



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ショットキー電極を用いたIN _{0.53} Ga _{0.47} As金属-半導体-金属フォトダイオード
Author(s)	菊地, 強; Kikuchi, Tsuyoshi; 大野, 英男 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 141, 113-123
Issue Date	1988-07-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42125
Type	departmental bulletin paper
File Information	141_113-124.pdf



ショットキー電極を用いた $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 金属—半導体—金属フォトダイオード

菊地 強 大野 英男 長谷川 英機
(昭和63年3月31日受理)

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ metal-semiconductor-metal photodiode using Schottky contact

Tsuyoshi KIKUCHI, Hideo OHNO, Hideki HASEGAWA
(Received March 31, 1988)

Abstract

Metal-semiconductor-metal photodiodes (MSM PDs) with $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ active layers were realized. Low Schottky barrier height of InGaAs was overcome by the insertion of lattice mismatched AlGaAs intermediary layer between metal and InGaAs active layer. Fabricated photodiodes utilizing interdigitated metal electrodes formed by self-alignment technique showed a fast rise and fall time of 650 ps which was limited by the capacitance of the device. The gain of the device was less than 1. Theoretical analysis showed that photocurrent consists of drift current due to the photogenerated carriers in the depletion layer and the diffusion current from the region surrounding the depletion layer.

1. 緒 言

現在オプトエレクトロニクスの関与するシステムは光通信, 光情報処理, 画像などの情報表示, レーザーなどを主体とした計測制御システム, 加工システムなど多岐にわたる。そしてこれらの分野では, 化合物半導体に代表される光半導体デバイスが中心的な役割を演じてきた。

我々は, 上述の種々のオプトエレクトロニクスシステムのうち特に光通信や光情報処理に焦点を合わせ, これらのシステムを構成する上で重要な要素となる OEIC (光—電子集積回路) 用の受光素子の実現を目的に研究を進めてきた。^{1,2)}

OEIC とは, レーザー, 光検出器, そして電子回路が同一の半導体基板上にモノリシックに集積化されたものである。OEIC 設計において一般に使用される光検出器には APD (アバランシェフォトダイオード), p-i-n フォトダイオード (PD), 光伝導型光検出器, MSMPD (金属—半導体—金属フォトダイオード) などがあげられる。ここでいう MSM PD とは 2 つのショットキー電極を有するものである。

APD, p-i-n PD は pn 接合を有する受光素子であり、動作層の構造が異なる FET との集積化においては、プロセス上のトラブルがocこりやすいため、OEIC 用の受光素子に適しているとはいえない。一方、光伝導型受光素子は、低電圧動作が可能、利得が大きい、構造が簡単であるという OEIC 用の受光素子として使用するうえでいくつかの長所を持つが、光応答の立ち上がり、立ち下がり部に遅い速度成分を持つというデバイスの不安定性を欠点として持つ。この高速化を阻害している要因は、界面準位による影響であるということがすでに明らかにされている。¹⁾

MSM PD は光伝導型受光素子の欠点である光応答の遅い立ち上がり、立ち下がりを克服することを目的として提案されたものである。³⁾⁴⁾ MSM PD はチャンネル内に形成される空乏層が界面準位の影響を低減するように有効的に働き、高速応答が可能である。

一般に提案されている MSM PD の光吸収層には GaAs が使用されている。これは GaAs が多くの金属に対して高いショットキー障壁を形成することが容易にできるためである。しかし、GaAs では光ファイバにおいて光損失の最小となる波長領域 (1.3~1.5 μm) を受光することができない。このため、この波長領域の光を受光するのに適した半導体材料を光吸収層にもった MSM PD を製作することが望まれる。このため、我々は、長波長を受光可能な $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ を光吸収層に用いることを考えた。しかし、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上に直接ショットキー電極を形成するとショットキー障壁が低く、我々が目的とするような MSM PD は実現できない。そこで、本報告では、電極構造を $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上に $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ を成長しその上にショットキー電極を形成した $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ assisted- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM 構造とした長波長用 MSM PD を初めて提案、試作し、その特性を調べたので報告する。

2. InGaAs MSM PD の構造と製作プロセス

2.1 素子構造

素子構造を図 1 に示す。実験に用いた試料は、半絶縁性 InP 基板の上に MOVPE (有機金属気相成長法) により、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ を成長し、その上に $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ を成長したものである。この際、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ と $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ の間の格子不整合が懸念されるが、MSM PD はチャンネル内に形成される空乏層で発生したフォトキャリアが主として光電流に寄与するためここではあまり問題にならない。詳しい議論は第 4 章で述べる。

