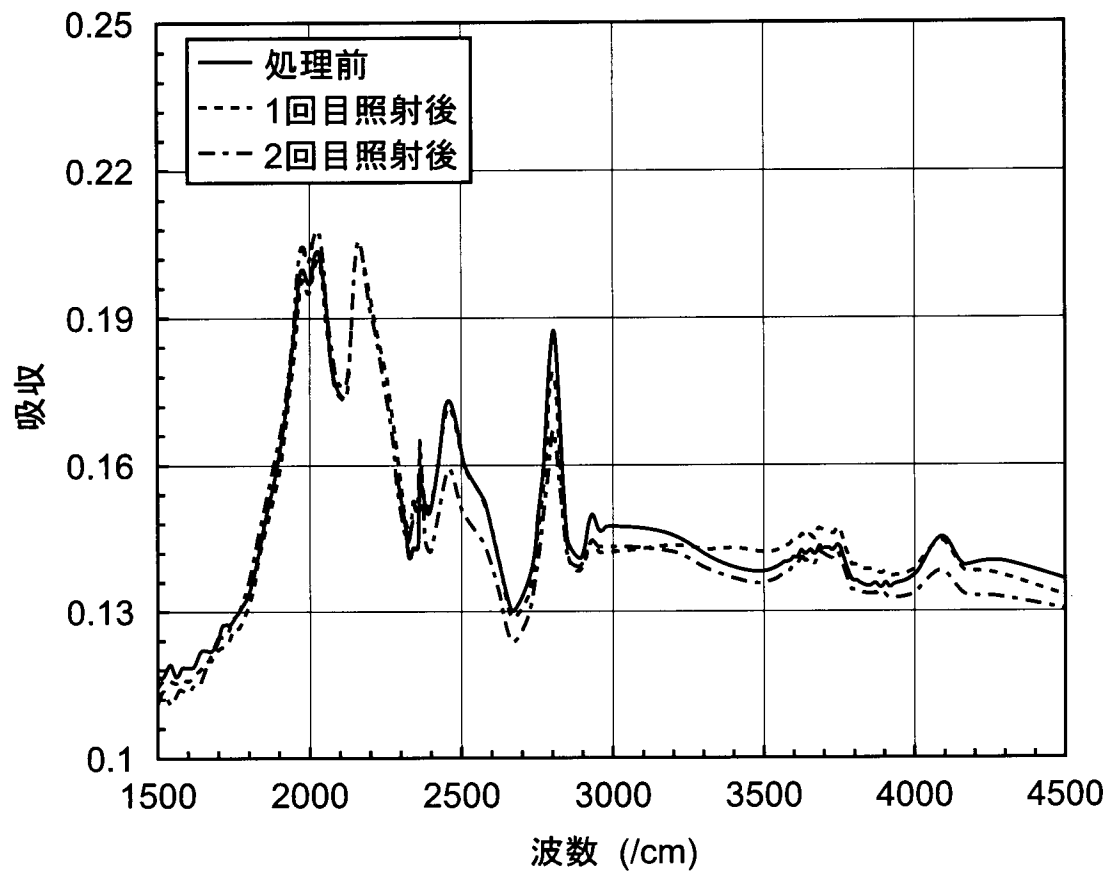
[図2]



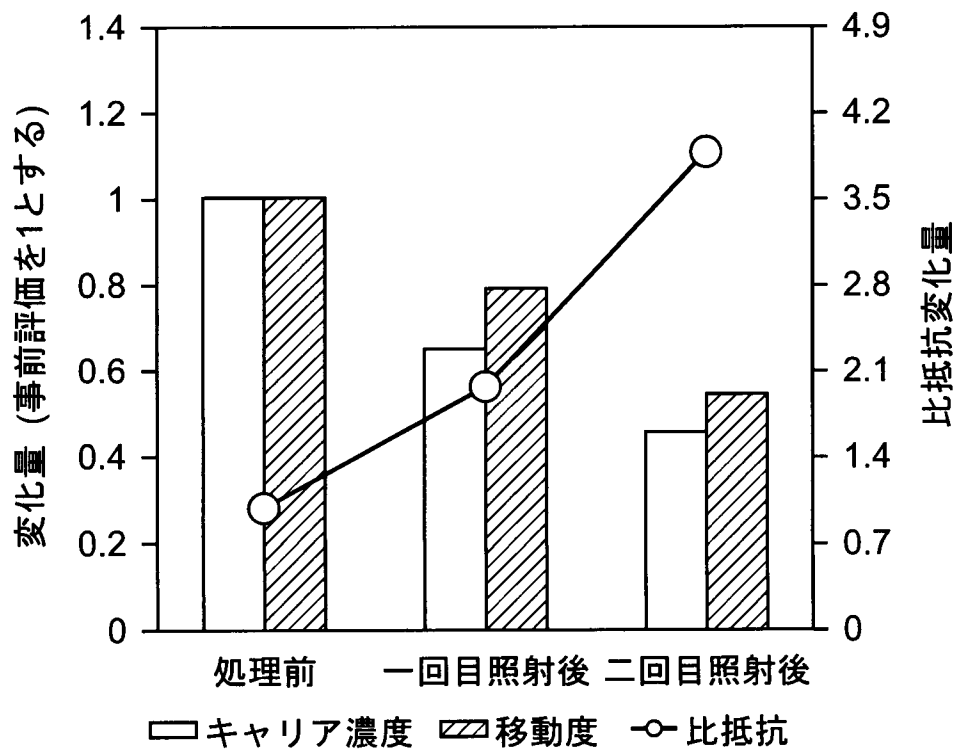
[図3]



