

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4440615号
(P4440615)

(45) 発行日 平成22年3月24日 (2010. 3. 24)

(24) 登録日 平成22年1月15日 (2010.1.15)

(51) Int. Cl. F I
 HO 1 L 31/107 (2006.01) HO 1 L 31/10 B

請求項の数 10 外国語出願 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2003-409749 (P2003-409749)	(73) 特許権者	390041542
(22) 出願日	平成15年12月9日 (2003. 12. 9)		ゼネラル・エレクトリック・カンパニー
(65) 公開番号	特開2004-193615 (P2004-193615A)		GENERAL ELECTRIC CO
(43) 公開日	平成16年7月8日 (2004. 7. 8)		MPANY
審査請求日	平成18年12月8日 (2006. 12. 8)		アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ
(31) 優先権主張番号	10/314, 986	(74) 代理人	100137545
(32) 優先日	平成14年12月10日 (2002. 12. 10)		弁理士 荒川 聡志
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100105588
			弁理士 小倉 博
		(74) 代理人	100106541
			弁理士 伊藤 信和
		(72) 発明者	ピーター・エム・サンドビック
			アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ギルダ
			ーランド、モンロー・コート、8番
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 苛酷な環境で使用するためのアバランシェ・フォトダイオード

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

紫外線光子を検出するためのアバランシェ・フォトダイオードであって、

炭化ケイ素又は窒化ガリウムを含み、p - 型の第 1 のドーパントを有する基板 (1 1 0) と、

前記基板の上に置かれた第 1 の層 (1 1 1) であって、炭化ケイ素又は窒化ガリウムを含み、p - 型の第 1 のドーパントを有する第 1 の層 (1 1 1) と、

前記第 1 の層の上に置かれた第 2 の層 (1 1 2) であって、炭化ケイ素又は窒化ガリウムを含み、n - 型の第 2 のドーパントを有する第 2 の層 (1 1 2) と、

前記第 2 の層の上に置かれた第 3 の層 (1 1 4) であって、炭化ケイ素又は窒化ガリウムを含み、n - 型の第 2 のドーパントを有する第 3 の層 (1 1 4) と、

該アバランシェ・フォトダイオードの表面上に電気的パッシベーションをもたらすためのパッシベーション層 (1 1 6、1 2 2) と、

前記第 3 の層の上に置かれた、可動イオン移動を制限するためのケイ酸リンガラス (1 2 4) と、

第 1 の電極が前記基板の下に置かれ、また第 2 の電極が前記第 3 の層の上に置かれた、オームコンタクトを形成するための 1 対の金属電極 (1 1 8、1 2 0) と、
を含み、

該アバランシェ・フォトダイオードが、傾斜メサ形状を形成する第 1 の側壁と第 2 の側壁とを含み、

10

20

該アバランシェ・フォトダイオードが、ほぼ摂氏150度に匹敵する温度を含む環境内で動作する、
ことを特徴とするアバランシェ・フォトダイオード。

【請求項2】

前記基板が、4H炭化ケイ素を含み、ほぼ $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ にドーピングされていることを特徴とする、請求項1に記載のフォトダイオード。

【請求項3】

前記第1の層が、炭化ケイ素を含み、ほぼ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ にドーピングされていることを特徴とする、請求項2に記載のフォトダイオード。

【請求項4】

前記第2の層が、炭化ケイ素を含み、ほぼ $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ にドーピングされていることを特徴とする、請求項3に記載のフォトダイオード。

【請求項5】

前記第3の層が、炭化ケイ素を含み、ほぼ $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ にドーピングされていることを特徴とする、請求項4に記載のフォトダイオード。

【請求項6】

前記傾斜メサ形状を形成する角度が、20度から60度の範囲内であることを特徴とする、請求項1乃至請求項5のいずれか1項に記載のフォトダイオード。

【請求項7】

前記傾斜メサ形状を形成する角度が、ほぼ20度であることを特徴とする、請求項1乃至請求項5のいずれか1項に記載のフォトダイオード。

【請求項8】

前記基板、前記第1の層、前記第2の層及び前記第3の層が、4Hポリタイプであることを特徴とする、請求項5に記載のフォトダイオード。

【請求項9】

前記パッシベーション層が、二酸化ケイ素を含み、前記第1の側壁と前記第2の側壁との上に形成されていることを特徴とする、請求項1に記載のフォトダイオード。

【請求項10】

少なくとも1つのガンマ線を受けて少なくとも1つの紫外線を発生させるためのシンチレータ結晶と、請求項1乃至請求項9のいずれか1項に記載のアバランシェ・フォトダイオードと、上記シンチレータ結晶からの紫外線を上記アバランシェ・フォトダイオードに集束させるためのレンズ構造体とを含む、ガンマ線を検出するための検出システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般的にアバランシェ・フォトダイオードに関し、より具体的には、油井掘さく用途のような苛酷な環境で使用するための、炭化ケイ素(SiC)材料又は窒化ガリウム(GaN)材料を含むアバランシェ・フォトダイオード(APD)に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、油井掘さく業界において、ガンマ線の検出に対する必要性が存在する。地下の水素(H)含有化合物から反射された高エネルギーのガンマ線は、石油を有する可能性のある特定の場所を示す場合がある。そのような放射線を検出することができる小型で堅牢なセンサは、衝撃レベルが250重力加速度(G)近くでありかつ温度が摂氏(C)150度に達するか又はそれを超えるような苛酷な地下の下方穴の環境に不可欠であり、非常に切望されている。

【0003】

幾つかの現行技術では、光電子増倍管(PMT)を利用して、低レベルの紫外(UV)光信号を読み取り可能なレベルの電子信号に変換する。しかしながら、PMTは、負の温度係数を有する。従って、PMTは、温度が上昇するにつれて感度が悪くなる。PMTは

10

20

30

40

50

また、振動レベルが高い場合には壊れ易くかつ故障しがちである。ある種の用途（例えば、PMTが～50%までの信号を受けることになるような150における）において、PMTの寿命は、極端に短くなり、それによって、それらを使用するコストを急激に増大させることになる。PMTが直面する別の問題には、正確な信号検出を著しく困難にする高い雑音レベルが含まれる。

【0004】

APDは、逆電圧を印加することによって機能する内部利得メカニズムを利用している高速、高感度のフォトダイオードである。PINフォトダイオードと比べて、APDは、より低レベルの光さえも測定することができ、高感度を必要とする広範囲の用途で使用される。APDにおいては、そのイオン化係数比が極めて大きいために、シリコンを使用することができ、このイオン化係数比が極めて大きいことが、高利得帯域幅積をもたらし、過剰雑音を極めて低くする。しかしながら、シリコンは、特に光ファイバ及び自由空間光通信波長が1.3ミクロン乃至1.5ミクロンの下では、極めて低い吸収係数を有する。APD内の増強領域にシリコンを使用する利点は、高イオン化係数比によるものであり、この高イオン化係数比により、感度がより高くなり、利得帯域幅積がより高くなり、雑音がより低くなり、また温度及び電圧安定性がより高くなる。

10

【0005】

その他の従来型のAPDは、小さなイオン化係数比によって性能が制限される近赤外化インジウム・ガリウム/燐化インジウム(InGaAs/InP)APDを含む場合があり、これは結果として、低利得帯域幅積及び高過剰雑音をもたらす。より短い波長においては、高感度と高利得帯域幅積とを必要とするような用途において、シリコン(Si)APDが広範囲にわたって使用される。

20

【0006】

逆に、シリコンは、高温及び高振動環境の下では良好に機能しない傾向にある。シリコンは、多くの用途においてその使用及び実装の容易さを妨げる固有の欠点を有する。より具体的には、Siベースの素子は、苛酷な環境又は摂氏150度を超える温度に曝された場合、非常に劣化を受けやすい。SiベースのAPDの良好な動作を可能にするためには、複雑で高価な冷却システム及びパッケージを必要とし、このことが、苛酷な環境の用途においてそれらが広範囲に使用されるのを制限する。

30

【0007】

現行のシステム及び技術においては、これら及びその他の欠点が存在する。

【特許文献1】米国特許 4949144号明細書

【特許文献2】米国特許 5179430号明細書

【特許文献3】米国特許 5257496号明細書

【特許文献4】米国特許 5303684号明細書

【特許文献5】米国特許 5394005号明細書

【特許文献6】米国特許 5467185号明細書

【特許文献7】米国特許 5480298号明細書

【特許文献8】米国特許 5544478号明細書

【特許文献9】米国特許 5581087号明細書

40

【特許文献10】米国特許 6013919号明細書

【特許文献11】米国特許 6057917号明細書

【特許文献12】米国特許 6147391号明細書

【特許文献13】米国特許 6239434号明細書

【特許文献14】米国特許 6265727号明細書

【特許文献15】米国特許 6326654号明細書

【特許文献16】米国特許 6350988号明細書

【特許文献17】米国特許 6768326号明細書

【特許文献18】米国特許出願公開第 2001/0009268号明細書

【非特許文献1】F Yan et al., "Low-noise visible-blind UV avalanche photodiodes

50

with edge terminated by 20 positive bevel", Mar. 2002, Electronics Letters, vol. 38 No. 7, pp 335.*

【非特許文献 2】Ng, et al., Multiplication and Excess Noise Characteristics of Thin 4H-SiC UV Avalanche Photodiodes, pp. 1342-1344, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, No. 9, 2002. .