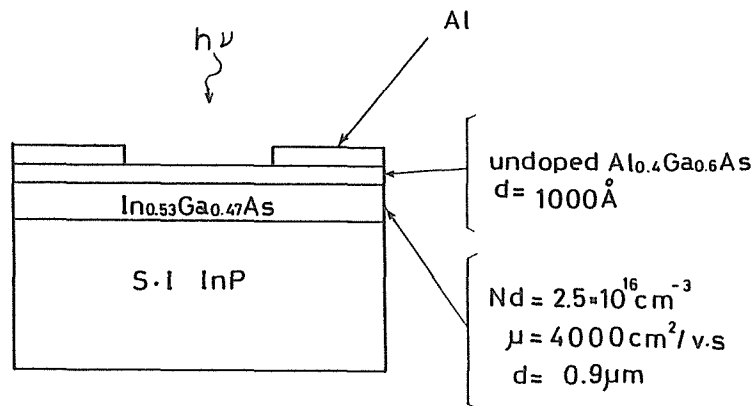


図 1 素子構造断面図

2.2 製作プロセス

本研究では、電極にインターデジタル型を採用し、またその製作はセルフアラインプロセスで行なった。そのプロセスを図2に示す。①試料表面に Al を 1000\AA 真空蒸着する。②ホットレジストにより電極パターンを形成した後、次のプロセスに耐えることができるように 145°C で1時間ポストベイクをする。③ $\text{NaCl}:\text{H}_2\text{O}=1:50$ のエッチング液でホットレジストでおおわれた以外の部分を除去する。④再度、試料表面に Al を 1000\AA 真空蒸着し、⑤その後不要部をリフトオフにより除去する。

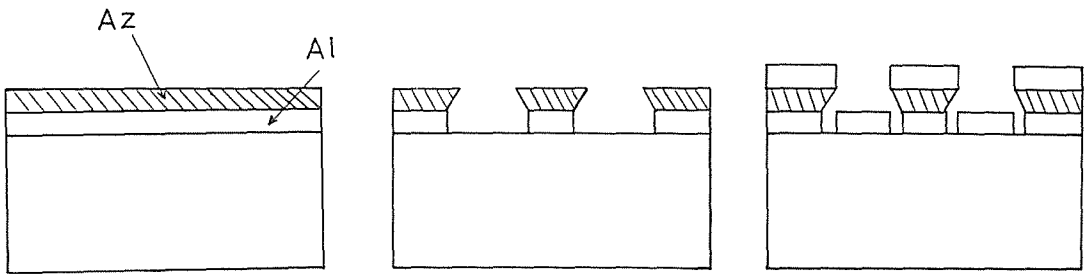


図2 セルフアラインプロセス

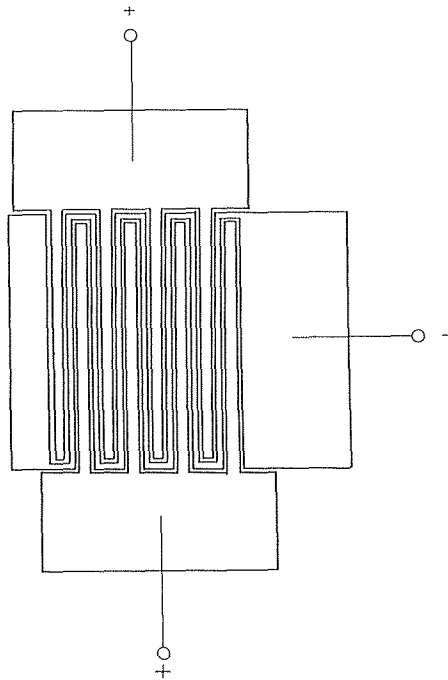


図3 MSM PDの上観図

作製された素子の上観図を図3に示す。電極をインターデジタル形とすることによって受光面積を大きくすることが可能となるとともに、セルフアラインプロセスによってチャンネル長が1 μm と短くなり高速動作に必要なチャンネル全体の空乏化をしやすくなった。さらにここでは、同時に半導体基板上に同一のフォトダイオードを2個形成し、これを並列に配線することによって、単一のフォトダイオードより2倍多く光電流が得られるようした。

