

高感度センサ用大面積AllnAs-APDアレー

山路和樹*
笹畑圭史*
石村栄太郎*

Large-Area AllnAs-APD Array Device for High Sensitivity Sensing

Kazuki Yamaji, Yoshifumi Sasahata, Eitaro Ishimura

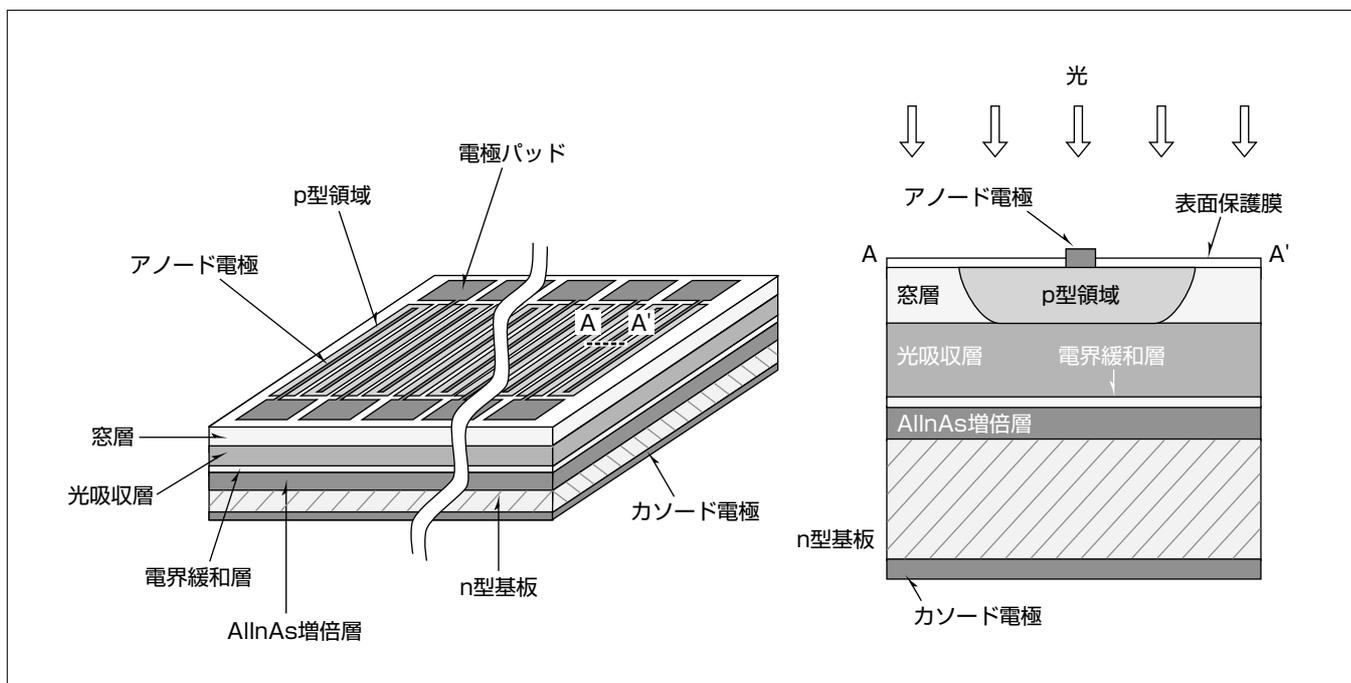
要旨

情報化社会の進展に伴い、民生用途、産業用途の双方で光を利用した情報処理が様々な場面で用いられるようになってきている。光を検出するための受光素子として半導体光センサが広く用いられており、赤外線通信や光ファイバ通信等の情報伝送、車の衝突防止センサや自動ドアの開閉センサのような動体位置検出、カメラやサーモグラフィ等のイメージング、放射温度計やガス分析等の産業用途、大気分析や地形測量等のリモートセンシングなど、その利用先は多岐にわたる。