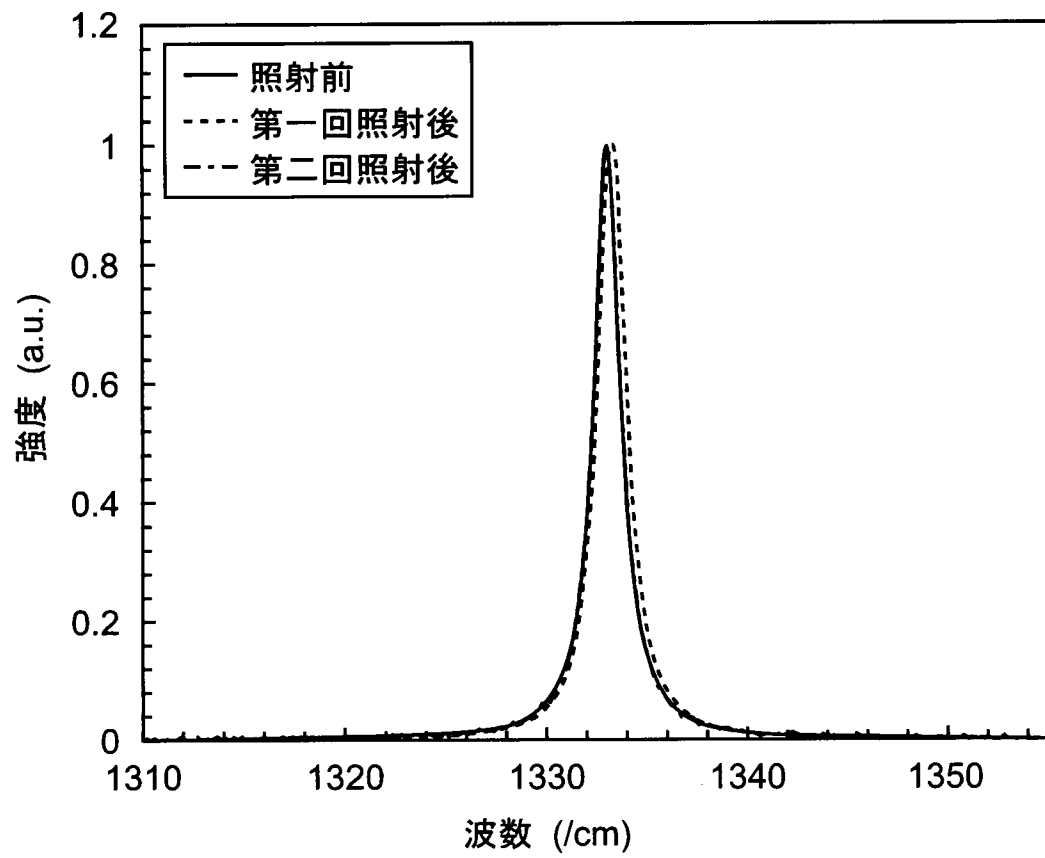
[図4]