3. 電氣的及び光学的特性

3.1 ショットキー接合の電流-電圧特性

$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 層によりショットキー障壁が増加したことを確認するために $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{n}^+\text{-InP}$ 構造の電流電圧特性を測定した。

図4に測定に用いた試料構造を示す。試料は光応答特性測定を行なうために作製された試料と同一のパラメーターを有するものである。ショットキー電極にはAlを用いた。裏面にはInSnを用いオーミック電極を形成した。図5にこの試料の電流電圧特性を示す。

ショットキー接触の整流特性は、金属からの熱電子放出の理論の適用によって求められ、順方向の電流密度に対する表式は、式(3-1)のように与えられる。

$$J = J_s \exp(qV/nkT) \tag{3-1}$$

$$J_s = A^* T^2 \exp(-qV_{bi}/kT)$$

ここで、 A^* はリチャードソン定数で、 $A^* = 4 \pi q m^* k^2 / h^3$ である。 V はバイアス電圧、 V_{bi} はショットキー障壁の高さ、 q は電気素量、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 h はプランク定数、 m^* は

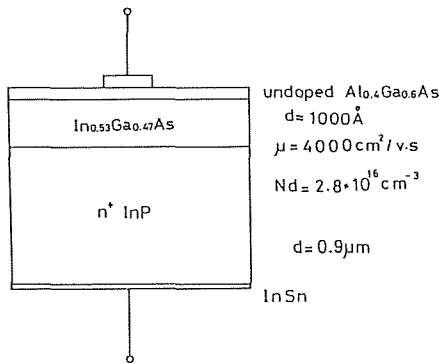


図4 電流電圧特性測定用試料構造

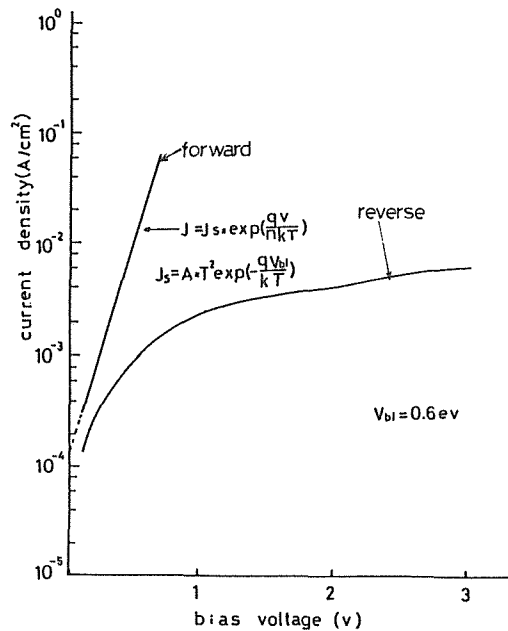


図5 電流電圧特性

半導体中の電子の有効質量であり $m^*=0.034$ とした。(3-1)の表式を用いると、順方向電流より $\text{Al}-\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 構造としたことによって、 $V_{bi}=0.6\text{eV}$ のショットキー障壁が形成されたことがわかる。表1に、本研究で得られた結果と同時に、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上に直接金属を蒸着して形成したショットキー障壁の高さを示す。 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 層を挿入することによりショットキー障壁の高さが大幅に増加していることがわかる。

表1 ショットキー障壁の高さ

	$\text{Al}^{(5)}$	$\text{Au}^{(5)}$	$\text{Nb}^{(6)}$
InGaAs	0.2eV	0.2eV	0.09eV
$\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$	0.6eV		

3.2 光応答特性

(1) 光応答測定回路

図6(a)に MSM PD の光応答出力測定の測定回路を示す。高周波で高速の測定を行なう場合測定系の直列インダクタンスやインピーダンスの不整合による信号の反射等が問題となるため測定にあたっては、信号伝達系の特性インピーダンスをすべて 50Ω に統一し、配線には同軸ケーブルをもちいた。試料は図6(b)のように金属板上に設置し、同軸ケーブルと試料は特性インピーダンス 50Ω のマイクロストリップ線路、SMA 同軸コネクタを介して接続した。図6(a)で用いているキャパシタンスは信号に直流成分が加わるのを防いでいる。インダクタンスは回路に高周波の信号電流が流れるのを防ぎ、MSM PD にかかるバイアス電圧を常に一定に保つ役割を果たしている。