本稿では、光センサ用途AllnAs-APD(Avalanche Photo Diode:アバランシェフォトダイオード)アレー受光素子の設計及び特性評価結果を示す。APDはアバランシェ増倍を利用するため高感度であり、また、イオン化率比が大きく雑音指数の小さいAllnAsを増倍層に用いることによって低雑音化を図っている。アイセーフ(Eye-safe)波長である1.5 μm 帯で高い感度を持つInGaAsを光吸収層に

用いている。用途としては、レーザを用いたリモートセンシングの一種である3Dレーザセンサ⁽¹⁾などが挙げられる。

三菱電機では、InGaAsを光吸収層に用いた1.5 μm 帯光通信用APDを開発しており、受光径 ϕ 40~50 μm 、受光感度 $\geq 0.9\text{A/W}$ 、量子効率80%以上のAPDを報告している⁽²⁾⁽³⁾。これまで報告したAPDは受光領域が数十 μm の大きさであったが、この報告で述べるAPDアレー素子は、複数のAPDを集積して一次元アレー構造とし、レーザセンサ向けに受光領域の大面積化(2 \times 2(mm))を図った。受光領域を複数の素子に分割することによって、1つ1つの素子容量を小さくし、帯域の確保と同時に受光領域の大面積化を図っている。光吸収層と増倍層が分離されたSAM(Separated Absorption and Multiplication layers)型構造を適用し、ガードリングなどを設けることなくエッジブレイクダウンを抑制可能な当社独自の構造を採用することによって、大面積で均一な受光感度が得られた。



APDアレー素子の模式及びAPD素子の断面

左図はAPDアレー素子の模式を示す。右図は左図中のA-A'に沿った断面構造を示している。長方形のAPD素子を一次元アレー状に集積し、全体で1つの大きな受光領域を構成している。受光領域を複数の素子に分割して構成することによって、個々のAPD素子の容量を小さくして帯域の向上を図りつつ受光領域の拡大を図っている。光が入射して生じる光電流信号は、後段の受信回路によって各素子から取り出され、足し合わされて一つの信号となる。

1. ま え が き

情報化社会の進展に伴い、民生用途、産業用途の双方で光を利用した情報処理が様々な場面で用いられるようになってきている。光を用いた情報処理は、光を媒体にデータを送受する情報伝送や、観測対象の反射光・透過光・放射光を検出し対象に関する情報を得るセンシング等があり、センシングは光源からの信号光を用いる能動的なものと同観測対象の自発光や環境光を利用する受動的なものに大別される。どちらの場合も光を検出するための受光素子が必要である。半導体を用いた光センサは受光素子として広く用いられており、赤外線通信や光ファイバ通信等の光通信、車の衝突防止センサや自動ドアの開閉センサのような動体位置検出、カメラやサーモグラフィ等のイメージング、放射温度計やガス分析等の産業用途、大気分析や地形測量等のリモートセンシングなど、その利用先は多岐にわたる。

本稿では、大面積・高感度を特長とする光センサ用途APDアレー受光素子について述べる。アイセーフ(Eye-safe)波長である1.5 μm 帯のレーザを用いたセンサを想定し、この波長帯で高い感度を持つInGaAsを光吸収層に用いている。用途として例えば3Dレーザセンサが挙げられる。これは光源としてレーザを用いたりリモートセンシングの一種であり、レーザを走査し、その反射光を検出することによって物体をリアルタイムに検出するシステムである。

当社では、InGaAsを光吸収層に用いた光通信用途1.5 μm 帯APDを開発し、受光径 $\phi 40\sim 50\mu\text{m}$ 、受光感度 $\geq 0.9\text{A/W}$ 、量子効率80%以上のAPDを報告している。増倍層の材料として、イオン化率比が大きく増倍雑音を低減できるAlInAsを用いており、低雑音高感度のAPDを実現している。

これまで報告した光通信用AlInAs-APDは、受光径が数十 μm の大きさであった。本稿では3Dレーザセンサ向けに2 \times 2(mm)の受光領域を持つ高感度AlInAs-APDアレーを設計し、特性評価した結果を述べる。

