

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6737800号  
(P6737800)

(45) 発行日 令和2年8月12日(2020.8.12)

(24) 登録日 令和2年7月20日(2020.7.20)

(51) Int.Cl.	F I
HO 1 L 21/338 (2006.01)	HO 1 L 29/80 H
HO 1 L 29/778 (2006.01)	HO 1 L 21/205
HO 1 L 29/812 (2006.01)	
HO 1 L 21/205 (2006.01)	

請求項の数 16 (全 24 頁)

(21) 出願番号 特願2017-548679 (P2017-548679)	(73) 特許権者 000004064 日本碍子株式会社 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号
(86) (22) 出願日 平成28年10月5日(2016.10.5)	(74) 代理人 100088672 弁理士 吉竹 英俊
(86) 国際出願番号 PCT/JP2016/079619	(74) 代理人 100088845 弁理士 有田 貴弘
(87) 国際公開番号 W02017/077806	(72) 発明者 市村 幹也 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内
(87) 国際公開日 平成29年5月11日(2017.5.11)	(72) 発明者 前原 宗太 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内
審査請求日 令和1年7月19日(2019.7.19)	
(31) 優先権主張番号 62/249,565	
(32) 優先日 平成27年11月2日(2015.11.2)	
(33) 優先権主張国・地域又は機関 米国 (US)	
(31) 優先権主張番号 特願2016-5164 (P2016-5164)	
(32) 優先日 平成28年1月14日(2016.1.14)	
(33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国 (JP)	

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体素子用エピタキシャル基板、半導体素子、および、半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ZnがドーパされたGaNからなる半絶縁性の自立基板と、  
前記自立基板に隣接してなり、厚み方向の少なくとも一部の範囲において $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でCをドーパしてなる13族窒化物層であるパuffers層と、  
前記パuffers層に隣接してなるチャネル層と、  
前記チャネル層を挟んで前記パuffers層とは反対側に設けられてなる障壁層と、  
を備え、  
前記パuffers層が、前記自立基板から前記チャネル層へのZnの拡散を抑制する拡散抑制層であり、  
前記チャネル層におけるZnの濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることを特徴とする、半導体素子用エピタキシャル基板。

【請求項2】

請求項1に記載の半導体素子用エピタキシャル基板であって、  
前記13族窒化物層がGaN層であることを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板。

【請求項3】

請求項1に記載の半導体素子用エピタキシャル基板であって、  
前記13族窒化物層が、相異なる組成の2以上の13族窒化物層が積層されてなりかつ前記2以上の13族窒化物層の少なくとも一つの層にCが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃

度でドーピングされてなる多層バッファ層、もしくは、2またはそれ以上の13族元素を含む13族窒化物からなりかつ13族元素の存在比率が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層である、

ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板。

【請求項4】

請求項1ないし請求項3のいずれかに記載の半導体素子用エピタキシャル基板であって、

前記チャンネル層はGaNからなり、前記障壁層はAlGaNからなる、  
ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板。

【請求項5】

請求項1ないし請求項4のいずれかに記載の半導体素子用エピタキシャル基板であって

前記バッファ層の厚みが50nm~1000nmである、  
ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板。

【請求項6】

ZnがドーピングされたGaNからなる半絶縁性の自立基板と、  
前記自立基板に隣接してなり、厚み方向の少なくとも一部の範囲において $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でCをドーピングしてなる13族窒化物層であるバッファ層と、  
前記バッファ層に隣接してなるチャンネル層と、  
前記チャンネル層を挟んで前記バッファ層とは反対側に設けられてなる障壁層と、  
前記障壁層の上に設けられてなるゲート電極、ソース電極、およびドレイン電極と、  
を備え、

前記バッファ層が、前記自立基板から前記チャンネル層へのZnの拡散を抑制する拡散抑制層であり、

前記チャンネル層におけるZnの濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、  
ことを特徴とする、半導体素子。

【請求項7】

請求項6に記載の半導体素子であって、  
前記13族窒化物層がGaN層である、  
ことを特徴とする半導体素子。

【請求項8】

請求項6に記載の半導体素子であって、  
前記13族窒化物層が、相異なる組成の2以上の13族窒化物層が積層されてなりかつ前記2以上の13族窒化物層の少なくとも一つの層にCが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーピングされてなる多層バッファ層、もしくは、2またはそれ以上の13族元素を含む13族窒化物からなりかつ13族元素の存在比率が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層である、  
ことを特徴とする半導体素子。

【請求項9】

請求項6ないし請求項8のいずれかに記載の半導体素子であって、  
前記チャンネル層はGaNからなり、前記障壁層はAlGaNからなる、  
ことを特徴とする半導体素子。

【請求項10】

請求項6ないし請求項9のいずれかに記載の半導体素子であって、  
前記バッファ層の厚みが50nm~1000nmである、  
ことを特徴とする半導体素子。

【請求項11】

半導体素子用のエピタキシャル基板を製造する方法であって、

- ZnがドーピングされたGaNからなる半絶縁性の自立基板を用意する準備工程と、
- 前記自立基板に隣接させてバッファ層を形成するバッファ層形成工程と、

c)前記バッファ層に隣接させてチャンネル層を形成するチャンネル層形成工程と、  
 d)前記チャンネル層を挟んで前記バッファ層とは反対側の位置に障壁層を形成する障壁層形成工程と、  
 を備え、

バッファ層形成工程においては、前記バッファ層を、厚み方向の少なくとも一部の範囲において $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でCをドーピングしてなる13族窒化物層にて形成することによって、前記バッファ層を、前記自立基板から前記チャンネル層へのZnの拡散を抑制する拡散抑制層とし、これによって、前記チャンネル層形成工程において形成される前記チャンネル層におけるZnの濃度を $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下とする、  
 ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法。

10

【請求項12】

請求項11に記載の半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法であって、  
 前記13族窒化物層をGaNにて形成する、  
 ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法。

【請求項13】

請求項11に記載の半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法であって、  
 前記13族窒化物層を、少なくとも一つの層にCを $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーピングしつつ異なる組成の2以上の13族窒化物層を積層することによって多層バッファ層として形成するか、もしくは、2またはそれ以上の13族元素を含む13族窒化物からなりかつ13族元素の存在比率が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層として形成する、  
 ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法。

20

【請求項14】

請求項11ないし請求項13のいずれかに記載の半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法であって、  
 前記チャンネル層はGaNにて形成され、前記障壁層はAlGaNにて形成される、  
 ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法。

【請求項15】

請求項11ないし請求項14のいずれかに記載の半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法であって、  
前記バッファ層を50nm～1000nmの厚みに形成する、  
ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法。

30

【請求項16】

請求項11ないし請求項15のいずれかに記載の半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法であって、  
 前記自立基板はフラックス法で作製される、  
 ことを特徴とする半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体素子に関し、特に、半絶縁性のGaNからなる自立基板を用いて構成される半導体素子に関する。

40

【背景技術】

【0002】

窒化物半導体は、直接遷移型の広いバンドギャップを有し、高い絶縁破壊電界、高い飽和電子速度を有することから、LEDやLDなどの発光デバイスや、高周波/ハイパワーの電子デバイス用半導体材料として利用されている。

【0003】

窒化物電子デバイスの代表的な構造として、AlGaNを「障壁層」、GaNを「チャンネル層」として積層形成した高電子移動度トランジスタ(HEMT)構造がある。これは

50

、窒化物材料特有の大きな分極効果（自発分極効果とピエゾ分極効果）により AlGa<sub>n</sub>N / GaN 積層界面に高濃度の 2 次元電子ガスが生成するという特徴を活かしたものである。

【0004】

窒化物電子デバイスは、一般的に、サファイア、SiC、Si といった、商業的に入手の容易な異種材料下地基板を用いて作製されている。しかしながら、これら異種材料基板上にヘテロエピタキシャル成長させた GaN 膜中には、GaN と異種材料基板との間の格子定数や熱膨張係数の差異に起因して、多数の欠陥が発生してしまうという問題がある。

【0005】

一方、GaN 基板上に GaN 膜を Homo エピタキシャル成長させた場合、上述の格子定数や熱膨張係数の差異に起因する欠陥は発生せず、GaN 膜は良好な結晶性を示す。

10

【0006】

それゆえ、GaN 基板上に窒化物 HEMT 構造を作製した場合、AlGa<sub>n</sub>N / GaN 積層界面に存在する 2 次元電子ガスの移動度が向上するので、当該構造を用いて作製する HEMT 素子（半導体素子）の特性向上が期待できる。

【0007】

ただし、商業的に入手が可能である、ハイドライド気相成長法（HVPE 法）にて作製された GaN 基板は、一般的には、結晶内に取り込んだ酸素不純物のため n 型の伝導型を呈する。導電性の GaN 基板は、HEMT 素子を高電圧駆動した際に、ソース - ドレイン電極間のリーク電流経路となる。そのため、HEMT 素子を作製するには、半絶縁性の GaN 基板の利用が望ましい。