【非特許文献 3】Yan, et al., Low-Noise Visible-Blind UV Avalanche Photodiodes With Edge Terminated by 2.degree. Positive Bevel, pp. 335-336, Electronic Letter, vol. 38, No. 7, 2002. .

【非特許文献 4】Yan, et al., 4H-SiC Avalanche Photodiode With Multistep Junction Extension Termination, pp. 1080-1081, Electronic Letter, vol. 37, No. 17, 2001. 10

【非特許文献 5】Yan, et al., Design and Fabrication of 4H-SiC APD Linear Arrays, pp. 17-20, Semiconductor Research Symposium, 2001 Intl., 2001. .

【非特許文献 6】Negoro, et al., Avalanche Phenomena in 4H-SiC p-n Diodes Fabricated by Aluminum or Boron Implantation, pp. 1505-1509, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 49, No. 6, 2002. .

【非特許文献 7】Yang, et al., Low Dark Current GaN Avalanche Photodiodes, pp. 1389-1391, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 36, No. 12, 2000. .

【非特許文献 8】Hong, et al., Optical and Noise Characteristics of Amorphous Si/SiC Superlattice Reach-Through Avalanche Photodiodes, pp. 1804-1808, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 37, No. 8, 1990. . 20

【非特許文献 9】Yan, et al., Demonstration of 4H-SiC Avalanche Photodiode Linear Array, pp. 1431-1434, Material Science Forum vols., 389-393, 2002. .

【非特許文献 10】Yan, et al. Demonstration of the first 4H-SiC Avalanche Photodiodes, pp. 341-346, Solid State Electronics, vol. 44, 2000. .Brown, et al., Silicon Carbide UV Photodiodes, pp. 325-333, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 40, No. 2, 1993. .

【非特許文献 11】Konstantinov, et al., Temperature Dependence of Avalanche Breakdown for Epitaxial Diodes in 4H Silicon Carbide, pp. 1850-1852, App. Physics Lett., vol. 73, No. 13, 1998. . 30

【非特許文献 12】Konstantinov, et al., Ionization Rates And Critical Fields In 4H Silicon Carbide, pp. 90-92, App. Physics Lett., vol. 71, No. 1, 1997. .

【非特許文献 13】Konstantinov, et al., Ionization Rates And Critical Fields in 4H SiC Junction Devices, pp. 513-516, Materials Science Forum vols., 264-268, 1998. .

【非特許文献 14】Verghese, et al., GaN Avalanche Photodiodes Operating In Linear-Gain Mode and Geiger Mode, pp. 502-511, IEEE Trans on Electron Devices, vol. 48, No. 3, 2001. .

【非特許文献 15】McIntosh, et al., Ultraviolet Photon Counting With GaN Avalanche Photodiodes, pp. 3938-3940, App. Physics Lett., vol. 76, No. 26, 2000. . 40

【非特許文献 16】Carrano, et al., GaN Avalanche Photodiodes, pp. 924-926, App. Physics Lett., vol. 76, No. 7, 2000. .

【非特許文献 17】McIntosh, et al., GaN Avalanche Photodiodes Grown by Hydride Vapor-Phase Epitaxy, pp. 3485-3487, App. Physics Lett., vol. 75, No. 22, 1999. .

【非特許文献 18】Reigrotzki, et al., Hole Initiated Impact Ionization In Wide Band Gap Semiconductors, pp. 4458-4463, Journal of App. Physics, vol. 86, No. 6, 1999. .

【非特許文献 19】Brown, SiC Flame Sensors For Gas Turbine Control Systems, pp. 755-760, Solid State Electronics, vol. 42, No. 5, 1998. .

【非特許文献 20】Konstantinov, et al., Study of Avalanche Breakdown and Impact 50

Ionization in 4H Silicon Carbide, pp. 335-341, Journal of Electronic Materials, vol. 27, No. 4, 1998. .

【非特許文献 2 1】Vasile, et al., Photon Detection With High Gain Avalanche Photodiode Arrays, pp. 720-723, IEEE Transaction on Nuclear Science, vol. 45, No. 3, 1998. .

【非特許文献 2 2】Vasile, et al., High Gain Avalanche Photodiode Arrays for DIRC Applications, pp. 848-852, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 46, No. 4, 1999. .

【非特許文献 2 3】Brown, et al., Silicon Carbide UV Photodiodes, pp. 325-333, IEEE Transaction on Electron Devices, vol. 40, No. 2 1992. .

【非特許文献 2 4】Glasow, et al., SiC-UV-Photodetectors, pp. 40-45, SPIE vol. 868, Optoelectronic Technologies for Remote Sensing from Space, 1997. .

【非特許文献 2 5】Carrano, et al., Very Low Dark Current Metal-Semiconductor-Metal Ultraviolet Photodetectors Fabricated On Single-Crystal GaN Epitaxial Layers, pp. 1992-1994, Appl. Phys. Lett. 70, No. 15, 1997..

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の例示的な態様によると、紫外線光子を検出するためのアバランシェ・フォトダイオードは、第1のドーパントを有する基板と、基板の上に置かれた、第1のドーパントを有する第1の層と、第1の層の上に置かれた、第2のドーパントを有する第2の層と、第2の層の上に置かれた、第2のドーパントを有する第3の層と、該アバランシェ・フォトダイオードの表面上に電氣的パッシベーションをもたらしめるためのパッシベーション層と、第3の層の上に置かれた、可動イオン移動を制限するためのケイ酸リンガラスと、第1の電極が基板の下に置かれ、また第2の電極が第3の層の上に置かれた、オームコンタクトを形成するための1対の金属電極とを含み、該アバランシェ・フォトダイオードは、傾斜メサ形状を形成する第1の側壁と第2の側壁とを含み、ほぼ摂氏150度に匹敵する温度を含む環境内で動作する。

【0009】

本発明の別の例示的な態様によると、ガンマ線を検出するための検出システムは、少なくとも1つのガンマ線を受け、少なくとも1つの紫外線を発生させるためのシンチレータ結晶と、該紫外線を検出するためのアバランシェ・フォトダイオードと、シンチレータ結晶からの紫外線をアバランシェ・フォトダイオードに集束させるためのレンズ構造体とを含み、該アバランシェ・フォトダイオードは、第1のドーパントを有する基板と、基板の上に置かれた、第1のドーパントを有する第1の層と、第1の層の上に置かれた、第2のドーパントを有する第2の層と、第2の層の上に置かれた、第2のドーパントを有する第3の層と、該アバランシェ・フォトダイオードの表面上に電氣的パッシベーションをもたらしめるためのパッシベーション層と、第3の層の上に置かれた、可動イオン移動を制限するためのケイ酸リンガラスと、第1の電極が基板の下に置かれ、また第2の電極が第3の層の上に置かれた、オームコンタクトを形成するための1対の金属電極とを含み、該アバランシェ・フォトダイオードは、傾斜メサ形状を形成する第1の側壁と第2の側壁とを含み、ほぼ摂氏150度に匹敵する温度を含む環境内で動作する。

【0010】

本発明の更に別の例示的な態様によると、アレイ構造体は、複数のアバランシェ・フォトダイオードを含み、各アバランシェ・フォトダイオードは、第1のドーパントを有する基板と、基板の上に置かれた、第1のドーパントを有する第1の層と、第1の層の上に置かれた、第2のドーパントを有する第2の層と、第2の層の上に置かれた、第2のドーパントを有する第3の層と、該アバランシェ・フォトダイオードの表面上に電氣的パッシベーションをもたらしめるためのパッシベーション層と、第3の層の上に置かれた、可動イオン移動を制限するためのケイ酸リンガラスと、第1の電極が基板の下に置かれ、また第2の電