2. 大面積AlInAs-APDアレー

2.1 素子構造

先に述べたように、センサの画角を確保するためには受光領域の大面積化が必要である。受光領域を単一のAPD素子で構成した場合、素子のpn接合容量が大きいため、応答速度が低下し必要な帯域が得られない。受光領域を複数の素子に分割し、全体として大きな受光領域を構成することで、受光面積を確保しながら個々の素子容量を小さくすることが可能であり、受光面積と素子の応答速度を両立させることができる。一方で、受光領域の分割数が増えるほど、素子間の隙間が増えて有効領域の比である開口率が低下するというデメリットがある。開口率が低下した分、受光領域に入射する光のうち光電流に寄与することのでき

る光量が減少するため、S/N(Signal to Noise)比の低下を招く。また、分割数が増えるほど、各素子から光電流信号を取り出すための後段の受信回路の構成や実装が複雑化するというデメリットもある。本稿で述べる受光デバイスは、応答速度と開口率のトレードオフを考慮し、次元アレー構造とした。すなわち、APD素子を1方向にアレー状に配列し、全体で大きな受光領域を形成する構造である。図1及び図2に本稿で述べるAPDアレー素子の模式的な俯瞰(ふかん)図及び上面図をそれぞれ示す。長方形の受光領域を持つ素子を1単位とし、これを長辺方向に並べることによって全体で大きな受光領域を形成している。個々の素子はp型領域上に設けた直線状のアノード電極から給電される。各々のアノード電極は、ワイヤボンディングによる電気結線を行うための電極パッドに接続している。図1又は図2に示しているように、電極パッドは上下に互い違いとなるように配置しており、これは素子を密に配置し、隙間を減らして開口率を高くするためである。カソード電極は共通であり、基板の裏面に設けている。