20

【0008】

半絶縁性 GaN 基板を実現するためには、遷移金属元素（例えば Fe）や 2 族元素（例えば Mg）のような深いアクセプター準位を形成する元素を GaN 結晶中にドーピングすることが有効と知られている。

【0009】

2 族元素のうち、亜鉛元素（Zn）を選択することで、高品質な半絶縁性 GaN 単結晶基板を実現できることが、すでに公知である（例えば、特許文献 1 参照）。GaN 結晶中の Zn 元素の拡散についてはすでに調査がなされており、高温雰囲気にて拡散は生じ、かつ、拡散のしやすさは GaN 結晶の結晶性に依存する（例えば、非特許文献 4 参照）。また、基板上に遷移金属元素である鉄（Fe）がドーピングされた高抵抗層を形成し、さらに、該高抵抗層と電子走行層との間に Fe の取り込み効果の高い中間層を形成することにより、電子走行層への Fe の入り込みを防ぐ態様もすでに公知である（例えば、特許文献 2 参照）。

30

【0010】

半絶縁性 GaN 基板上に、または、半絶縁性 GaN 膜付き基板上に、HEMT 構造を作製し、諸特性を評価することはすでになされている（例えば、非特許文献 1 ないし非特許文献 3 参照）。

【0011】

遷移金属元素や 2 族元素をドーピングしてなる半絶縁性 GaN 単結晶基板の上に GaN 膜をエピタキシャル成長させて半導体素子用のエピタキシャル基板を形成する場合、Fe、Mg、Zn などのアクセプター元素が GaN 膜中に拡散し、膜中において電子トラップ（electron-trap）として作用するために、電流コラプス（current collapse）現象が発生してしまうという問題がある。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0012】

【特許文献 1】特許第 5039813 号公報

【特許文献 2】特開 2013 - 74211 号公報

【非特許文献】

50

## 【 0 0 1 3 】

【非特許文献1】Yoshinori Oshimura, Takayuki Sugiyama, Kenichiro Takeda, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, and Hiroshi Amano, "AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors on Fe-Doped GaN Substrates with High Breakdown Voltage", Japanese Journal of Applied Physics, vol.50 (2011), p.084102-1-p.084102-5.

【非特許文献2】V. Desmaris, M. Rudzinski, N. Rorsman, P.R. Hageman, P.K. Larsen, H. Zirath, T.C. Rodle, and H.F.F. Jos, "Comparison of the DC and Microwave Performance of AlGaIn/GaN HEMTs Grown on SiC by MOCVD With Fe-Doped or Unintentionally Doped GaN Buffer Layers", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.53, No.9, pp.2413-2417, September 2006.

【非特許文献3】M. Azize, Z. Bougrioua, and P. Gibart, "Inhibition of interface pollution in AlGaIn/GaN HEMT structures regrown on semi-insulating GaN templates", Journal of Crystal Growth, vol.299 (2007), p.103-p.108.

【非特許文献4】T. Suzuki, J. Jun, M. Leszczynski, H. Teisseyre, S. Strite, A. Rockett, A. Pelzmann, M. Camp, and K. J. Ebeling, "Optical activation and diffusivity of ion-implanted Zn acceptors in GaN under high-pressure, high-temperature annealing", Journal of Applied Physics, Vol.84 (1998), No.2, pp.1155-1157.

## 【発明の概要】

## 【 0 0 1 4 】

本発明は上記課題に鑑みてなされたものであり、電流コラプスの発生が抑制されてなる半導体素子用のエピタキシャル基板を提供することを目的とする。

## 【 0 0 1 5 】

上記課題を解決するため、本発明の第1の態様は、半導体素子用エピタキシャル基板が、ZnがドーパされたGaNからなる半絶縁性の自立基板と、前記自立基板に隣接してなり、厚み方向の少なくとも一部の範囲において $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でCをドーピングしてなる13族窒化物層であるバッファ層と、前記バッファ層に隣接してなるチャネル層と、前記チャネル層を挟んで前記バッファ層とは反対側に設けられてなる障壁層と、を備え、前記バッファ層が、前記自立基板から前記チャネル層へのZnの拡散を抑制する拡散抑制層であり、前記チャネル層におけるZnの濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ようにした。

## 【 0 0 1 6 】

本発明の第2の態様は、第1の態様に係る半導体素子用エピタキシャル基板において、前記13族窒化物層がGaN層である、ようにした。

## 【 0 0 1 7 】

本発明の第3の態様は、第1の態様に係る半導体素子用エピタキシャル基板において、前記13族窒化物層が、相異なる組成の2以上の13族窒化物層が積層されてなりかつ前記2以上の13族窒化物層の少なくとも一つの層にCが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーピングされてなる多層バッファ層、もしくは、2またはそれ以上の13族元素を含む13族窒化物からなりかつ13族元素の存在比率が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層である、ようにした。

## 【 0 0 1 8 】

本発明の第4の態様は、第1ないし第3の態様のいずれかに係る半導体素子用エピタキシャル基板において、前記チャネル層はGaNからなり、前記障壁層はAlGaNからなる、ようにした。

本発明の第5の態様は、第1ないし第4の態様のいずれかに係る半導体素子用エピタキシャル基板において、前記バッファ層の厚みが50nm~1000nmである、ようにした。

## 【 0 0 1 9 】

本発明の第6の態様は、半導体素子が、ZnがドーパされたGaNからなる半絶縁性の

自立基板と、前記自立基板に隣接してなり、厚み方向の少なくとも一部の範囲において  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度でCをドーピングしてなる13族窒化物層であるバッファ層と、前記バッファ層に隣接してなるチャンネル層と、前記チャンネル層を挟んで前記バッファ層とは反対側に設けられてなる障壁層と、前記障壁層の上に設けられてなるゲート電極、ソース電極、およびドレイン電極と、を備え、前記バッファ層が、前記自立基板から前記チャンネル層へのZnの拡散を抑制する拡散抑制層であり、前記チャンネル層におけるZnの濃度が  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以下である、ようにした。

【0020】

本発明の第7の態様は、第6の態様に係る半導体素子において、前記13族窒化物層がGaN層である、ようにした。

10

【0021】

本発明の第8の態様は、第6の態様に係る半導体素子において、前記13族窒化物層が、相異なる組成の2以上の13族窒化物層が積層されてなりかつ前記2以上の13族窒化物層の少なくとも一つの層にCが  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度でドーピングされてなる多層バッファ層、もしくは、2またはそれ以上の13族元素を含む13族窒化物からなりかつ13族元素の存在比率が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層である、ようにした。

【0022】

本発明の第9の態様は、第6ないし第8の態様のいずれかに係る半導体素子において、前記チャンネル層はGaNからなり、前記障壁層はAlGaNからなる、ようにした。

20

本発明の第10の態様は、第6ないし第9の態様に係る半導体素子において、前記バッファ層の厚みが50nm~1000nmである、ようにした。

【0023】

本発明の第11の態様は、半導体素子用のエピタキシャル基板を製造する方法が、a) ZnがドーピングされたGaNからなる半絶縁性の自立基板を用意する準備工程と、b) 前記自立基板に隣接させてバッファ層を形成するバッファ層形成工程と、c) 前記バッファ層に隣接させてチャンネル層を形成するチャンネル層形成工程と、d) 前記チャンネル層を挟んで前記バッファ層とは反対側の位置に障壁層を形成する障壁層形成工程と、を備え、バッファ層形成工程においては、前記バッファ層を、厚み方向の少なくとも一部の範囲において  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度でCをドーピングしてなる13族窒化物層にて形成することによって、前記バッファ層を、前記自立基板から前記チャンネル層へのZnの拡散を抑制する拡散抑制層とし、これによって、前記チャンネル層形成工程において形成される前記チャンネル層におけるZnの濃度を  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以下とする、ようにした。

30

【0024】

本発明の第12の態様は、第11の態様に係る半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法において、前記13族窒化物層はGaNにて形成される、ようにした。

【0025】

本発明の第13の態様は、第11の態様に係る半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法において、前記13族窒化物層を、少なくとも一つの層にCを  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度でドーピングしつつ相異なる組成の2以上の13族窒化物層を積層することによって多層バッファ層として形成するか、もしくは、2またはそれ以上の13族元素を含む13族窒化物からなりかつ13族元素の存在比率が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層として形成する、ようにした。

40

【0026】

本発明の第14の態様は、第11ないし第13の態様のいずれかに係る半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法において、前記チャンネル層はGaNにて形成され、前記障壁層はAlGaNにて形成される、ようにした。