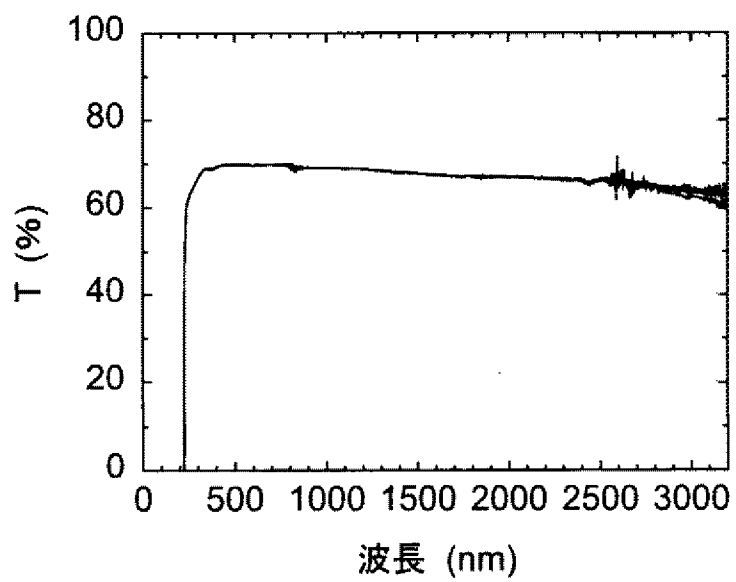
[図5]



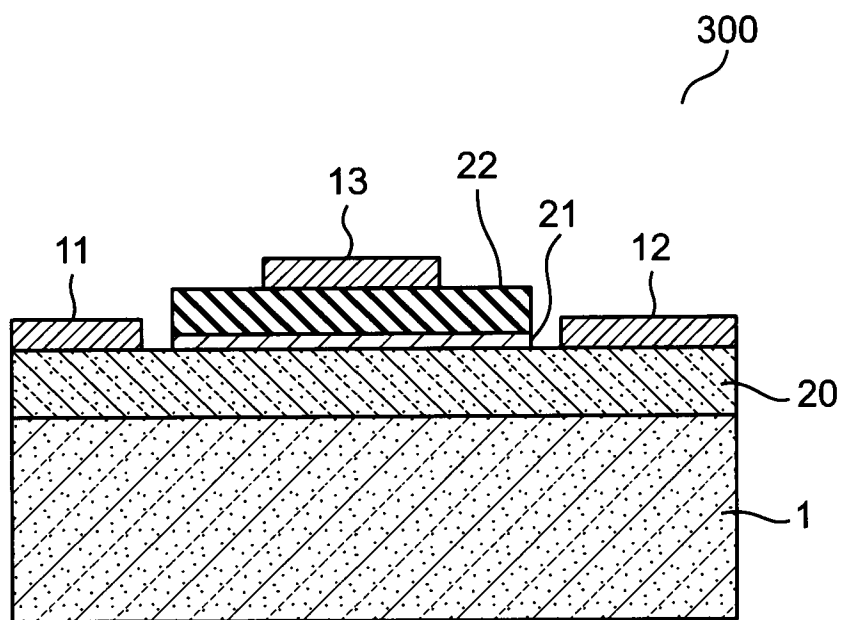
[図6]



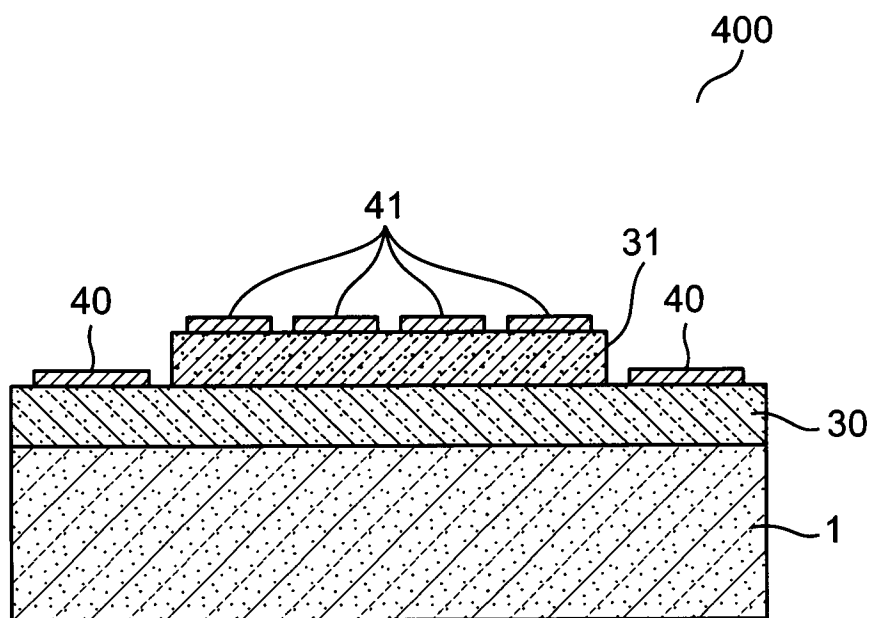
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/086187