10

20

30

40

50

極が第3の層の上に置かれた、オームコンタクトを形成するための1対の金属電極とを含み、該アバランシェ・フォトダイオードは、傾斜メサ形状を形成する第1の側壁と第2の側壁とを含み、ほぼ摂氏150度に匹敵する温度を含む環境内で動作する。

【0011】

次に、添付の図面に示すような本発明の例示的な実施形態を参照して、本発明の態様をより詳細に説明する。本発明を好ましい実施形態を参照して以下に説明するが、本発明はそれらの実施形態に限定されるものではないことを理解されたい。本明細書の教示に接する当業者は、付加的な設計、修正及び実施形態、更には他の使用分野に気付くであろうが、それらは、本明細書において開示した特許請求した本発明の技術的範囲内に含まれるものであり、またそれらに対して本発明が極めて有用である筈である。

10

【0012】

本発明のより完全な理解を助けるために、ここで添付の図面を参照する。これらの図面は、本発明を限定するものと解釈されてはならず、例示としてのみのものであることを意図している。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本発明の態様は、衝撃レベルが250重力加速度(G)近くであり、及び/又は、温度が150に達するか又はそれを超えるような苛酷な地下の下方穴の環境における油井掘さく用途で使用するためのアバランシェ・フォトダイオード(APD)素子に関する。本発明の別の態様は、SiC材料を使用して製造されたAPD素子に関する。本発明の更に別の態様は、GaN材料を使用して製造されたAPD素子に関する。アバランシェ・フォトダイオードは、電荷担体の累積的倍増により一次光電流が増幅されるようにする逆バイアス電圧で動作するフォトダイオードである。逆バイアス電圧が降伏に向かって増大すると、吸収された光子によって正孔電子対が生成される。アバランシェ(電子雪崩)効果は、正孔電子対が別の正孔及び電子対を生成するのに十分なエネルギーを獲得したときに発生し、それによって信号利得を得る。

20

【0014】

特定の品質(例えば、ドーピング及び厚さ)のエピタキシャル層は、素子(例えば、フォトダイオード)の動作特性(例えば、電子雪崩電圧)と共に良好な動作にとって必要不可欠である利得を決定する。SiCの特定の結晶相である4Hにおけるイオン化係数は、正の温度係数を有し、この正の温度係数は、電子雪崩過程におけるイオン化の必要条件により、SiCフォトダイオードにとって特に魅力的である。4H SiCは、広いバンドギャップ(~3.2 eV)と堅牢な化学的性質とを有する材料である。この材料は、UV光線を吸収することができる。少なくとも部分的にこの広いバンドギャップにより、本発明の実施形態の素子は、高温下で動作することができる。この素子は更に、n-型エピタキシャル層とp-型基板とを介して、p-n接合を使用する。このp-n接合が、素子に高逆バイアスが印加されたとき、電子雪崩の位置となることになる。

30

【0015】

本発明の別の実施形態によると、GaNベースのAPDが、油井掘さく用途に使用されることができる。GaNは、広いバンドギャップ(3.4 eV)と堅牢な化学的性質とを有する材料である。この材料は、UV光線を吸収することができる。本発明のGaN APDは、基板の上に成長させられた様々なエピタキシャル層を有するサファイア又はバルクGaNを含む基板を使用する。このGaN APDは、高印加電圧の下でp-n接合を利用して、素子の意図された動作点近くで、電子雪崩又は降伏を開始する。このタイプの素子に必要なとされる電界は、数MV/cmのオーダーであり、素子内部の空乏領域と大きな外部バイアスとによって可能にされる。

40

【0016】

本発明の実施形態によると、素子は、表面パッシベーションをもたらすための二酸化ケイ素(SiO₂)パッシベーション層を含むことができる。このSiO₂層はまた、反射防止皮膜としての役割を果たし、それによって、APD素子の光収集効率と全体的な検出効

50

率とを増大させる。更に、そうしなかったならば可動イオンによって影響される電気特性を制御するために、ケイ酸リンガラス（PSG）層を素子上に成長させることができる。例えば、PSG層を設けて、可動イオンが素子全体にわたって移動して素子性能を低下させるのを防止することができる。SiO₂及びPSGの保護層は、表面パッシベーションと可動イオン捕捉とをもたらし、素子寿命を延長しながら、より高速かつより効率的な素子動作を可能にする。更に、金属被覆法を使用して、低抵抗コンタクトを形成することができる。

【0017】

本発明の実施形態のAPDの目標は、ガンマ線によって励起されたシンチレータ（又は、その他の装置）から低レベルの紫外（UV）光子を検出する段階と、信号を電気信号に変換する段階とを含む。本発明の実施形態のAPDは、堅牢な材料を必要とする特に苛酷な（例えば、高振動、高温などの）環境で使用することができる。本発明の態様は、材料欠陥に対してその高い感度が求められる場合には実現が更に困難であるp-n型素子ではなく、n-p型APDに向けられている。本発明のAPD素子は、SiC半導体材料の降伏領域内（例えば、1~3MV/cm）で動作することができる。

【0018】

図1は、本発明の実施形態によるアバランシェ・フォトダイオード素子100の断面図の例である。図1は、基板110と、第1のエピタキシャル層111と、第2のエピタキシャル層112と、第3のエピタキシャル層114とを有するAPD素子の断面を示す。濃密にドーパされた基板110は、素子のアノードを通しての電気コンタクトを形成するのに役立つ。複数のエピタキシャル層は、材料における深さの関数として所望の電界分布を構成するように、基板上に成長させることができる。第1のエピタキシャル層111は、p-n接合を形成することに加えて、基板/エピタキシャル層境界面における欠陥を終了させるように作用することができる。第2のエピタキシャル層112は、UV光子の侵入深さを比較的大きくすることを可能にするように作用し、それによって吸収及び担体発生事象に対する確率を増大させることができる。第3のエピタキシャル層114は、カソードに対する低抵抗コンタクトを形成することができる。この構成はまた、素子の表面から離れて、p-n接合近くに高電界を閉じ込める働きをすることができ、更に、以下に説明する図3及び図4に示した方法で電界分布を制御することができる。

【0019】

本発明の実施形態によると、基板110は、p-ドーパされた4H-SiC基板を含むことができ、第1のエピタキシャル層111は、p-ドーパされた4H-SiC層を含むことができ、第2のエピタキシャル層112は、n-ドーパされた4H-SiC層を含むことができ、また第3のエピタキシャル層114は、n-ドーパされたSiC層を含むことができる。より具体的には、基板110におけるドーパント濃度は、ほぼ $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とすることができ、第1のエピタキシャル層111におけるドーパント濃度は、ほぼ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とすることができ、第2のエピタキシャル層112におけるドーパント濃度は、ほぼ $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ から $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とすることができ、また第3のエピタキシャル層114におけるドーパント濃度は、ほぼ $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とすることができる。第1のエピタキシャル層111は、ほぼ1.5ミクロンの厚さを有することができる、第2のエピタキシャル層112は、ほぼ3ミクロンの厚さを有することができる、また第3のエピタキシャル層114は、ほぼ0.4ミクロンの厚さを有することができる。その他の測定値を、同様に使用することもできる。例えば、第1のエピタキシャル層111は、0.2から5ミクロン、好ましい範囲は1から2ミクロンの厚さを有することができる。第2のエピタキシャル層112は、吸収を促進するような厚さを有することができる、2から10ミクロン、好ましい範囲は3から5ミクロンの範囲とすることができる。第3のエピタキシャル層114は、0.1から2ミクロン、好ましい範囲は0.3から0.8ミクロンの厚さを有することができる。

【0020】

金属電極118及び120は、様々な金属の組み合わせを含むことができる。具体的に

10

20

30

40

50

は、金属電極 118 は、カソード端部において Ni / Ti / Mo / Au を含むことができる。金属電極 120 は、アノード端部において Al / Ti / Pt / Au を含むことができる。薄い金属層を使用して、低抵抗を維持しかつ電界降下を最小にするか又は除去しながら、p 及び n コンタクトの両方に対して電極を形成することができる。オームコンタクトを形成するその他の材料を使用することもできる。パッシベーション層 116 及び 122 は、100 オングストロームから数ミクロン（例えば、ほぼ 5 ミクロン）の厚さを有することができる、好ましくは 1000 オングストロームから 2 ミクロンの間の厚さを有することができる SiO₂ を含むことができる。更に、PSG 層 124 を使用して、可動イオンが表面近くの材料に損傷を与えるのを防止し、UV の表面反射を減少させることができる。この PSG 層は、ほぼ 300 オングストロームから 1 ミクロンの厚さを有することができる。その他の材料及び厚さの範囲を使用することもできる。