本発明の第15の態様は、第11ないし第14の態様のいずれかに係る半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法において、前記バッファ層を50nm~1000nmの厚みに形成する、ようにした。

50

## 【0027】

本発明の第16の態様は、第11ないし第15の態様のいずれかに係る半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法において、前記自立基板はフラックス法で作製される、ようにした。

## 【0028】

本発明の第1ないし第16の態様によれば、半絶縁性のGaN自立基板を用いつつ、電流コラプスが低減された半導体素子が実現できる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0029】

【図1】HEMT素子20の断面構造を、模式的に示す図である。

10

【図2】実施例1に係るエピタキシャル基板におけるZn元素、C元素の濃度プロファイルを示す図である。

【図3】図2のうち、GaNバッファ層とGaN基板の界面近傍における拡大図である。

【図4】比較例1に係るエピタキシャル基板におけるZn元素、C元素の濃度プロファイルを示す図である。

【図5】図4のうち、CドーパGaNバッファ層とGaN基板の界面近傍における拡大図である。

【図6】実施例7における、障壁層4の表面から深さ方向におけるZn元素とC元素の濃度プロファイルを示す図である。

【図7】実施例8における、障壁層4の表面から深さ方向におけるZn元素とC元素の濃度プロファイル、および、Al元素の二次イオン信号プロファイルを示す図である。

20

## 【発明を実施するための形態】

## 【0030】

本明細書中に示す周期表の族番号は、1989年国際純正応用化学連合会(International Union of Pure Applied Chemistry: IUPAC)による無機化学命名法改訂版による1~18の族番号表示によるものであり、13族とはアルミニウム(Al)・ガリウム(Ga)・インジウム(In)等を指し、14族とは、シリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、スズ(Sn)、鉛(Pb)等を指し、15族とは窒素(N)・リン(P)・ヒ素(As)・アンチモン(Sb)等を指す。

30

## 【0031】

<エピタキシャル基板およびHEMT素子の概要>

図1は、本発明に係る半導体素子用エピタキシャル基板の一実施形態としてのエピタキシャル基板10を含んで構成される、本発明に係る半導体素子の一実施形態としてのHEMT素子20の断面構造を、模式的に示す図である。

## 【0032】

エピタキシャル基板10は、自立基板1と、バッファ層2と、チャンネル層3と、障壁層4とを備える。また、HEMT素子20は、エピタキシャル基板10の上に(障壁層4の上に)ソース電極5とドレイン電極6とゲート電極7とを設けたものである。なお、図1における各層の厚みの比率は、実際のものを反映したものではない。

40

## 【0033】

自立基板1は、Znが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上ドーパされた(0001)面方位のGaN基板であり、室温における比抵抗が $1 \times 10^2 \text{ cm}$ 以上であって半絶縁性を呈する。自立基板1のサイズに特に制限はないが、ハンドリング(把持、移動など)の容易さなどを考慮すると、数百 $\mu\text{m}$ ~数mm程度の厚みを有するのが好適である。係る自立基板1は、例えば、フラックス(Flux)法によって作製することができる。

## 【0034】

フラックス法による自立基板1の形成は、概略、耐圧容器内に水平回転自在に配置した育成容器(アルミナるつぼ)内で金属Ga、金属Na、金属Zn、C(炭素)を含む融液に種基板を浸漬し、育成容器を水平回転させた状態で、窒素ガスを導入しながら育成容器

50

内を所定温度および所定圧力を保つことによって種基板に形成されるGaN単結晶を、種基板から分離することによって得られる。種基板としては、サファイア基板上にMOCVD法によってGaN薄膜を形成してなるいわゆるテンプレート基板などを好適に用いることができる。

【0035】

バッファ層2は、自立基板1の一方主面上に（隣接）形成されてなる、50nm～1000nm程度の厚みを有する層である。本実施の形態において、バッファ層2は、いわゆる800未満の低温で形成されるいわゆる低温バッファ層とは異なり、チャンネル層3や障壁層4の形成温度と同程度の温度で形成されるものである。

【0036】

本実施の形態に係るエピタキシャル基板10において、バッファ層2は、自立基板1にドーピングされてなるZnがエピタキシャル基板10の作製時にチャンネル層3さらにはその上方の障壁層4へと拡散することを抑制する、拡散抑制層として設けられてなる。バッファ層2は、厚み方向の少なくとも一部の範囲において $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でCがドーピングされた13族窒化物からなる層にて構成するのが好適な一例である。

【0037】

係る場合、バッファ層2は、全体が一の13族窒化物からなる単一層にCが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーピングされてなるものであってもよいし、組成の相異なる2以上の13族窒化物層からなる多層バッファ層の少なくとも一つの層にCが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーピングされてなるものであってもよい。単一層としては、全体がGaNからなるGaNバッファ層（CドーピングGaN層）などが例示される。多層バッファ層としては例えば、 $\text{Al}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$ 層（ $0 < a < 1$ ）の上にCドーピングGaN層が積層された構成などが例示される。あるいは、バッファ層2は、2またはそれ以上の13族元素（例えばGaとAl）を含む13族窒化物からなり、かつ各元素の存在比率（モル分率）が厚み方向において変化する組成傾斜バッファ層の、厚み方向の少なくとも一部の範囲において、Cが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーピングされてなることにより、設けられていてもよい。バッファ層2のもたらす効果については後述する。

【0038】

あるいは、AlがドーピングされたGaNからなる層（AlドーピングGaN層）や、AlNからなる層にてバッファ層2を構成する態様であってもよい。これらの層についても、CドーピングGaN層と同様、拡散抑制層として機能する。

【0039】

チャンネル層3は、バッファ層2の上に（隣接）形成されてなる層である。チャンネル層3は、50nm～5000nm程度の厚みに形成される。また、障壁層4は、チャンネル層3を挟んでバッファ層2とは反対側に設けられてなる層である。障壁層4は、2nm～40nm程度の厚みに形成される。

【0040】

障壁層4は図1に示すようにチャンネル層3に隣接して形成されてもよく、この場合、両層の界面はヘテロ接合界面となる。あるいは、チャンネル層3と障壁層4の間に図示しないスペーサ層が設けられてもよく、この場合、チャンネル層3とスペーサ層との界面から障壁層4とスペーサ層との界面にいたる領域がヘテロ接合界面領域となる。

【0041】

いずれの場合も、チャンネル層3がGaNにて形成され、障壁層4が $\text{AlGa}_x\text{N}$ （ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $0 < x < 1$ ）ないし $\text{InAl}_y\text{N}$ （ $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$ 、 $0 < y < 1$ ）にて形成されるのが好適な一例である。ただし、チャンネル層3と障壁層4の組み合わせはこれに限られるものではない。

【0042】

バッファ層2、チャンネル層3、および、障壁層4の形成は、例えばMOCVD法によって実現される。MOCVD法による層形成は、例えばバッファ層2およびチャンネル層3がGaNにて形成され、障壁層4が $\text{AlGa}_x\text{N}$ にて形成される場合であれば、Ga、Alに

10

20

30

40

50

ついで、有機金属(MO)原料ガス(TMGe、TMA)と、アンモニアガスと、水素ガスと、窒素ガスとをリアクタ内に供給可能に構成されてなる公知のMOCVD炉を用い、リアクタ内に載置した自立基板1を所定温度に加熱しつつ、各層に対応した有機金属原料ガスとアンモニアガスとの気相反応によって生成するGaN結晶やAlGaN結晶を自立基板1上に順次に堆積させることによって行える。

#### 【0043】

ソース電極5とドレイン電極6とは、それぞれに十数nm~百数十nm程度の厚みを有する金属電極である。ソース電極5とドレイン電極6とは、例えば、Ti/Al/Ni/Auからなる多層電極として形成されるのが好適である。ソース電極5およびドレイン電極6は、障壁層4との間にオーミック性接触を有してなる。ソース電極5およびドレイン電極6は、真空蒸着法とフォトリソグラフィプロセスとにより形成されるのが好適な一例である。なお、両電極のオーミック性接触を向上させるために、電極形成後、650~1000の間の所定温度の窒素ガス雰囲気中において数十秒間の熱処理を施すのが好ましい。

10

#### 【0044】

ゲート電極7は、十数nm~百数十nm程度の厚みを有する金属電極である。ゲート電極7は、例えば、Ni/Auからなる多層電極として構成されるのが好適である。ゲート電極7は、障壁層4との間にショットキー性接触を有してなる。ゲート電極7は、真空蒸着法とフォトリソグラフィプロセスとにより形成されるのが好適な一例である。

20

#### 【0045】

<エピタキシャル基板およびHEMT素子の作製方法>

(自立基板の作製)