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L21/338(2006.01)i, C01B31/06(2006.01)i, H01L21/205(2006.01)i,
H01L21/265(2006.01)i, H01L21/336(2006.01)i, H01L29/78(2006.01)i,
H01L29/812(2006.01)i, H01L29/872(2006.01)i

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)

H01L21/338, C01B31/06, H01L21/205, H01L21/265, H01L21/336, H01L29/78,
H01L29/812, H01L29/872

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 6-232050 A (Kobe Steel, Ltd.), 19 August 1994 (19.08.1994), paragraphs [0024] to [0043]; fig. 1 to 3 (Family: none)	1-6
Y	JP 60-183768 A (Hitachi, Ltd.), 19 September 1985 (19.09.1985), page 310, lower left column, line 12 to lower right column, line 17; page 312, upper right column, line 1 to page 313, upper left column, line 14; fig. 1, 3, 6, 7; table 1 & EP 155576 A1 page 7, upper 3 lines to page 15, upper 11 lines; fig. 1 to 4 & DE 3563151 D & CA 1213377 A	1-6

☒ 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

"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
28 January 2016 (28.01.16)

Date of mailing of the international search report
09 February 2016 (09.02.16)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/086187

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2013-540676 A (Advanced Technology Materials, Inc.), 07 November 2013 (07.11.2013), paragraphs [0039], [0075] to [0080] & US 2011/0159671 A1 paragraphs [0039], [0075] to [0080]; fig. 1 & WO 2011/056515 A2 & EP 2606004 A2 & TW 201219305 A & CN 103153858 A & KR 10-2013-0097758 A	4-6
A	JP 7-106267 A (Sony Corp.), 21 April 1995 (21.04.1995), paragraphs [0035] to [0039]; fig. 1 to 5 (Family: none)	1-3
A	JP 2004-79930 A (Toshiba Corp.), 11 March 2004 (11.03.2004), paragraphs [0017] to [0020]; fig. 1; table 1 (Family: none)	1-3
A	JP 2002-76369 A (Kobe Steel, Ltd.), 15 March 2002 (15.03.2002), paragraphs [0002], [0022], [0036], [0068] (Family: none)	1-3

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L21/338(2006.01)i, C01B31/06(2006.01)i, H01L21/205(2006.01)i, H01L21/265(2006.01)i, H01L21/336(2006.01)i, H01L29/78(2006.01)i, H01L29/812(2006.01)i, H01L29/872(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L21/338, C01B31/06, H01L21/205, H01L21/265, H01L21/336, H01L29/78, H01L29/812, H01L29/872

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 6-232050 A (株式会社神戸製鋼所) 1994.08.19, 段落 [0024]-[0043], 第1-3図 (ファミリーなし)	1-6
Y	JP 60-183768 A (株式会社日立製作所) 1985.09.19, 310 頁左下欄第 12 行-右下欄第 17 行, 312 頁右上欄第 1 行-313 頁左上欄 14 行, 第 1, 3, 6, 7 図, 第 1 表 & EP 155576 A1, 7 頁上 3 行-15 頁上 11 行, 図 1-4 & DE 3563151 D & CA 1213377 A	1-6
Y	JP 2013-540676 A (アドバンスド テクノロジー マテリアル, イ	4-6

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

28.01.2016

国際調査報告の発送日

09.02.2016

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

須原 宏光

5 F

6311

電話番号 03-3581-1101 内線 3516

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
	ンコーポレイテッド) 2013. 11. 07, 段落[0039], 段落[0075]-[0080] & US 2011/0159671 A1, 段落[0039], 段落[0075]-[0080], 図 1 & WO 2011/056515 A2 & EP 2606004 A2 & TW 201219305 A & CN 103153858 A & KR 10-2013-0097758 A	
A	JP 7-106267 A (ソニー株式会社) 1995. 04. 21, 段落[0035]-[0039], 図 1-5 (ファミリーなし)	1-3
A	JP 2004-79930 A (株式会社東芝) 2004. 03. 11, 段落[0017]-[0020], 第 1 図, 第 1 表 (ファミリーなし)	1-3
A	JP 2002-76369 A (株式会社神戸製鋼所) 2002. 03. 15, 段落[0002], [0022], [0036], [0068] (ファミリーなし)	1-3