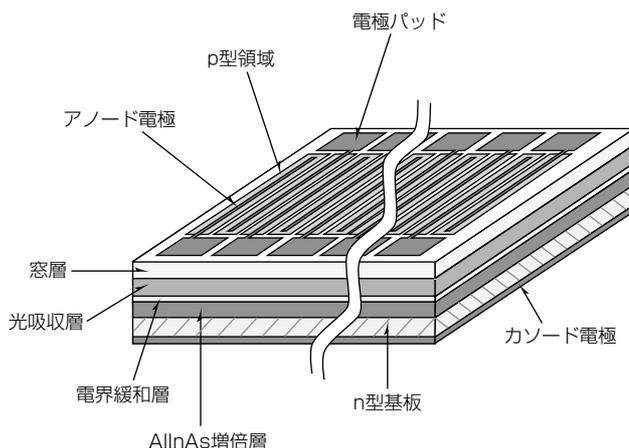


図1. AlInAs-APDアレー素子の模式図

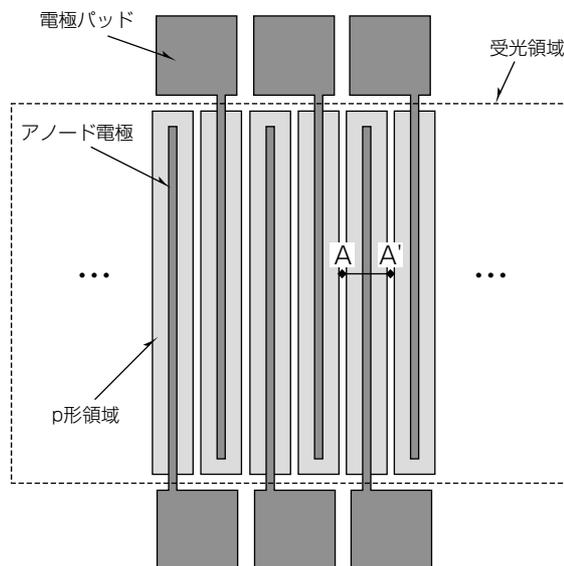


図2. AlInAs-APDアレー素子の上面図

次に、APDアレー素子の断面構造について述べる。センサ用途の受光素子として用いるためには、受光領域内で均一な特性が望ましい。また、高電圧を印加し、アバランシェ増倍が生じる条件で動作させるAPDでは、受光領域の中央部よりも先にp型領域端部でアバランシェブレイクダウンが起きるエッジブレイクダウン(Edge Breakdown)が問題となる。図3は例としてInP-APDの断面構造を示したものである。p型領域の端部は曲率半径が小さいため電界集中が起りやすく、受光領域の中央部よりも低い電圧で増倍を開始しエッジブレイクダウンを引き起こす。電界集中を緩和するためには、例えば同図中に示しているようにガードリングなどを設ける必要がある。しかし、ガードリングを設けた場合、ガードリング近傍では十分な増倍が得られないため入力光に対する感度が下がり、実効的に開口率が低下する。また、p型領域は選択拡散やイオン注入によって形成されるが、その過程でp型領域の深さにばらつきが生じるおそれがある。図3に示す構造では、p型領域の深さが変動するとそれに伴って増倍領域の厚さが変動し、同じ印加電圧でも増倍領域中の電界強度が変化するため、増倍特性が変化する。受光領域を大面積化するためには、増倍特性すなわち増倍領域中の電界強度分布を均一に近づけることが望ましい。

本稿で述べるAPDアレー素子の断面構造を図4に示す。図4は図2の上面図で、図2中のA-A'で示した直線上の断面を示している。このAPDアレー素子はn型基板上にAlInAs増倍層/電界緩和層/InGaAs光吸収層を積層したエピタキシャル基板上に作製され、光吸収層と強電界の印加される増倍層が分離されたSAM(Separated Absorption and Multiplication layers)型構造を持つ。i型窓層に固相拡散法を用いてZnを選択拡散することによってp型領域を形

成した。電界強度が最も大きくなる領域(増倍層)とp型領域端との間に低電界の空乏領域(吸収層)が存在すること、及び選択拡散によってp型領域を形成することで局所的な電界集中を抑制したことの2点の効果によってエッジブレイクダウンを抑制し、ガードリングを設けない当社独自のガードリングフリー構造を形成し広いエリアにわたるAPDを実現している。増倍層の電界強度はエピタキシャル成長層の不純物濃度によって制御され、p型領域の深さがばらついても増倍特性への影響は小さい。素子の表面は表面保護膜で覆っている。

2.2 素子特性

図5は試作したAPDアレー素子の代表的な電流-電圧特性を示している。ブレイクダウン電圧 $V_{br}=43.0V$ 、暗電流 $370nA (@V=0.9V_{br})$ 、受光感度 $1.0A/W$ の特性を得た。本稿で述べるAPDアレーは構造上ガードリングを形成していないが、エッジブレイクダウンは見られず、良好な特性が得られた。また、最大増倍率は67と十分な値を得た。図6はAPDアレー素子の暗電流の分布を示している。暗電流はおおむね一定であり、均一なアレーになっていると考えられる。図7はAPDアレー素子の帯域を示している。帯域は増倍率を変化させながら測定した。 f_T , f_{CR} , f_{ava} はそれぞれ、空乏層のキャリア走行時間、CR時定数、増倍層における増倍時間によって決まる帯域の計算値を示している。帯域はCR時定数によって制限されていることが分かる。帯域は増倍率3~30の範囲でほぼ一定であり、1GHzであった。これは今回の3Dレーザセンサ用途としては十分なりアルタイム性を実現する応答速度である。