まず、フラックス法による自立基板1の作製手順について説明する。

#### 【0046】

初めに、作製したい自立基板1の直径と同程度の直径を有するc面サファイア基板を用意し、その表面に、450~750の温度にてGaN低温パフア層を10nm~50nm程度の厚みに成膜し、その後、厚さ1μm~10μm程度のGaN薄膜を1000~1200の温度にてMOCVD法により成膜し、種基板として利用可能なMOCVD-GaNテンプレートを得る。

30

#### 【0047】

次に、得られたMOCVD-GaNテンプレートを種基板として、Naフラックス法を用いてZnドープGaN単結晶層を形成する。

#### 【0048】

具体的には、まず、アルミナるつぼ内にMOCVD-GaNテンプレートを載置し、続いて、該アルミナるつぼ内に、金属Gaを10g~60g、金属Naを15g~90g、金属Znを0.1g~5g、Cを10mg~500mg、それぞれ充填する。

#### 【0049】

係るアルミナるつぼを加熱炉に入れ、炉内温度を800~950とし、炉内圧力を3MPa~5MPaとして、20時間~400時間程度加熱し、その後、室温まで冷却する。冷却終了後、アルミナるつぼを炉内から取り出す。以上の手順により、MOCVD-GaNテンプレートの表面に、褐色のGaNの単結晶層が300μm~3000μmの厚さで堆積する。

40

#### 【0050】

このようにして得られたGaN単結晶層を、ダイヤモンド砥粒を用いて研磨し、その表面を平坦化させる。これにより、MOCVD-GaNテンプレートの上にGaN単結晶層が形成されたFlux-GaNテンプレートが得られる。ただし、研磨は、Flux-GaNテンプレートにおける窒化物層の総厚が最終的に得たい自立基板1の狙いの厚みよりも十分に大きい値に保たれる範囲で行う。

#### 【0051】

次いで、レーザーリフトオフ法により、種基板の側からレーザー光を0.1mm/秒~

50

100 mm / 秒の走査速度で走査しつつ照射することによって、Flux - GaNテンプレートから種基板を分離する。レーザー光としては、例えば、波長355 nmのNd : YAGの3次高調波を用いるのが好適である。係る場合、パルス幅は1 ns ~ 1000 ns、パルス周期は1 kHz ~ 200 kHz程度であればよい。照射に際しては、レーザー光を適宜に集光して、光密度を調整するのが好ましい。また、レーザー光の照射は、Flux - GaNテンプレートを種基板と反対側から30 ~ 600 程度の温度で加熱しつつ行うのが好ましい。

#### 【0052】

種基板を分離した後、得られた積層構造体の種基板から剥離された側の面を研磨処理する。これにより、Znが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーブされたGaNからなる自立基板1が得られる。

10

#### 【0053】

(エピタキシャル基板の作製)

続いて、MOCVD法によるエピタキシャル基板10の作製について説明する。エピタキシャル基板10は、自立基板1をMOCVD炉のリアクタ内に設けられたサセプタ上に載置した状態で、下記の条件にてバッファ層2、チャンネル層3、および障壁層4をこの順にて積層形成することで得られる。ただし、バッファ層2については、単一のGaNバッファ層、または、13族元素としてGaおよびAlを含む多層バッファ層あるいは組成傾斜バッファ層を形成する場合について例示する。なお、形成温度とはサセプタ加熱温度を意味する。

20

#### 【0054】

なお、本実施の形態において、15族 / 13族ガス比とは、13族(Ga、Al、In)原料であるTMG(トリメチルガリウム)、TMA(トリメチルアルミニウム)、およびTMI(トリメチルインジウム)の総供給量に対する15族(N)原料であるアンモニアの供給量の比(モル比)である。また、障壁層4をAlGaNにて形成する場合のAl原料ガス / 13族原料ガス比とは、Al原料の供給量の13族(Ga、Al)原料全体の供給量に対する比(モル比)であり、障壁層4をInAlNにて形成する場合のIn原料ガス / 13族原料ガス比とは、In原料の供給量の13族(In、Al)原料全体の供給量に対する比(モル比)である。ともに、所望する障壁層4の組成(A1モル比xもしくはIn組成比y)に応じて定められる。

30

#### 【0055】

バッファ層2 :

形成温度 = 900 ~ 1100 ;

リアクタ内圧力 = 5 kPa ~ 30 kPa ;

キャリアガス = 水素 ;

15族 / 13族ガス比 = 100 ~ 4000 ;

Al原料ガス / 13族原料ガス比 = 0 (GaNバッファ層の場合) ;

Al原料ガス / 13族原料ガス比 = 0 ~ 1の範囲で厚み方向における位置に応じて

(多層バッファ層または組成傾斜バッファ層の場合)。

#### 【0056】

チャンネル層3 :

形成温度 = 1000 ~ 1200 ;

リアクタ内圧力 = 15 kPa ~ 105 kPa ;

キャリアガス = 水素 ;

15族 / 13族ガス比 = 1000 ~ 10000。

#### 【0057】

障壁層4 (AlGaNにて形成する場合) :

形成温度 = 1000 ~ 1200 ;

リアクタ内圧力 = 1 kPa ~ 30 kPa ;

15族 / 13族ガス比 = 5000 ~ 20000 ;

50

キャリアガス = 水素 ;

A 1 原料ガス / 1 3 族原料ガス比 = 0 . 1 ~ 0 . 4 。

【 0 0 5 8 】

障壁層 4 ( I n A 1 N にて形成する場合 ) :

形成温度 = 7 0 0 ~ 9 0 0 ;

リアクタ内圧力 = 1 k P a ~ 3 0 k P a ;

1 5 族 / 1 3 族ガス比 = 2 0 0 0 ~ 2 0 0 0 0 ;

キャリアガス = 窒素 ;

I n 原料ガス / 1 3 族原料ガス比 = 0 . 1 ~ 0 . 9 。

【 0 0 5 9 】

( H E M T 素子の作製 )

エピタキシャル基板 1 0 を用いた H E M T 素子 2 0 の作製は、公知の技術を適用することで実現可能である。

【 0 0 6 0 】

例えば、フォトリソグラフィプロセスと R I E ( Reactive Ion Etching ) 法を用いて個々の素子の境界となる部位を 5 0 n m ~ 1 0 0 0 n m 程度までエッチングで除去する素子分離処理を行った後、エピタキシャル基板 1 0 の表面 ( 障壁層 4 の表面 ) に厚さ 5 0 n m ~ 5 0 0 n m の S i O <sub>2</sub> 膜を形成し、続いてフォトリソグラフィを用いてソース電極 5 およびドレイン電極 6 の形成予定箇所の S i O <sub>2</sub> 膜をエッチング除去することで、S i O <sub>2</sub> パターン層を得る。

【 0 0 6 1 】

次いで、真空蒸着法とフォトリソグラフィプロセスとを用い、ソース電極 5 およびドレイン電極 6 の形成予定箇所に T i / A l / N i / A u からなる金属パターンを形成することで、ソース電極 5 およびドレイン電極 6 を形成する。それぞれの金属層の厚みは、順に 5 n m ~ 5 0 n m 、 4 0 n m ~ 4 0 0 n m 、 4 n m ~ 4 0 n m 、 および、 2 0 n m ~ 2 0 0 n m とするのが好適である。

【 0 0 6 2 】

その後、ソース電極 5 およびドレイン電極 6 のオーミック性を良好なものにするために、 6 0 0 ~ 1 0 0 0 の窒素ガス雰囲気中にて 1 0 秒間 ~ 1 0 0 0 秒間の熱処理を施す。

【 0 0 6 3 】

続いて、フォトリソグラフィプロセスを用いて、S i O <sub>2</sub> パターン層から、ゲート電極 7 の形成予定箇所の S i O <sub>2</sub> 膜を除去する。

【 0 0 6 4 】

さらに真空蒸着法とフォトリソグラフィプロセスとを用いて、ゲート電極 7 の形成予定箇所に、N i / A u からなるショットキー性金属パターンを形成することで、ゲート電極 7 を形成する。それぞれの金属層の厚みは、 4 n m ~ 4 0 n m 、 および、 2 0 n m ~ 2 0 0 n m とするのが好適である。

【 0 0 6 5 】

以上のプロセスにより、H E M T 素子 2 0 が得られる。

【 0 0 6 6 】

( バッファ層の効果 )

上述のように、本実施の形態に係る H E M T 素子 2 0 においては、自立基板 1 が、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度で Z n がドーブされた G a N からなるとともに、バッファ層 2 が、エピタキシャル基板 1 0 の作製時に Z n が自立基板 1 からチャンネル層 3 へと拡散することを防止する拡散抑制層として機能するべく設けられてなる。そして、係るバッファ層 2 としては、厚み方向の少なくとも一部の範囲において  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度で C がドーブされた 1 3 族窒化物からなる層が、例示される。