10

【0021】

本発明の実施形態によると、基板 110 は、サファイア、バルク GaN、バルク AlN 又はバルク AlGa_xN 基板を含むことができる。第 1 のエピタキシャル層 111、第 2 のエピタキシャル層 112 及び第 3 のエピタキシャル層 114 は、GaN、AlN、AlGa_xN 又は AlInGa_xN を含み、電子雪崩が発生することになる p-n 接合を形成することができる。APD 素子はまた、光の波長（又は、エネルギー）を制御するために、様々な Al 及び Ga 濃度の AlGa_xN エピタキシャル層を含むことができる。APD 素子はまた、Al、In 及び Ga 濃度を变化させた AlInGa_xN 層の使用を含むことができる。第 1 のエピタキシャル層 111 は、ほぼ 2 ミクロンの厚さを有することができ、第 2 のエピタキシャル層 112 は、ほぼ 3 ミクロンの厚さを有することができ、また第 3 のエピタキシャル層 114 は、ほぼ 0.4 ミクロンの厚さを有することができる。図 1 に関連して上に説明したように、その他の測定値を同様に使用することができる。GaN APD においては、金属電極 118 及び 120 は、様々な金属の組み合わせを含むことができる。具体的には、金属電極 118 は、カソード端部において Ti / Au、Ti / Al / Ti / Au 又は Ti / Al / Pt / Au を含むことができる。金属電極 120 は、アノード端部において Ni / Au 又は Ni / Pt / Au を含むことができる。薄い金属層を使用して、低抵抗を維持しかつ電界降下を最小にするか又は除去しながら、p 及び n コンタクトの両方に対する電極を形成することができる。オームコンタクトを形成するその他の材料を使用することもできる。パッシベーション層 116 及び 122 は、SiO₂ を含むことができる。更に、随意的な PSG 層 124 を使用して、可動イオンが表面近くの材料に損傷を与えるのを防止し、UV の表面反射を減少させることができる。この PSG 層は、ほぼ 500 オングストロームから 1 ミクロンの厚さを有することができる。その他の材料及び厚さの範囲を使用することもできる。

20

30

【0022】

図 2 は、本発明の実施形態による、APD 素子の傾斜側面構造を備えた APD におけるモデル化された電界分布の例である。図 2 は、位置の関数として電界を示し、電荷が最小になる傾斜端縁における高電界の減少を強調表示している。端縁におけるより低い電界強度は、符号 214 によって示されている。中位の電界 212 に対して電界 210 は、端縁から離れて集中した高電界輪郭を示す。ほぼ 2 MV / cm の下で、電界 210 は、そうでなければ半導体が高い表面漏洩を受けることになるような、SiC の表面から十分に離れた距離（例えば、> 1 ミクロン）を維持しながら電子雪崩を可能にするほど十分に高い。従って、SiO₂ 層は、メサ構造体の傾斜側壁近くの表面における不十分な電気的結合を不活性化する上で重要である。更に、APD 素子のこの傾斜メサ側壁は、メサ端縁近くに現れる電荷量を最小にし、それによって、その周辺領域における電界を低くする。

40

【0023】

イオンベースのドライ・エッチング技術を使用して、SiC 及び GaN 材料を処理し、傾斜メサ側壁を生じさせることができる。例えば、フォトレジスト・イオンエッチ工程及び / 又はフッ素ベースの化学作用を使用して、APD 素子の傾斜側壁メサを形成することができる。傾斜メサ形状は、APD 素子の高電界が該素子の中心に閉じ込められるのを可

50

能にし、それによって、領域に応じて電子雪崩メカニズムを調整可能にする。換言すれば、電界閉じ込めのために傾斜メサ側壁を使用することにより、より多い又はより少ない活性領域の異なる大きさに素子を調整することを可能にする。このことは、最高電界を素子の端縁にではなくて、素子内にあるように集中させる上で、特に有利である。

【 0 0 2 4 】

特定のSiC基板及びエピタキシャル構造は、ほぼ400から500Vで降伏を生じることができる。具体的には、図1に示す例示的な構造とドーピングとは、ほぼ400Vで降伏する実施形態を示す図3において符号320で示すような、半導体全体にわたる電界分布を生じることができる。例えば、降伏（及び電子雪崩）において利用することができるピーク電界は、ほぼ $1.0 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 付近で発生することになる。ここで、空乏領域（例えば、高電界が存在する領域）はほぼ5ミクロンの間に延びているので、そのピーク電界に到達するためのバイアスは、ほぼ400Vとすることができる。

10

【 0 0 2 5 】

図3は、本発明の実施形態によるアバランシェ・フォトダイオード素子におけるモデル化された電界分布の断面の例である。モデルの中心を垂直方向に通るカットラインにおける電界強度のプロットは、符号310によって示され、素子内部の傾斜端縁に沿ったプロットは符号320によって示され、また端縁を覆っている酸化物領域における傾斜端縁に沿ったプロットは、符号330によって示されている。最高電界は、垂直カットライン310に沿っており、それはほぼ $3.0 \times 10^6 \text{ V/cm}$ においてピークになっている。SiC電界320及び傾斜を覆っている酸化物領域の電界330の両方は、ほぼ $1.0 \times 10^6 \text{ V/cm}$ においてピークになっている。酸化物領域におけるピーク電界を2から $3 \times 10^6 \text{ V/cm}$ より小さく保つことは、酸化物の信頼性の問題に対して有用であると考えられる。傾斜に沿った経路長さは垂直カットラインよりも長いので、これらの電界プロットは、これらカットに沿ってより長い広がりを持つ。

20

【 0 0 2 6 】

図4は、本発明の実施形態による、PSG膜の測定された透過率及び4H-SiCの計算された透過率の光学データの例である。符号410は、空気中でのPSGの測定された透過率を示す。図4に示すように、空気中でのPSGの測定された透過率は、符号420で示すような、SiCから予測されたものである計算値よりも高い。曲線420は、4H-SiCにおける屈折率から求めることができる。図4は、PSGで被覆された表面が、可動イオンを阻止することに加えて、より高レベルの光吸収をもたらすことを示している。

30

【 0 0 2 7 】

本発明の実施形態のAPD素子は、素子端縁においてではなくて、該素子の収集領域にわたって均一にアバランシェ（電子雪崩）を生じる。本発明の正の傾斜接合は、p-n接合の均一平面部分に沿ってではなく、傾斜端縁において電界を引き延ばす。その結果、最高電界と従って電子雪崩動作とは、素子の周辺に沿ってではなく、該素子の活性領域内で発生する。その結果、電子雪崩動作の間に放散された電力は、最も広い可能性領域全体にわたって広がり、それによってホットスポットの形成とそれに関連する信頼性の問題を回避する。第3のエピタキシャル層114は、空乏領域を内部的に操作して、より高い電界が表面に到達するのを防止するように作用することができる。この素子は、高印加電圧下でp-n接合を使用して、電気的雪崩（例えば、降伏）を、該素子の意図した動作点近くで開始させる。このタイプの素子の電界は、該素子内部の空乏領域によって支援され、また大きな外部バイアスによって作り出された MV/cm のオーダとすることができる。この素子は、SiC及びGaN材料と該素子のエピタキシャル層の堅牢な化学的性質の利点を利用して、高温（例えば、150から200）及び/又は高振動（例えば、250G）の下で動作する。

40

【 0 0 2 8 】

本発明の別の実施形態によると、分離型吸収・倍増領域（SAMR）素子においては、第1のエピタキシャル層111と第2のエピタキシャル層112との間に追加の層を組み

50

込むことができ、この追加の層は、ほぼ1.0ミクロンの厚さとほぼ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のN-ドーパント濃度を有することができる。本発明のこの実施形態は、吸収領域（例えば、第2のエピタキシャル層112）から離れてp-n接合（例えば、電界が最も高い部位）の周りに中心をもつ状態に倍增領域を保つように機能することができる。このことは、倍增領域における不規則な吸収現象を最小化することによって、素子に観測される雑音を減少させるのを助けることができる。