図8はAPDアレー素子の面内感度分布の代表例を示している。最もエッジブレイクダウンが起りやすい受光領域端部の面内感度分布を抜き出して示したものである。分

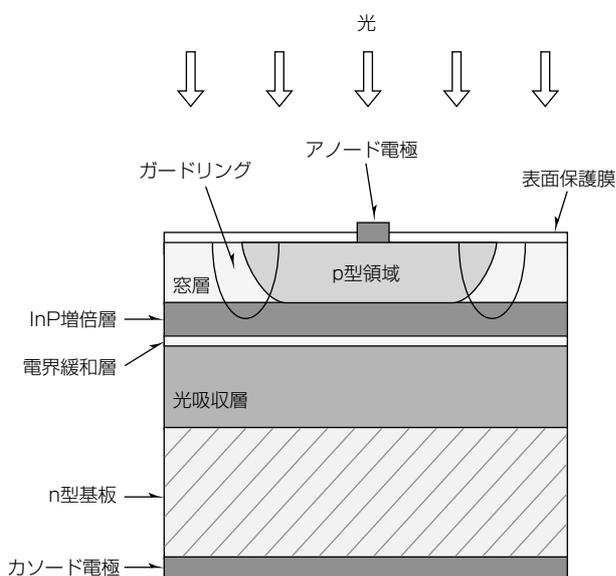


図3. InP-APDの断面構造の例

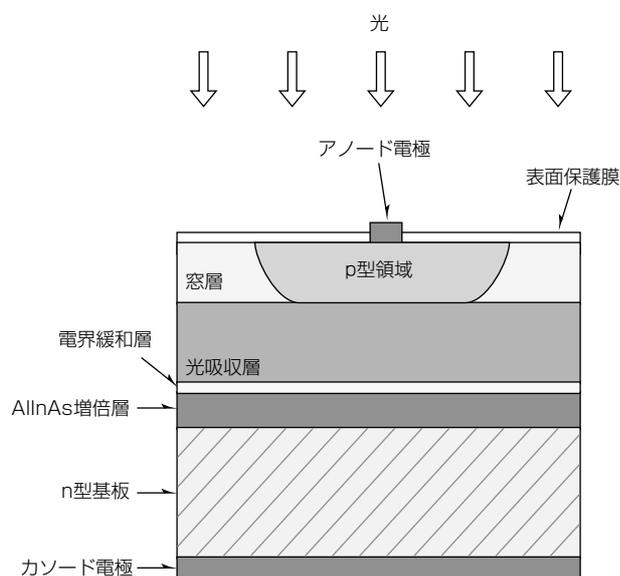


図4. AlInAs-APDアレー素子の断面構造

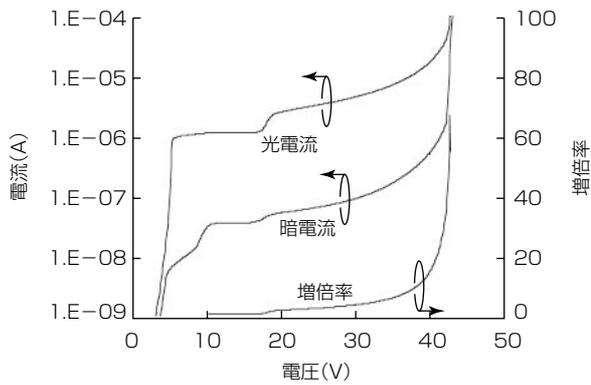


図 5. AllnAs-APDアレー素子の電流-電圧特性

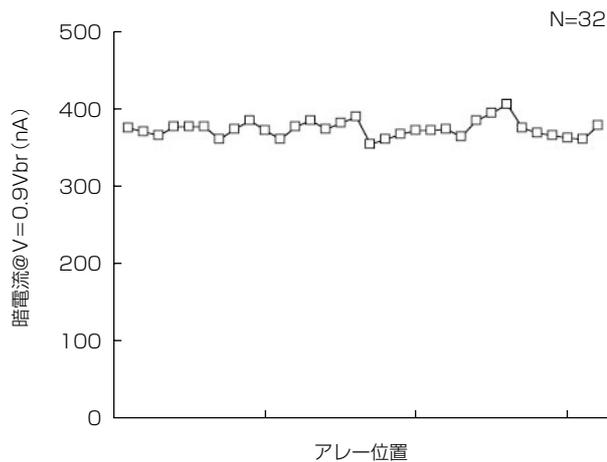


図 6. AllnAs-APDアレー素子の暗電流(印加電圧V=0.9Vbr)