【 0 0 6 7 】

仮に、上述のような濃度条件で C がバッファ層 2 にドーブされていない場合、Z n がバ

10

20

30

40

50

ッファ層2からチャンネル層3さらには障壁層4に拡散する。この場合、アクセプター元素として機能するZnが電子トラップとして働くために、HEMT素子20において電流コラプス現象が生じる。

【0068】

しかしながら、本実施の形態に係るHEMT素子20においては、上述の濃度条件をみたしてCがドーパされた13族窒化物層にてバッファ層2が形成されてなることによって、自立基板1からのZnの拡散が好適に抑制された結果として、電流コラプスの発生が好適に抑制されたものとなっている。より具体的には、チャンネル層におけるZnの濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であれば、HEMT素子20における電流コラプスの発生は好適に抑制される。

10

【0069】

なお、バッファ層2の厚み方向の少なくとも一部の範囲における $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でのCのドーパは、MOCVD法によって13族窒化物層を形成する場合に当該層の形成条件、例えば、成長温度、リアクタ内圧力、15族ガスと13族ガスのガス比、形成厚みなどを適宜に調整することにより、Cの濃度を変化させることができることに基づいている。なお、MOCVD法において形成される結晶層にドーパされるCは主として13族原料に由来するものであり、例えば、C供給量は13族ガス供給量で変化し、また、13族窒化物結晶中のC元素の安定性は温度および圧力の影響を受ける。

【0070】

よって、本実施の形態に係るHEMT素子20を得るにあたっては、バッファ層2の形成に際しては厚み方向の少なくとも一部の範囲においてCが $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度でドーパされる成長条件を用い、チャンネル層3の形成に際しては、係るドーパがなされない成長条件、例えばCの濃度がバッファ層2よりも2オーダーないしは3オーダーあるいはそれ以上に小さくなる成長条件を、用いるようにすればよい。

20

【0071】

以上、説明したように、本実施の形態によれば、半絶縁性のGaN自立基板を用いつつ、電流コラプスの発生が抑制されてなる半導体素子を得ることができる。

【実施例】

【0072】

(実施例1)

[フラックス法によるZnドーパGaN単結晶基板の作製]

直径2インチ、厚さ0.43mmのc面サファイア基板の表面に、550にてGaN低温バッファ層を30nm成膜し、その後、厚さ3 $\mu\text{m}$ のGaN薄膜を1050にてMOCVD法により成膜し、種基板として利用可能なMOCVD-GaNテンプレートを得た。

30

【0073】

得られたMOCVD-GaNテンプレートを種基板として、Naフラックス法を用いてZnドーパGaN単結晶層を形成した。

【0074】

具体的には、まず、アルミナるつぼ内にMOCVD-GaNテンプレートを載置し、続いて、該アルミナるつぼ内に、金属Gaを30g、金属Naを45g、金属亜鉛を1g、炭素を100mg、それぞれ充填した。係るアルミナるつぼを加熱炉に入れ、炉内温度を850とし、炉内圧力を4.5MPaとして、約100時間加熱し、その後、室温まで冷却した。冷却終了後、アルミナるつぼを炉内から取り出すと、MOCVD-GaNテンプレートの表面には、褐色のGaNの単結晶層が約1000 $\mu\text{m}$ の厚さで堆積していた。

40

【0075】

このようにして得られたGaN単結晶層を、ダイヤモンド砥粒を用いて研磨し、その表面を平坦化させるとともに、下地基板上に形成された窒化物層の総厚が900 $\mu\text{m}$ となるようにした。これにより、MOCVD-GaNテンプレートの上にGaN単結晶層が形成されたFlux-GaNテンプレートが得られた。なお、係るFlux-GaNテンプレ

50

レートを目視したところ、クラックは確認されなかった。

【0076】

次いで、レーザーリフトオフ法により、種基板の側からレーザー光を30mm/秒の走査速度で走査しつつ照射することによって、Flux-GaNテンプレートから種基板を分離した。レーザー光としては、波長355nmのNd:YAGの3次高調波を用いた。パルス幅は約30ns、パルス周期は約50kHzとした。照射に際しては、レーザー光を集光して約20μm径の円形状ビームとすることにより、光密度が1.0J/cm程度となるようにした。また、レーザー光の照射は、Flux-GaNテンプレートを種基板と反対側から50前後の温度で加熱しつつ行った。

【0077】

種基板を分離した後、得られた積層構造体の種基板から剥離された側の面を研磨処理することで、総厚430μmのZnドープGaN自立基板を得た。

【0078】

得られたZnドープGaN基板の結晶性を、X線ロックアップカーブを用いて評価した。(0002)面反射の半値幅は120秒、(10-12)面反射の半値幅は150秒と良好な結晶性を示した。

【0079】

[MOCVD法によるエピタキシャル基板の作製]

続いて、MOCVD法によって、エピタキシャル基板を作製した。具体的には、以下の条件に従って、バッファ層としてのGaN層、チャンネル層としてのGaN層、障壁層としてのAlGaN層を、上記ZnドープGaN基板上にこの順に積層形成した。なお、本実施例において、15族/13族ガス比とは、13族(Ga、Al)原料の供給量に対する15族(N)原料の供給量の比(モル比)である。また、GaNバッファ層の形成条件は、Cが高濃度でドーピングされることがあらかじめ確認されている条件であり、GaNチャンネル層の形成条件は、Cがほとんどドーピングされないことがあらかじめ確認されている条件である。

【0080】

GaNバッファ層：

形成温度 = 1050 ;  
 リアクタ内圧力 = 10kPa ;  
 15族/13族ガス比 = 500 ;  
 厚み = 1000nm。

【0081】

GaNチャンネル層：

形成温度 = 1050 ;  
 リアクタ内圧力 = 100kPa ;  
 15族/13族ガス比 = 2000 ;  
 厚み = 1000nm。

【0082】

AlGaN障壁層：

形成温度 = 1050 ;  
 リアクタ内圧力 = 5kPa ;  
 15族/13族ガス比 = 12000 ;  
 Al原料ガス/13族ガス比 = 0.25 ;  
 厚み = 25nm。

【0083】

以上の層が形成された後、サセプタ温度を室温付近まで降温し、リアクタ内を大気圧に復帰させた後、作製されたエピタキシャル基板を取り出した。

【0084】

[HEMT素子の作製]

10

20

30

40

50

次に、このエピタキシャル基板10を用いてHEMT素子20を作製した。なお、HEMT素子は、ゲート幅が100 $\mu\text{m}$ 、ソース-ゲート間隔が1 $\mu\text{m}$ 、ゲート-ドレイン間隔が4 $\mu\text{m}$ 、ゲート長が1 $\mu\text{m}$ となるように設計した。

【0085】

まず、フォトリソグラフィプロセスとRIE法を用いて各素子の境界となる部位を深さ100nm程度までエッチング除去した。

【0086】

次に、エピタキシャル基板上に厚さ100nmのSiO<sub>2</sub>膜を形成し、続いてフォトリソグラフィを用いてソース電極、ドレイン電極の形成予定箇所のSiO<sub>2</sub>膜をエッチング除去することで、SiO<sub>2</sub>パターン層を得た。

10

【0087】

次いで、真空蒸着法とフォトリソグラフィプロセスとを用い、ソース電極、ドレイン電極の形成予定箇所にTi/Al/Ni/Au(それぞれの膜厚は25/200/20/100nm)からなる金属パターンを形成することで、ソース電極およびドレイン電極を形成した。次いで、ソース電極およびドレイン電極のオーミック性を良好なものにするために、825の窒素ガス雰囲気中にて30秒間の熱処理を施した。

【0088】

その後、フォトリソグラフィプロセスを用いて、SiO<sub>2</sub>パターン層から、ゲート電極の形成予定箇所のSiO<sub>2</sub>膜を除去した。

【0089】

20

さらに真空蒸着法とフォトリソグラフィプロセスとを用いて、ゲート電極の形成予定箇所に、Ni/Au(それぞれの膜厚は20/100nm)からなるショットキー性金属パターンを形成することで、ゲート電極を形成した。

【0090】

以上のプロセスにより、HEMT素子が得られた。

【0091】

[HEMT素子のSIMS評価]

得られたHEMT素子について、SIMS(二次イオン質量分析法)によりエピタキシャル基板における深さ方向の元素分析を行い、Zn元素とC元素の濃度を調べた。

【0092】

30

図2は、本実施例に係るエピタキシャル基板におけるZn元素、C元素の濃度プロファイルを示す図である。図3は、図2のうち、GaNバッファ層とGaN基板の界面近傍における拡大図である。図2および図3に示す結果からは、以下の事がわかる。

【0093】

(1) GaN基板にはZn元素が高濃度( $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )にドーピングされている。

【0094】

(2) C元素の濃度は、GaNバッファ層においては $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることから $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上となる範囲が存在し、チャンネル層ではおよそ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