【0029】

本発明の実施形態の電子雪崩の態様は、特にメサ側壁の角度に関して付加的な制約をもたらす。SiC及びGaN降伏と従って電子雪崩とにおいて大きな電界（例えば、一般的に1~3MV/cm）が必要とされるので、APD素子の端縁から離れて電界を閉じ込めて、表面に発生する電流漏洩を最小にするのが望ましい。傾斜メサは、ほぼ20から60度の間の角度で基板と交差する側壁を含むことができる。現在、SiC用にウェット及びドライ・エッチ技術があるが、一般的にドライ・エッチ技術の方が、ウェット技術に比較してより再現可能であり、また、より制御可能である。本発明の実施形態によると、ドライ・エッチ技術を使用できる。

10

【0030】

ドライ・エッチング技術においては、反応性イオン・エッチング（RIE）を使用してメサ構造を実現することができる。このエッチ作用は、付加的なプラズマ増強のために標準RIEチャンバにコイルを追加する誘導結合プラズマ（ICP）によって改善することができる。主として、これは、材料表面近くに付加的なイオンを発生させることを含み、このことが、イオンリッチなプラズマとRIEプラズマよりも空間的に更に均一なプラズマとを生成する。その結果、エッチング制御（例えば、物理的及び化学的）を改善し、均一性を強化することができる。

20

【0031】

マスク材料に対する特別な処理なしで、得られたメサ形状は、選択されたフォトレジスト（PR）とエッチングに先立ってそれが処理される条件とに依存して、基板の法線からの変位をほぼ0度から10度とすることができる。

【0032】

所望の角度を有するメサを作り出すための方法は少なくとも2つある。その方法は、PRのリフロー法とグレースケール・マスクング法とを含むことができる。PRのリフローは、露光に続いてPRをハードベークングして、PRから溶剤をベークアウトすることを可能にし、表面を「熔融状態」にし、それによって、PRの形状を変化させることによって行うことができる。例えば、フォトレジストを使用して、所望のほぼ4ミクロンの目標エッチ深さを達成することができる。このフォトレジストは、ほぼ10ミクロンよりも大きい厚さの皮膜を形成することができ、それによって、例えばSiC/PR選択比を使用して目標エッチ深さを0.5ミクロンほどの低い状態にすることを可能にする。この技術及び得られたICPEッチの例が、図5に示されており、そこでは、4H SiCは、4ミクロンのメサを有する状態で形成されている。

30

【0033】

図5は、本発明の実施形態による、傾斜メサ形状の走査型電子顕微鏡写真の例である。具体的には、図5は、SiCアバランシェ・フォトダイオードのコーナ部の走査型電子顕微鏡写真を示す。これは、フォトレジスト法のリフローを使用して傾斜メサ側壁を実現することができることを示している。

40

【0034】

グレースケールリングは、透明度又はグレースケールによって決定されるような幾つかのレベルの露光を実現する方法で現像されたフォトレジスト・マスクの利点を利用する。マスクを通した露光に続き、各領域においてマスクを通して受けた、マスクの透明度によって決定できる光照射量に基づいて、フォトレジストは現像されることができる。従って、レジストは、所望のPR形状を制御可能に実現できるような熔融状態にまで該レジストを

50

加熱することなく、形状化されることができる。この形状は、半導体材料がエッチされる
ときに、半導体材料内に転写されることができる。グレースケール・マスクは、高度のエ
ッチング制御性と再現性とを提供する。

【 0 0 3 5 】

図 6 は、本発明の実施形態による、APDの製造方法を示すフローチャートである。段
階 6 1 0 において、基板が準備され、この準備する段階は、例えばバルク基板と複数のエ
ピタキシャル材料とを準備することを含むことができる。段階 6 1 2 において、ウエハ構
造体が洗浄されることで、この場合、ウエハ構造体には、段階 6 1 0 の基板及びエピタ
キシャル材料が包含される。段階 6 1 4 において、メサのパターニングを行うことができ
る。メサのパターニングは、段階 6 1 6 におけるフォトレジスト・リフロー又は段階 6 1
8 におけるグレースケール・マスクングによって形成されることができる。段階 6 2 0 にお
いて、ICPエッチングを行って、メサ構造を形成することができる。段階 6 2 2 にお
いて、パターニングを行うことができる。具体的には、パターニングはフォトリソグラフ
ィ工程と呼ぶことができ、この工程において、フォトレジストは、制御された速度の下で
ウエハ上に回転吐出され、マスクと位置合わせされ、高エネルギー光に露光され、そして
現像される。得られたフォトレジストの特徴は、ほぼ垂直なフォトレジスト特徴形状を有
する真直ぐな側壁を含むことができる。段階 6 2 4 において、ICPエッチングを行って
、所望の厚さまでメサを薄くすることができる。段階 6 2 6 において、 SiO_2 の層をメ
サの表面上に成長させることができる。段階 6 2 8 において、この SiO_2 層は、所望の
形状及び/又は厚さにパターン化され、エッチされることができる。段階 6 3 0 において
、カソード及びアノードが形成されることができる。このカソード及びアノードの形成は
更に、付加的な段階としてパターニング、デポジティング、リフトオフ、アニーリング及
び/又はその他の追加段階を含むことができる。段階 6 3 2 において、PSG層をメサ表
面上に成長させることができる。段階 6 3 4 において、少なくとも1つのコンタクト(例
えば、金コンタクト)を構造体上に成長させることができる。

【 0 0 3 6 】

図 7 は、本発明の実施形態によるシンチレータ及び検出器の例である。 SiC 及び GaN
APD素子の上述の特徴は、ガンマ線放射を SiC 及び GaN APDが直接的に可
観測なUVに変換するシンチレータで使用することができる。ガンマ線をUVに変換する
シンチレータは、地下の下方穴のリアルタイムでのガンマ線検出に使用することができる
。例えば、本発明の SiC 及び GaN APDは、ほぼ250から400nmのUV光を
検出することができる。

【 0 0 3 7 】

ガンマ線放射を間接的に検出するために、シンチレータ結晶 7 1 0 と組み合わせてAP
D 7 3 2 を使用することができる。シンチレータ 7 0 0 は、ガンマ線 7 3 0 を受けるため
のシンチレータ結晶 7 1 0 と、レンズ(又は、レンズ構造体) 7 1 2 と、上で詳細に説明
したようなAPD 7 1 4 (例えば、 SiC APD又は GaN APD)と、増幅電子機
器 7 1 6 とを含むことができる。別の用途及び更なる実施形態において、その他の要素を
含むことができる。シンチレータ 7 0 0 はまた、圧縮プレート 7 1 8 と、保護を提供する
ためのシールド 7 2 0 と、ケーブルコネクタ 7 2 2 とを含むことができる。別の用途及び
更なる実施形態において、その他の外部構造体を設けることができる。

【 0 0 3 8 】

シンチレータ結晶 7 1 0 は、ガンマ線 7 3 0 を受け、例えば地下の水素(H)含有化合
物からのガンマ線 7 3 0 をUV線 7 3 2 に変換する。UV線 7 3 2 は、レンズ 7 1 2 (又
は、その他のレンズ構造体)によって集束され、上で詳細に説明した SiC APD又は
 GaN APDのようなAPD 7 1 4 によって受けられることができる。増幅電子機器 7
1 6 のような付加的な電子機器を使用して、受信したUV信号を増強し、増幅し又は他の
方法で処理することができる。これらの構成部品は、例えば油井掘さくのような様々
な用途における地下の下方穴に配備するためにチューブ内に組み込まれることができ
る。図 7 のシンチレータは、高温(例えば、150 から200)及び/又は高振動(例えば、

250G)の下で動作可能な、符号732として示すようなSiCアバランシェ・フォトダイオードの堅牢な性質の利点を利用している。

【0039】

図8は、本発明の実施形態による、単一のAPDの平面図である。破線は、傾斜領域の底部を示す。図8において示すように、パッシベーション層116及び122は、外部四角形表面を覆っているように示されている。カソード金属118は、中央の四角形として示されている。PSG層124の平面図は、カソード金属118と、パッシベーション層116及び122と間に示されている。図9は、本発明の実施形態によるアレイ構成の例である。SiC及びGaN APDの上記の特徴は、アレイの構造に一体化して、信号出力と共に光収集を増大させることができる。四角形の構成を示しているが、他の形状及び構成を、本発明の実施形態によるAPDのアレイによって形成することもできる。