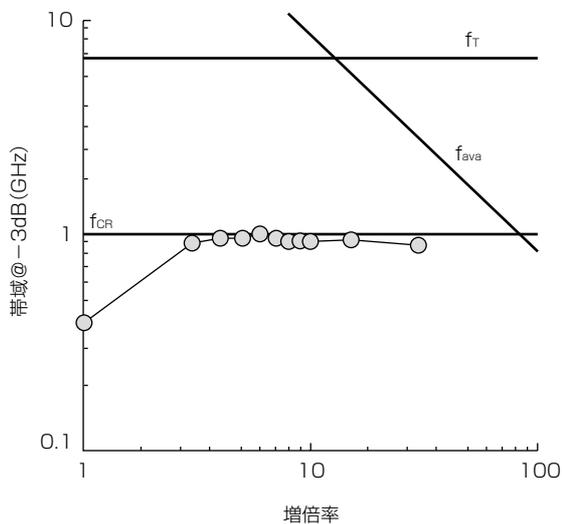


図 7. AllnAs-APDアレー素子の帯域

布の中央に谷が存在するのは、受光領域の中央を通るアノード電極の影になっているためである。エッジブレイクダウンなどの異状は見られず、均一な受光感度分布が得られることを確認した。主要な特性について表 1 にまとめた。

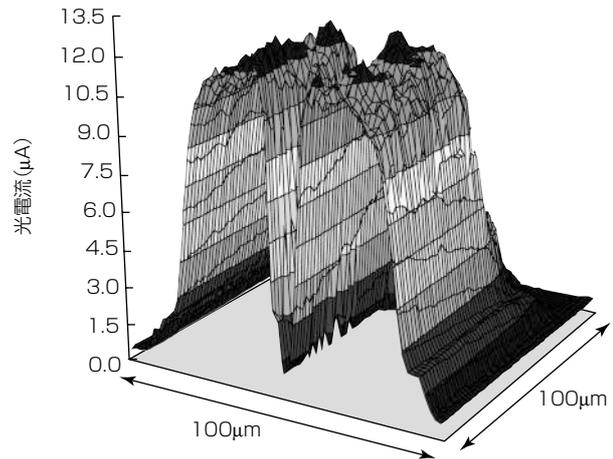


図 8. AllnAs-APDアレー素子の面内感度分布(M=10)

表 1. AllnAs-APDアレー素子の主要な特性

項目	特性値
ブレイクダウン電圧Vbr (V)	43.0
暗電流 (V=0.9Vbr) (nA)	370
受光感度 (A/W)	1.0
-3dB帯域 (M=10) (GHz)	1.0
最大増倍率	67

3. む す び

大面積・高感度を特長とするAllnAs-APDアレー素子について述べた。アイセーフ波長である1.5μm帯で高い感度を持つInGaAsを光吸収層として用い、AllnAsを増倍層として用いた。複数のAPDを一次元アレー状に集積することによって、1つ1つのAPD素子の容量を低減しつつ受光領域の面積を大きくし、応答速度と十分な受光面積を両立できるようにした。受光領域内で均一な受光感度を得るため、拡散領域と増倍層の間に挿入した電界緩和層によって電界集中を抑制するSAM構造を適用し、ガードリングを設けることなくエッジブレイクダウンを抑制できる構造とした。これらの結果、大面積APDアレー素子で、APDの基本動作を確認するとともに均一な受光特性を得た。

参 考 文 献

- (1) Tsuji, H., et al.: Pulsed 3D laser sensor with scan-less receiver, Proc. of SPIE, **8379**, Laser Radar Technology and Applications XVII, 837904 (2012)
- (2) 中路雅晴, ほか: 光通信用ガードリングフリーInAlAs APD, 電子情報通信学会技術研究報告. OPE, 光エレクトロニクス, **108**, No.194, 89~92 (2008)
- (3) 笹畑圭史, ほか: 10G-EPON用APDの開発, 電子情報通信学会技術研究報告. OPE, 光エレクトロニクス, **111**, No.112, 65~69 (2011)