40

【0095】

(3) GaNバッファ層とGaN基板の界面から基板側では高濃度で存在しているZn元素は、GaNバッファ層内で急峻に減少し、SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)測定におけるZnの検出下限値である $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ にまで達している。つまり、チャンネル層、および障壁層内へのZn元素の拡散は抑制されている。

【0096】

(4) Zn濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である箇所における、Zn濃度の1 $\mu\text{m}$ あたりの対数変化率(濃度の常用対数値の変化率)は、-74.9である。

【0097】

[HEMT素子の電気特性評価]

50

半導体パラメーターアナライザーを用いて、HEMT素子のドレイン電流ドレイン電圧特性 ( $I_d - V_d$  特性) をDCモードおよびパルスモード (静止ドレインバイアス  $V_{dq} = 30\text{ V}$ 、静止ゲートバイアス  $V_{gq} = -5\text{ V}$ ) にて評価した。ピンチオフ (pinch-off) の閾値電圧は  $V_g = -3\text{ V}$  であった。

【0098】

電流コラプスを評価するための指標として、ドレイン電圧  $V_d = 5\text{ V}$ 、ゲート電圧  $V_g = 2\text{ V}$  印加時のDCモードに於けるドレイン電流  $I_{d_{DC}} \cdot V_d = 5\text{ V} \cdot V_g = 2\text{ V}$  と、パルスモードに於けるドレイン電流  $I_{d_{pulse}} \cdot V_d = 5\text{ V} \cdot V_g = 2\text{ V}$  の比  $R (= I_{d_{pulse}} \cdot V_d = 5\text{ V} \cdot V_g = 2\text{ V} / I_{d_{DC}} \cdot V_d = 5\text{ V} \cdot V_g = 2\text{ V})$ 、

10

【0099】

(比較例1)

GaNバッファ層の成長条件を実施例1とは異なる以下の条件としたほかは、実施例1と同様の条件で、HEMT素子の作製を行った。なお、GaNバッファ層の形成条件は、実施例1に比してCのドーパ量が小さいことがあらかじめ確認されている条件である。

【0100】

GaNバッファ層：

20

形成温度=1050；

リアクタ内圧力=30kPa；

15族/13族ガス比=500；

厚み=300nm。

【0101】

得られたHEMT素子について、実施例1と同様にSIMS測定を行い、エピタキシャル基板におけるZn元素とC元素の濃度を調べた。

【0102】

図4は、本比較例に係るエピタキシャル基板におけるZn元素、C元素の濃度プロファイルを示す図である。図5は、図4のうち、CドーパGaNバッファ層とGaN基板の界面近傍における拡大図である。図4および図5に示す結果からは、以下の事がわかる。

30

【0103】

(1) 実施例1と同様、GaN基板にはZn元素が高濃度にドーパされている。

【0104】

(2) C元素の濃度は、GaNバッファ層においては最大で  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以上程度であって他の領域の濃度よりも高いが実施例1よりは低く、実施例1と同じ条件にて形成したGaNチャンネル層におけるC元素の濃度が実施例1よりも高い  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  程度となっている。

【0105】

(3) GaNバッファ層とGaN基板の界面から基板側では高濃度で存在しているZn元素は、GaNバッファ内で減少してはいるが、その度合いは実施例1に比して緩やかであり、GaNチャンネル層においても実施例1の場合より2オーダーも大きい  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以上の濃度で存在する。つまり、Zn元素はチャンネル層にまで拡散している。

40

【0106】

(4) Zn濃度が  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  である箇所における、Zn濃度の  $1\text{ }\mu\text{m}$  あたりの対数変化率 (濃度の常用対数値の変化率) は、 $-7.3$  である。

【0107】

係るHEMT素子について、実施例1と同様の条件でR値を求めたところ、 $0.31$  となり、本比較例に係るHEMT素子においては電流コラプスの抑制は十分ではないものと判定された。

50

## 【 0 1 0 8 】

( 実施例 2 ~ 6、比較例 2 ~ 5 )

G a N バ ッ フ ァ 層 の 成 長 条 件 ( 成 長 温 度、リ ア ク タ 内 圧 力、1 5 族 / 1 3 族 ガ ス 比、形 成 厚 み ) な ど を 種 々 に 違 え た 他 は、実 施 例 1 と 同 様 の 条 件 で H E M T 素 子 の 作 製 を 行 い、得 ら れ た H E M T 素 子 に つ い て、S I M S 測 定 に よ り 深 さ 方 向 へ の Z n 濃 度 お よ び C 濃 度 の 分 布 を 求 め る と と も に、R 値 を 算 出 し た。

## 【 0 1 0 9 】

得 ら れ た 結 果 の 一 覧 を、実 施 例 1、比 較 例 1 の 結 果 と 併 せ て 表 1 に 示 す。

## 【 0 1 1 0 】

【表 1】

	GaNバッファ層 成長条件				コアラス 評価	SIMS測定	
	成長 温度 [°C]	リアクタ内 圧力 [kPa]	15族 /13族 ガス比	厚み [nm]		R値	GaN バッファ層中の C濃度 [cm <sup>-3</sup> ]
実施例1	1050	10	500	1000	0.93	$6 \times 10^{18}$	$5 \times 10^{14}$
実施例2	1050	10	500	300	0.91	$6 \times 10^{18}$	$6 \times 10^{14}$
実施例3	1050	20	500	1000	0.88	$1 \times 10^{18}$	$6 \times 10^{14}$
実施例4	1050	20	500	300	0.85	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{15}$
比較例2	1050	30	500	1000	0.51	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{15}$
比較例1	1050	30	500	300	0.31	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{16}$
実施例5	1050	30	200	1000	0.90	$1 \times 10^{19}$	$6 \times 10^{14}$
比較例3	1050	30	1000	1000	0.29	$8 \times 10^{16}$	$2 \times 10^{17}$
比較例4	1050	30	2000	1000	0.21	$4 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{17}$
実施例6	950	30	500	1000	0.85	$1 \times 10^{18}$	$7 \times 10^{14}$
比較例5	1150	30	500	1000	0.25	$4 \times 10^{16}$	$4 \times 10^{17}$

【0111】

表1に示すように、GaNバッファ層におけるCの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上となる条件で作製した実施例1～実施例6の場合には、R値が0.85以上となり、GaNチャネル層におけるZnの濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以下となった。係る結果は、実施例1～実施例6においてはいずれも、電流コラプスが抑制されたHEMT素子が得られた

10

20

30

40

50

ことを示している。

【0112】

また、Zn濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である箇所における、Zn濃度の $1 \mu\text{m}$ あたりの対数変化率は、 $-20.0$ 以下という値になった。これは、実施例1～実施例6においてはいずれも、Znの濃度減少が急激であることを示している。

【0113】

一方、GaNバッファ層におけるCの濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 未満となる条件で作製した比較例1～比較例5の場合には、R値は最大でも $0.51$ に留まり、GaNチャネル層におけるZnの濃度は比較例2を除き $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ を上回った。係る結果は、比較例1～比較例5に係るHEMT素子においては、電流コラプスが抑制されないこと

10

【0114】

また、Zn濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である箇所における、Zn濃度の $1 \mu\text{m}$ あたりの対数変化率は、比較例1では $-8.9$ 、比較例2では $-7.3$ という値が得られたが、比較例3～比較例5では、Zn濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ を下回らなかったため算出できなかった。係る結果は、比較例1～比較例5においては、実施例1～実施例6に比してZnの濃度減少が緩やかであることを示している。

【0115】

(実施例7)

実施例1～実施例6に係るHEMT素子では、Znの濃度減少が急峻であり、それゆえチャネル層におけるZnの濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ を下回って電流コラプスが抑制されていたが、チャネル層のうち障壁層とチャネル層との界面(ヘテロ界面)近傍においてZnの濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ を十分に下回っていれば、Zn濃度の減少が緩やかであったとしても、電流コラプスは抑制される場合がある。

20

【0116】

本実施例では、バッファ層2およびチャネル層3の成長条件を実施例1とは異なる以下の条件としたほかは、実施例1と同様の条件で、エピタキシャル基板10の作製さらにはHEMT素子20の作製を行った。

【0117】

GaNバッファ層：

形成温度 =  $1050$  ;  
リアクタ内圧 =  $10 \text{ kPa}$  ;  
15族 / 13族ガス比 =  $500$  ;  
厚み =  $100 \text{ nm}$ 。

30

【0118】

GaNチャネル層：

形成温度 =  $1050$  ;  
リアクタ内圧 =  $100 \text{ kPa}$  ;  
15族 / 13族ガス比 =  $2000$  ;  
厚み =  $1000 \text{ nm}$ 。