10

【0040】

本発明は、本明細書に説明した特定の実施形態によって、技術的範囲が限定されるものではない。事実、本明細書に説明した実施形態に加えて、本発明の様々な変更が、前述の説明及び添付の図面から、当業者には明らかであろう。従って、そのような変更は、同時に提出した特許請求の範囲の技術的範囲に含まれることを意図している。更に、本明細書では特定の目的に対する特定の環境における特定の実施に関して、本発明を説明したが、本発明の有用性はそれらに限定されるものではないこと及び本発明はあらゆる数の目的に対するあらゆる数の環境において有利に実施することができることは、当業者には分かるであろう。特許請求の範囲において示した参照符号は、本発明の技術的範囲を狭めることを意図するものではなくて、それらを容易に理解するためのものである。

20

【図面の簡単な説明】

【0041】

【図1】本発明の実施形態によるアバランシェ・フォトダイオードの断面図の例。

【図2】本発明の実施形態による、傾斜側壁構造を備えたAPDにおけるモデル化された電界分布の例。

【図3】本発明の実施形態によるアバランシェ・フォトダイオード素子におけるモデル化された電界分布の断面の例。

【図4】本発明の実施形態によるPSG膜の計測された透過率及び4H SiCの計算された透過率の光学データの例。

30

【図5】本発明の実施形態による、傾斜メサ形状の走査型電子顕微鏡写真の例。

【図6】本発明の実施形態による、APDの製造方法を示すフローチャート。

【図7】本発明の実施形態によるシンチレータ及び検出器の例。

【図8】本発明の実施形態による、単一のAPDの平面図。

【図9】本発明の実施形態によるアレイ構成の例。

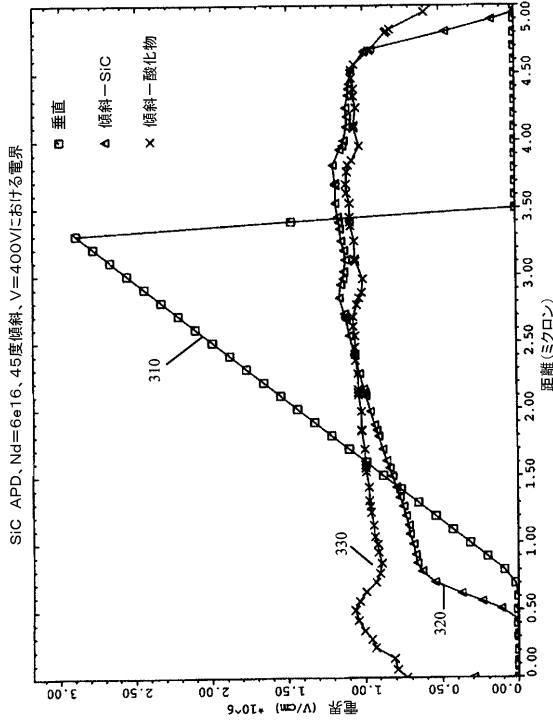
【符号の説明】

【0042】

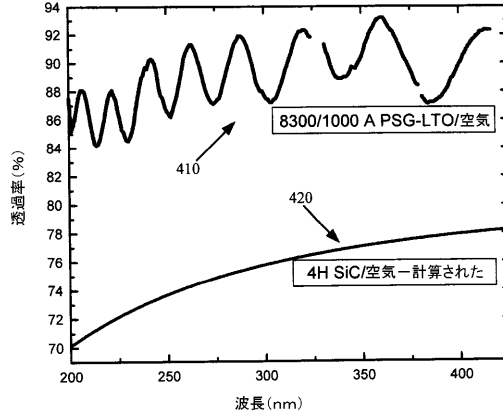
- 100 アバランシェ・フォトダイオード素子
- 110 基板
- 111 第1の層
- 112 第2の層
- 114 第3の層
- 116、122 パッシベーション層
- 124 ケイ酸リンガラス層
- 118、120 金属電極