40

【0119】

図6は、得られたHEMT素子について、実施例1と同様の条件でSIMS測定により深さ方向への測定を行うことにより得た、障壁層4の表面(上面)から深さ方向におけるZn元素およびC元素の濃度プロファイルを示す図である。図6に示す結果からは、以下の事がわかる。

【0120】

(1) GaN基板にはZn元素が高濃度にドーブされている。

【0121】

(2) C元素の濃度は、バッファ層においては最大で $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であることから $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上となる範囲が存在し、チャネル層ではおよそ $2 \times 10^{16}$

50

$\text{cm}^{-3}$  以下である。また、C 元素の濃度変化は、バッファ層とチャンネル層との界面においては急峻であるのに対し、バッファ層から GaN 基板にかけての濃度変化は緩やかである。なお、図 6 においては障壁層近傍から障壁層にかけて C 元素の濃度の増大がみられるが、これは、サンプル表面に付着した元素のノックオンによるものである。

【0122】

(3) バッファ層と GaN 基板の界面から基板側では高濃度で存在している Zn 元素は、バッファ層内で急峻に減少し、チャンネル層内においてさらに減少し、障壁層とチャンネル層との界面（ヘテロ界面）近傍を含む範囲においては、SIMS 測定における Zn の検出下限値である  $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  にまで達している。つまり、Zn 元素の拡散は抑制されている。

10

【0123】

(4) Zn 濃度が  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  である箇所における、Zn 濃度の  $1 \mu\text{m}$  あたりの対数変化率（濃度の常用対数値の変化率）は、 $-15.0$  である。

【0124】

係る HEMT 素子について R 値を求めたところ、 $0.88$  であった。すなわち、本実施例に係る HEMT 素子においても、電流コラプスは好適に抑制されているものと判定される。

【0125】

（実施例 8）

バッファ層 2 およびチャンネル層 3 の成長条件を実施例 1 とは異なる以下の条件とした場合は、実施例 1 と同様の条件で、エピタキシャル基板 10 の作製さらには HEMT 素子 20 の作製を行った。このうち、バッファ層 2 の形成に際しては、形成条件を第 1 条件と第 2 条件の 2 段階に設定し、形成途中で第 1 条件から第 2 条件へと切り替えるようにした。これは、バッファ層 2 が、 $\text{Al}_a\text{Ga}_{1-a}\text{N}$  層 ( $0 < a < 1$ ) の上に GaN 層が積層された多層バッファ層、もしくは、Al および Ga の厚み方向における存在比率が異なる組成傾斜バッファ層として形成されることを、意図したものである。ここで、第 1 条件は C をバッファ層 2 内に積極的にドーピングさせない条件であり、第 2 条件は C がバッファ層 2 内にドーピングされることが確認されている条件である。なお、バッファ層 2 の総厚が  $110 \text{nm}$  となるようにした。

20

【0126】

バッファ層（第 1 条件）：

- 形成温度 =  $1050$  ；
- リアクタ内圧 =  $5 \text{kPa}$  ；
- 13 族原料ガス = Al 原料および Ga 原料；
- 15 族 / 13 族ガス比 =  $2000$  ；
- Al 原料ガス / 13 族原料ガス比 =  $0.03$  ；
- 成長レート =  $1 \text{nm} / \text{秒}$  ；
- 成長時間 =  $10$  秒。

30

【0127】

バッファ層（第 2 条件）：

- 形成温度 =  $1050$  ；
- リアクタ内圧 =  $10 \text{kPa}$  ；
- 13 族原料ガス = Ga 原料；
- 15 族 / 13 族ガス比 =  $500$  ；
- 成長レート =  $1 \text{nm} / \text{秒}$  ；
- 成長時間 =  $100$  秒。

40

【0128】

GaN チャンネル層：

- 形成温度 =  $1050$  ；
- リアクタ内圧 =  $100 \text{kPa}$  ；

50

15族/13族ガス比 = 2000 ;  
厚み = 900 nm。

## 【0129】

図7は、得られたHEMT素子について、実施例1と同様の条件でSIMS測定により深さ方向への測定を行うことにより得た、障壁層4の表面(上面)から深さ方向におけるZn元素、C元素の濃度プロファイル、および、係る深さ方向におけるAl元素の二次イオン信号プロファイル(Al元素の二次イオン計数レートの深さ方向分布)を示す図である。図7に示す結果からは、以下の事がわかる。

## 【0130】

(1) GaN基板にはZn元素が高濃度にドーピングされている。

10

## 【0131】

(2) C元素の濃度は、バッファ層においては最大で $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上となる範囲が存在し、チャンネル層ではおよそ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。また、C元素の濃度変化は、バッファ層とチャンネル層との界面においては急峻であるのに対し、バッファ層からGaN基板にかけての濃度変化は緩やかである。なお、図7においてはチャンネル層の障壁層近傍から障壁層にかけてC元素の濃度の増大がみられるが、これは、サンプル表面に付着した元素のノックオンによるものである。

## 【0132】

(3) バッファ層とGaN基板の界面から基板側では高濃度で存在しているZn元素は、バッファ層内で急峻に減少し、チャンネル層内においてさらに減少し、障壁層とチャンネル層との界面(ヘテロ界面)近傍を含む範囲においては、SIMS測定におけるZnの検出下限値である $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ にまで達している。つまり、Zn元素の拡散は抑制されている。

20

## 【0133】

(4) Zn濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である箇所における、Zn濃度の1 $\mu\text{m}$ あたりの対数変化率(濃度の常用対数値の変化率)は、-13.0である。

## 【0134】

(5) Al元素は、バッファ層全体の狙い厚みである110nmよりも広い範囲において存在しており、当該範囲にはGaN基板の一部も含まれている。

## 【0135】

(6) バッファ層においては、C元素の濃度が最大となる領域ではAl元素はほとんど検出されていないことから、バッファ層にはCが顕著にドーピングされたGaN層と、わずかにCがドーピングされたAlGaN層とが存在しているといえる。

30

## 【0136】

係るHEMT素子についてR値を求めたところ、0.90であった。すなわち、本実施例に係るHEMT素子においても、電流コラプスは好適に抑制されているものと判定される。

## 【0137】

(実施例9)

バッファ層2およびチャンネル層3の成長条件を実施例8とは異なる以下の条件としたほかは、実施例8と同様の条件で、HEMT素子20の作製を行った。すなわち、本実施例においても、バッファ層2の形成に際しては、形成条件を第1条件と第2条件の2段階に設定し、形成途中で第1条件から第2条件へと切り替えるようにした。また、バッファ層2の総厚が350nmとなるようにした。

40

## 【0138】

バッファ層(第1条件) :

形成温度 = 1050 ;

リアクタ内圧 = 5 kPa ;

13族原料ガス = Al原料およびGa原料 ;

15族/13族ガス比 = 2000 ;

50

A 1 原料ガス / 1 3 族原料ガス比 = 0 . 0 1 ;  
 成長レート = 1 n m / 秒 ;  
 成長時間 = 5 0 秒。

## 【 0 1 3 9 】

バッファ層 ( 第 2 条件 ) :

形成温度 = 1 0 5 0 ;  
 リアクタ内圧 = 1 0 k P a ;  
 1 5 族 / 1 3 族ガス比 = 5 0 0 ;  
 成長レート = 1 n m / 秒 ;  
 成長時間 = 3 0 0 秒。

10

## 【 0 1 4 0 】

G a N チャンネル層 :

形成温度 = 1 0 5 0 ;  
 リアクタ内圧 = 1 0 0 k P a ;  
 1 5 族 / 1 3 族ガス比 = 2 0 0 0 ;  
 厚み = 1 7 0 0 n m。

## 【 0 1 4 1 】

得られた H E M T 素子について、実施例 1 と同様の条件で S I M S 測定を行うことにより得た、障壁層 4 の表面 ( 上面 ) から深さ方向における Z n 元素、C 元素の濃度プロファイル、および、係る深さ方向における A 1 元素の二次イオン信号プロファイルから、以下の事がわかった。

20

## 【 0 1 4 2 】

( 1 ) G a N 基板には Z n 元素が高濃度 (  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ) にドーピングされている。

## 【 0 1 4 3 】

( 2 ) C 元素の濃度は、バッファ層においては最大で  $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上となる範囲が存在し、チャンネル層ではおよそ  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以下である。また、C 元素の濃度変化は、バッファ層とチャンネル層との界面においては急峻であるのに対し、バッファ層から G a N 基板にかけての濃度変化は緩やかである。

## 【 0 1 4 4 】

( 3 ) バッファ層と G a N 基板の界面から基板側では高濃度で存在している Z n 元素は、バッファ内で急峻に減少し、さらには、チャンネル層内でも減少し、チャンネル層のうち障壁層とチャンネル層との界面 ( ヘテロ界面 ) 近傍において、S I M S 測定における Z n の検出下限値である  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  にまで達している。つまり、Z n 元素の拡散は抑制されている。

30

## 【 0 1 4 5 】

( 4 ) Z n 濃度が  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  である箇所における、Z n 濃度の  $1 \mu \text{ m}$  あたりの対数変化率 ( 濃度の常用対数値の変化率 ) は、- 5 8 . 3 である。

## 【 0 1 4 6 】

( 5 ) A 1 元素は、バッファ層全体の狙い厚みである 3 5 0 n m よりも広い範囲において存在しており、当該範囲には G a N 基板の一部も含まれている。

40

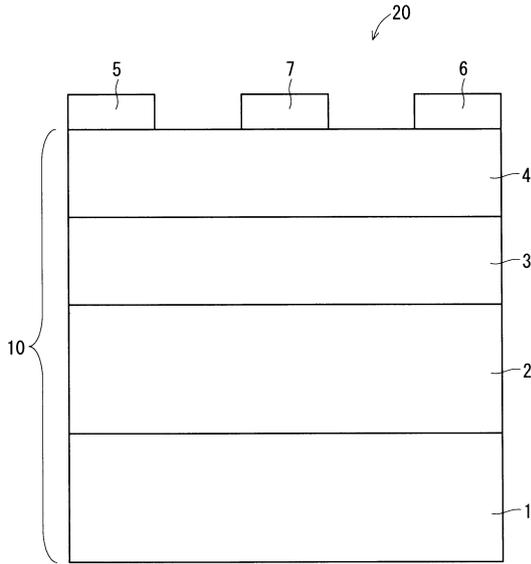
## 【 0 1 4 7 】

( 6 ) バッファ層においては、C 元素の濃度が最大となる領域では A 1 元素はほとんど検出されていないことから、バッファ層には C が顕著にドーピングされた G a N 層と、わずかに C がドーピングされた A 1 G a N 層とが存在しているといえる。

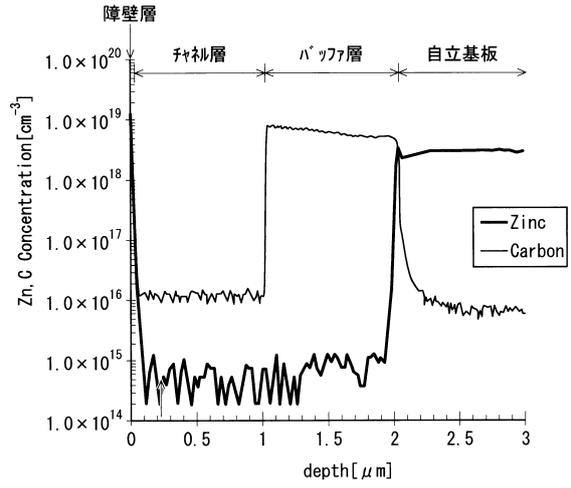
## 【 0 1 4 8 】

係る H E M T 素子について R 値を求めたところ、0 . 9 2 であった。すなわち、本実施例に係る H E M T 素子においても、電流コラプスは好適に抑制されているものと判定される。

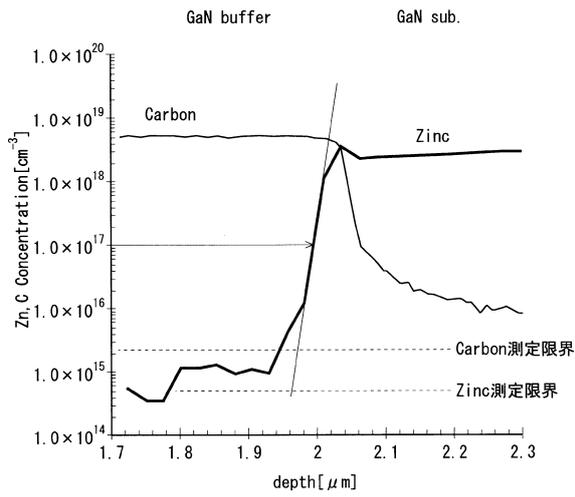
【図1】



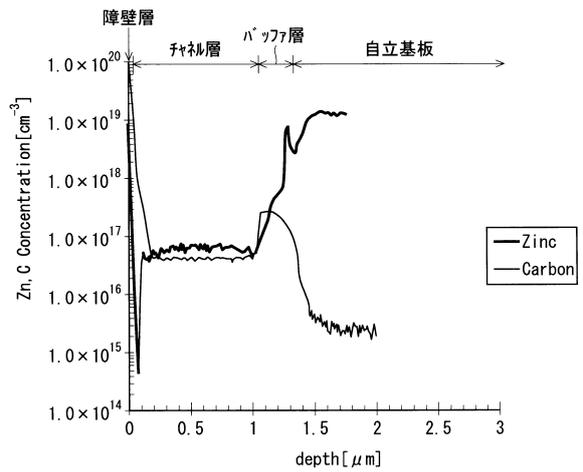
【図2】



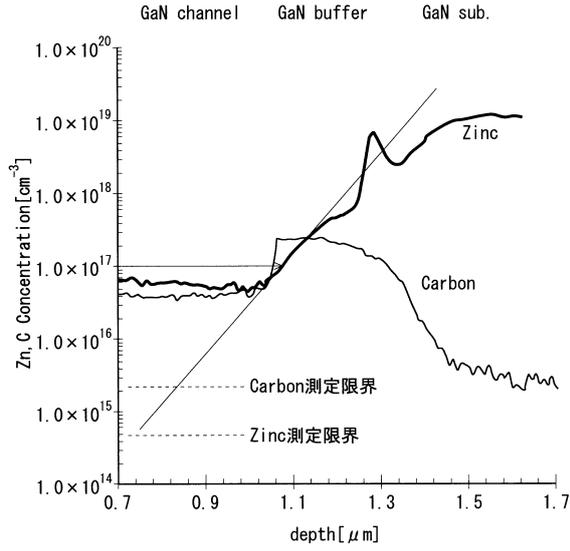
【図3】



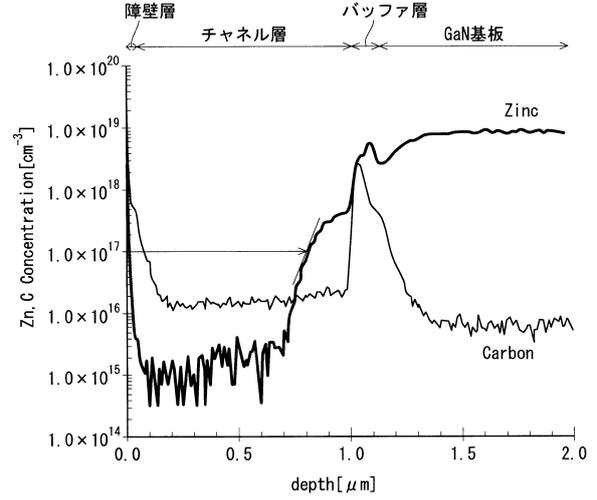
【図4】



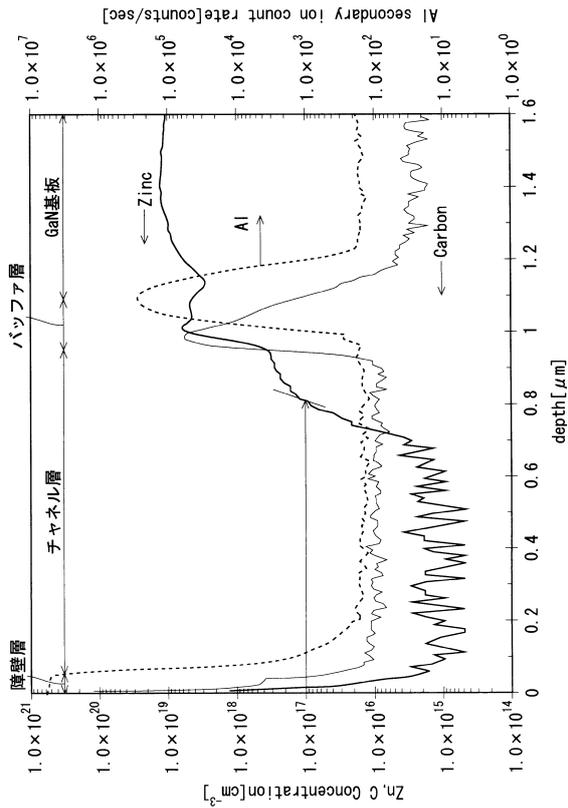
【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 倉岡 義孝

愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内

審査官 棚田 一也

(56)参考文献 特開2006-332367(JP,A)

特開2011-068548(JP,A)

特開2011-187643(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 21/205

H01L 21/338

H01L 29/778

H01L 29/812