40

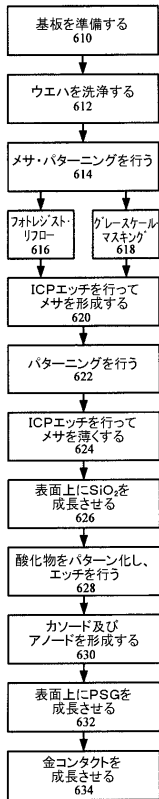
【図3】



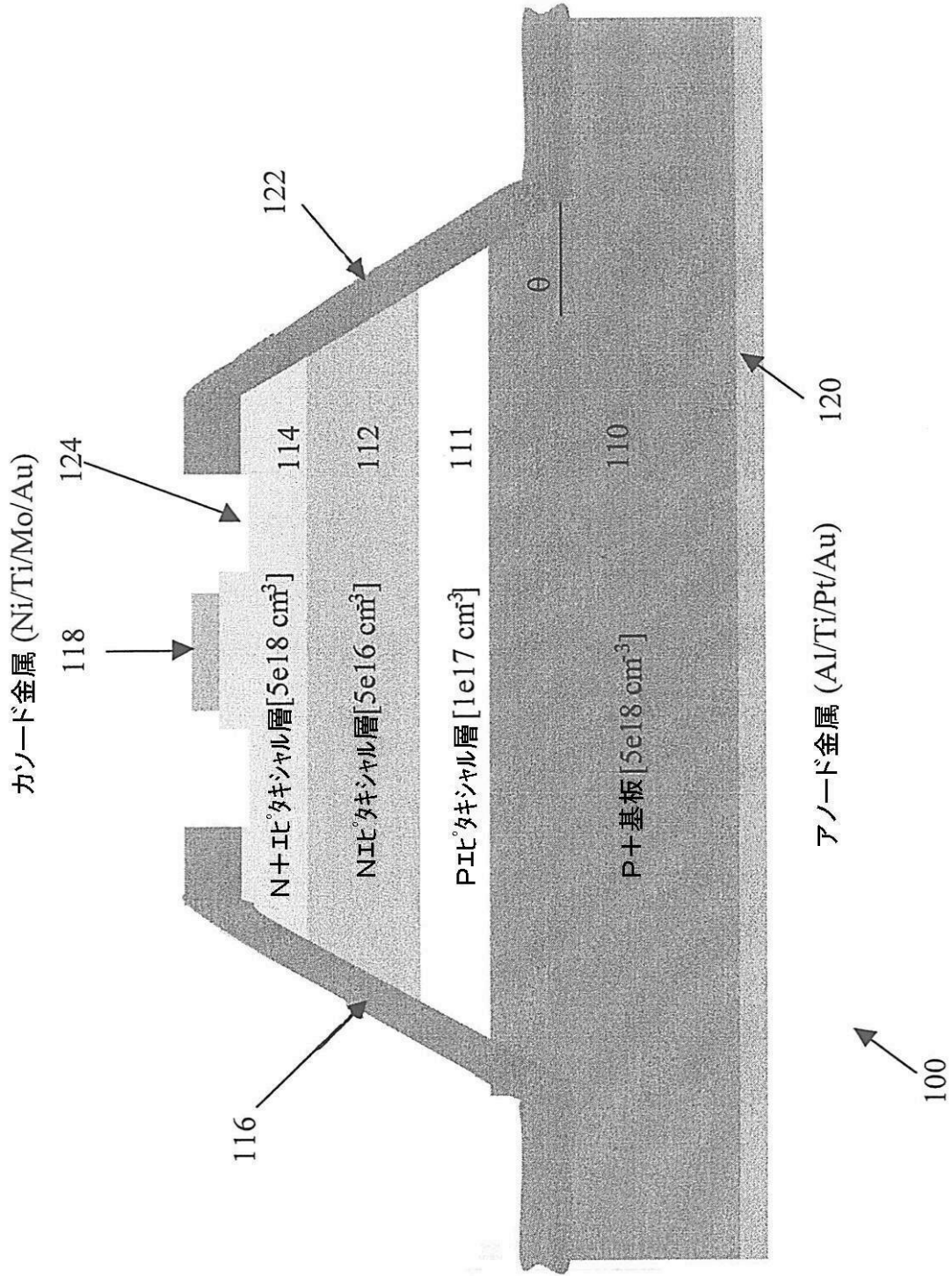
【図4】



【図6】

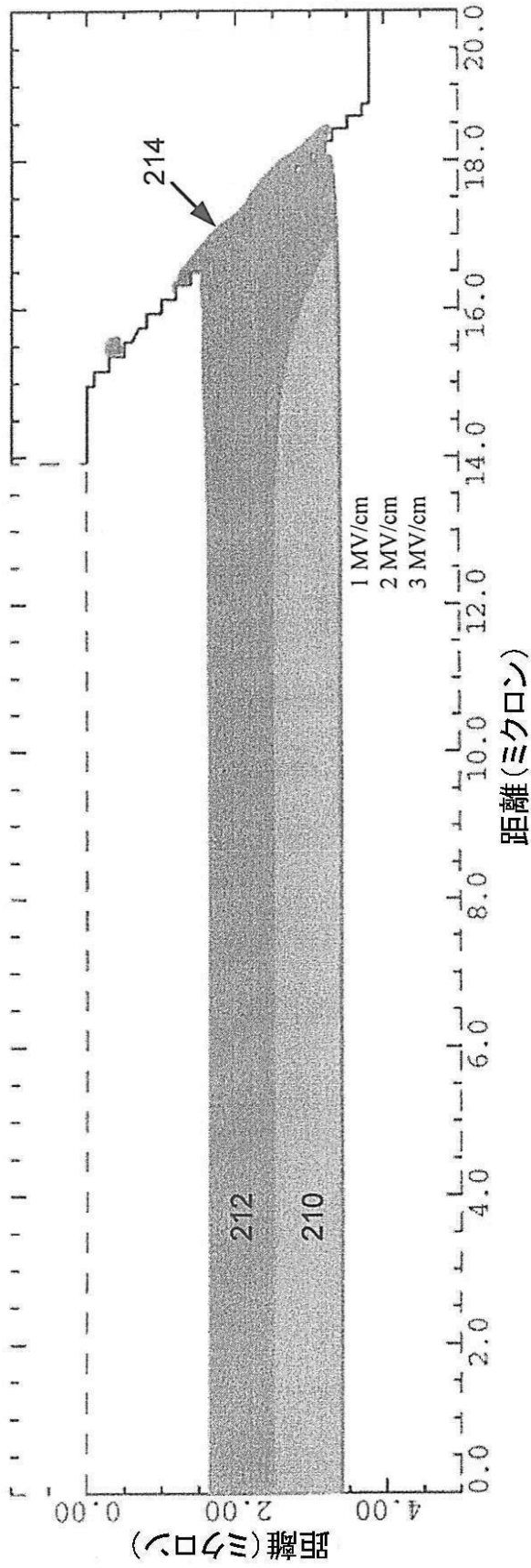


【図1】

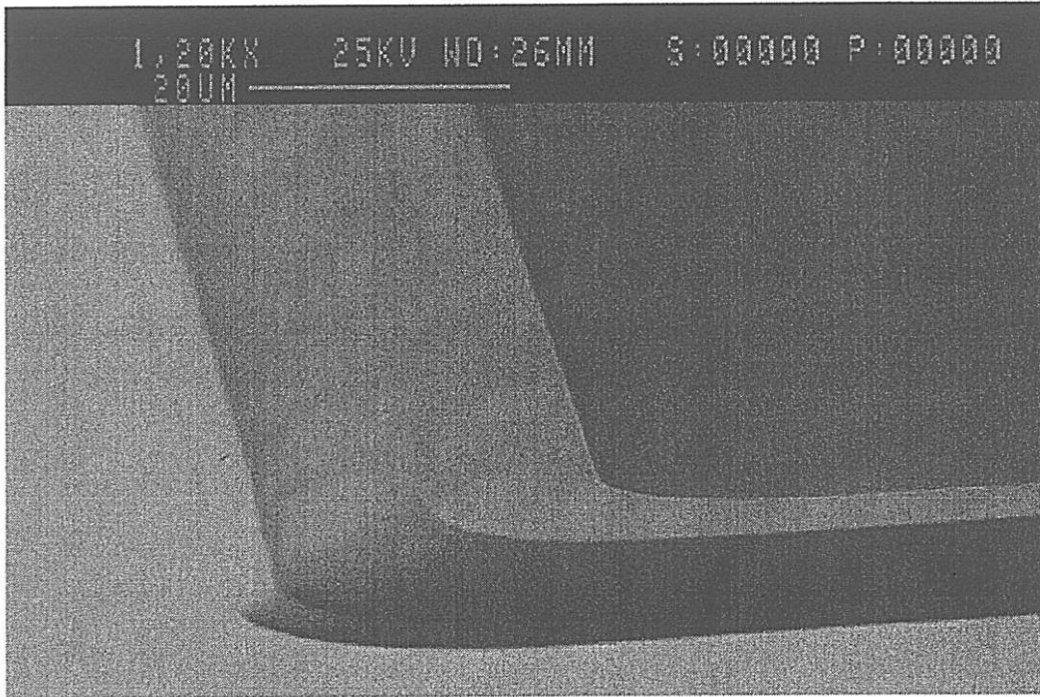


【 図 2 】

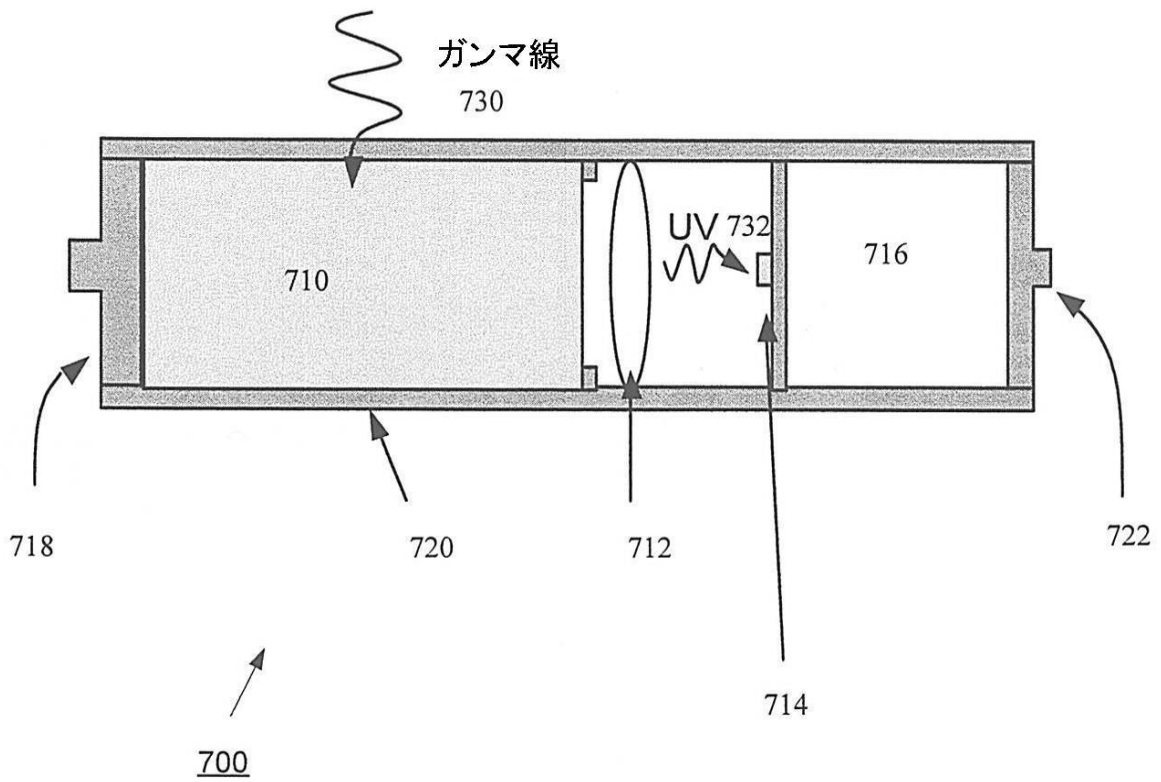
SiC APD, Nd=6e16, 45度傾斜 - 400V



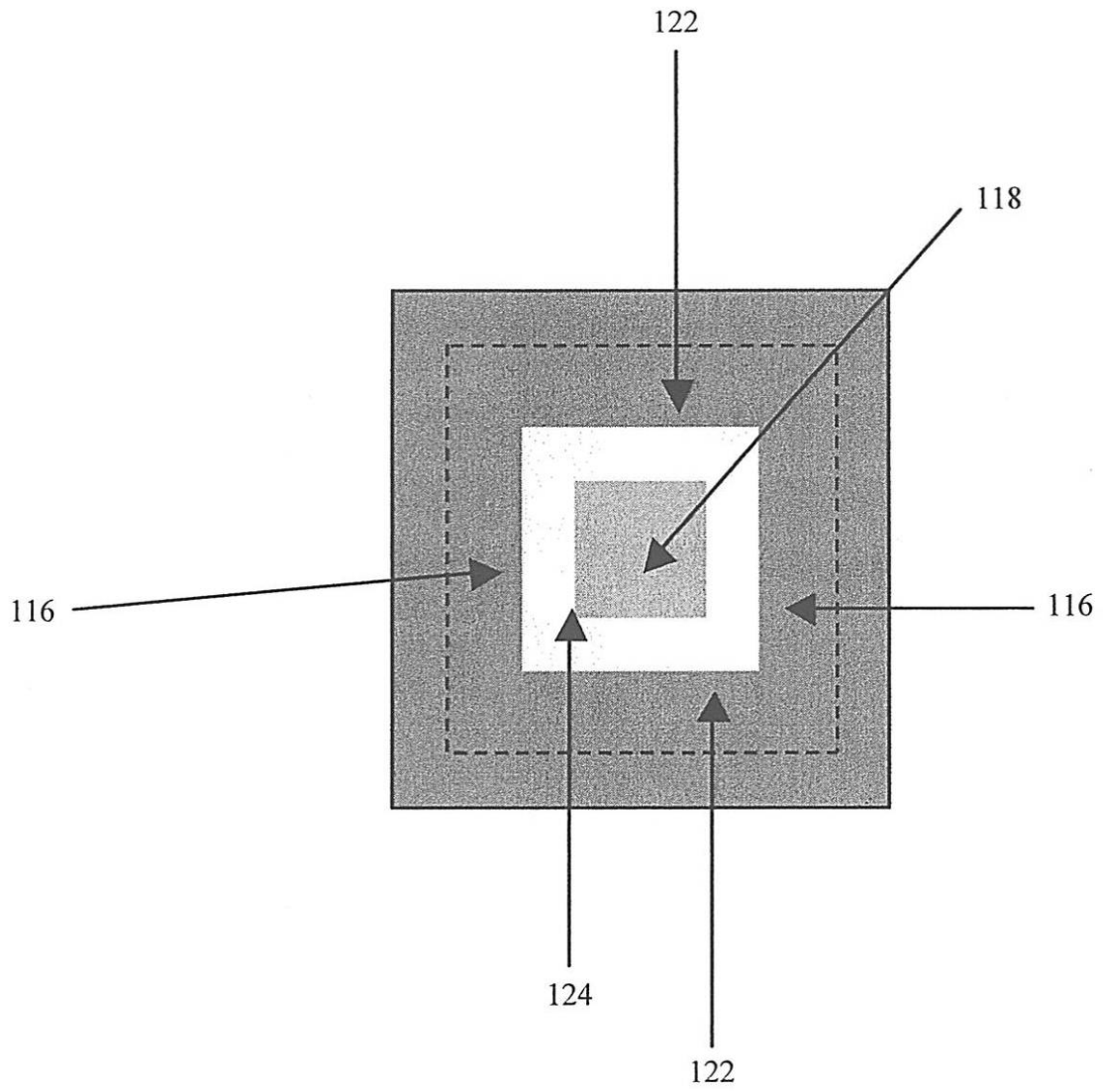
【図5】



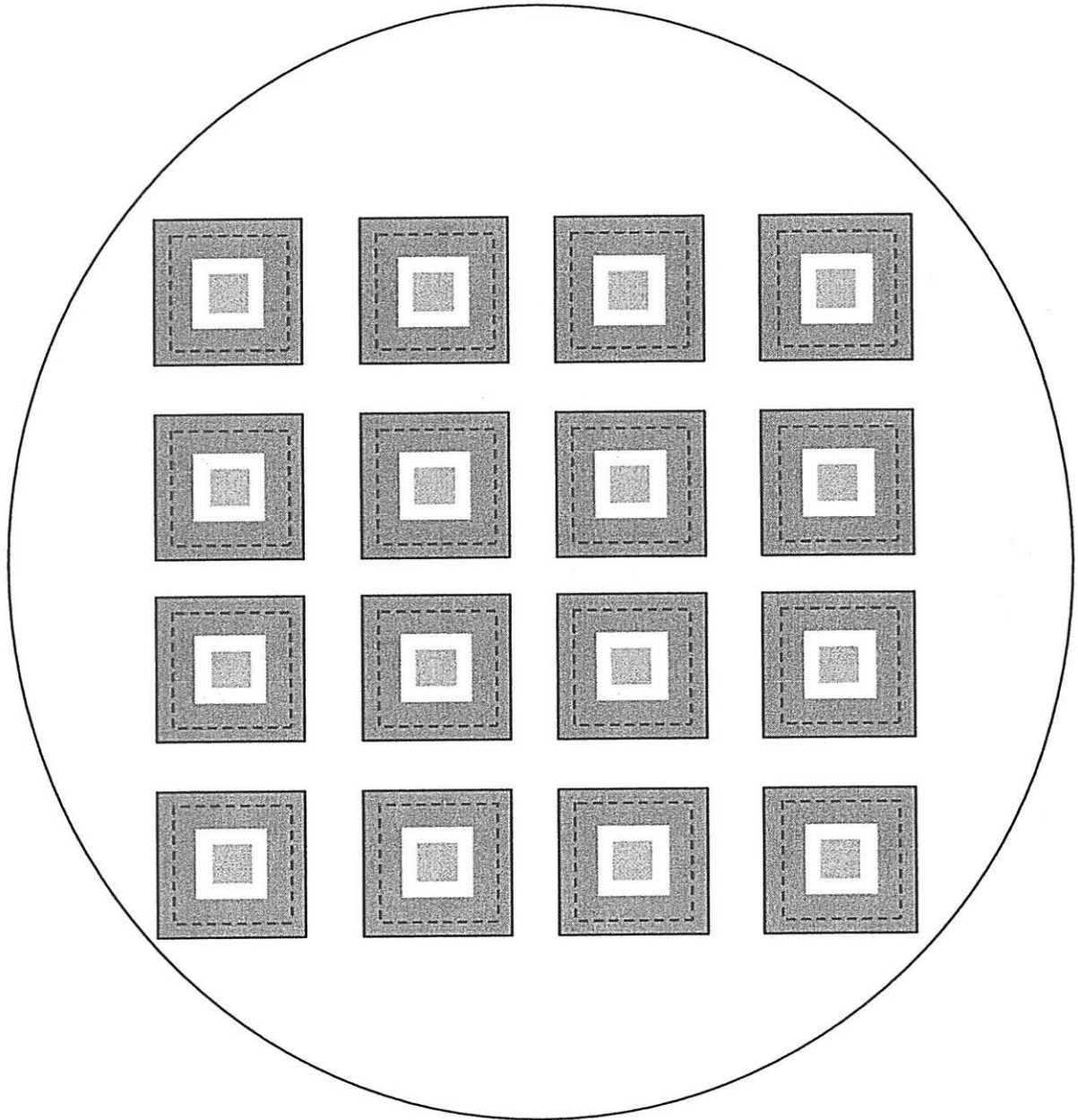
【図7】



【 図 8 】



【 9 】



フロントページの続き

- (72)発明者 デール・エム・ブラウン
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネクタデー、エステー・ジョセフ・ドライブ、2338番
- (72)発明者 スティーブン・ディー・アーサー
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、グレンビル、エルティンジ・プレイス、20番
- (72)発明者 ケビン・エス・マートチャ
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、トロイ、ボタン・ロード、1535番
- (72)発明者 ジェームズ・ダブリュ・クレッチマー
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ボールストン・スパ、ワインベリー・レーン、18番

審査官 加藤 昌伸

- (56)参考文献 特開昭61-226973(JP,A)
特開平04-137565(JP,A)
特開平06-037349(JP,A)
特開平03-278482(JP,A)
特開平05-067803(JP,A)
特開平05-198787(JP,A)
特開平05-259497(JP,A)
特開平07-094773(JP,A)
特開平07-254724(JP,A)
特開平10-125894(JP,A)
特開平11-186587(JP,A)
特開昭60-049681(JP,A)
特開昭61-095580(JP,A)
特開2001-230442(JP,A)
特開2001-244496(JP,A)
F Yan et al., Low-noise visible-blind UV avalanche photodiodes with edge terminated by 2° positive bevel, Electron. Lett., 英国, 2002年 3月28日, vol.38 No.7, p.335-336
A.O.Konstantinov, et al., Ionization Rates And Critical Fields In 4H Silicon Carbide, Appl. Phys. Lett., 米国, 1997年 7月 7日, vol. 71, No. 1, p. 90-92

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 31/10-31/119