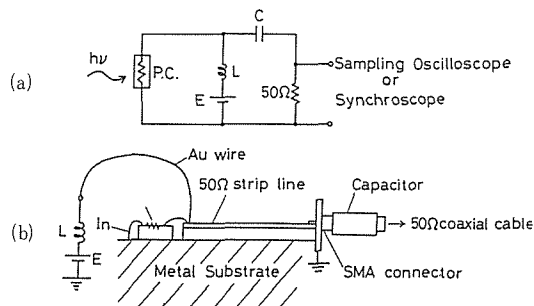


図6 光応答測定回路

光源には半導体レーザーダイオードモジュール NDL5007P (NEC) を用いた。これは、発信波長 $1.3\mu\text{m}$ の InGaAsP ダブルヘテロ接合形レーザーダイオードと光ファイバー、およびレーザーダイオードの発信出力をモニタするための Ge-PD を一体化したものである。

尚、レーザーダイオードの駆動にあたり、インピーダンス整合のためレーザーダイオードに直列に 47Ω の抵抗を接続し、これにパルス電圧を加えた。

(2) 光応答特性の光強度依存性

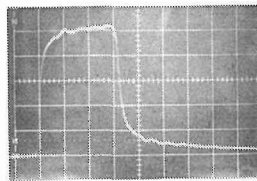
ここでは、Al-Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD とすることにより応答速度が改善されていることを確認するために、その光応答速度、および利得を In_{0.53}Ga_{0.47}As 光伝導型受光素子と比較してみた。

光伝導利得は、次のように定義した。

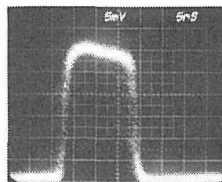
$$G = \frac{\Delta I/q}{(1-R)(1-e^{-\alpha W})P_{OPT}S}$$

ここで、 ΔI は光電流、 q は電気素量、 R は反射率、 α は吸収係数、 S は受光面積、 P_{OPT} は光子束密度、 W は光吸収層の厚さを示す。

光強度 1.9×10^{19} photons/cm² · s、バイアス電圧 3 V のときの Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD と In_{0.47}Ga_{0.53}As 光伝導型受光素子の光応答波形を図 7 に、一定バイアス下での光応答特性の光強度依存性を図 8 に示す。両受光素子の、出力波形、光応答特性の光強度依存性を比較し、その特徴について述べる。図 7 (a) は In_{0.53}Ga_{0.47}As 光伝導型受光素子の応答波形を示しており、図に示すように、立ち上がり部と立ち下がり部に遅い応答が観測された。同図(b)は Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD の応答波形を示していて、In_{0.53}Ga_{0.47}As 光伝導型受光素子にみられたような遅い応答はなく、 $t_r = t_f = 650$ ps と高速応答を示した。またこのときの光電流は 600 μ A であった。さらに、2つの応答波形の違いを詳しく検討するために、それぞれの光応答の光照射後定常状態に達するまでの時定数、光を切った後に定常状態に達するまでの時定数を調べた結果、Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD は単一の時定数で表わされるのに対して、In_{0.47}Ga_{0.53}As 光伝導型受光素子の応答には、時定数分散がみられた。図 8 には Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD と In_{0.53}Ga_{0.47}As 光伝導型受光素子の応答速度の違いが明らかとなるように両素子の光応答特性の結果を書き入れてある。図からもわかるように In_{0.53}Ga_{0.47}As 光伝導型受光素子は応答時間、利得が光強度に対して強く依存するのに対し、Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD の場合には応答速度、利得ともに光強度に依存していないことがわかる。

(a) In_{0.53}Ga_{0.47}As 光伝導型受光素子の光応答波形

$P_{OPT} = 1.9 \times 10^{19} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$
 $V = 3 \text{ V}$
 $20 \text{ mV} / \text{div}$
 $20 \text{ nsec} / \text{div}$
 $t_r = 10 \text{ ns}$
 $t_f = 20 \text{ ns}$
 $I_{PH} = 2 \times 10^{-3} \text{ A}$

(b) Al-Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM PD の光応答波形

$P_{OPT} = 1.9 \times 10^{19} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$
 $V = 3 \text{ V}$
 $5 \text{ mV} / \text{div}$
 $5 \text{ nsec} / \text{div}$
 $t_r = 650 \text{ ps}$
 $t_f = 650 \text{ ps}$
 $I_{PH} = 6 \times 10^{-4} \text{ A}$

図 7 光応答波形

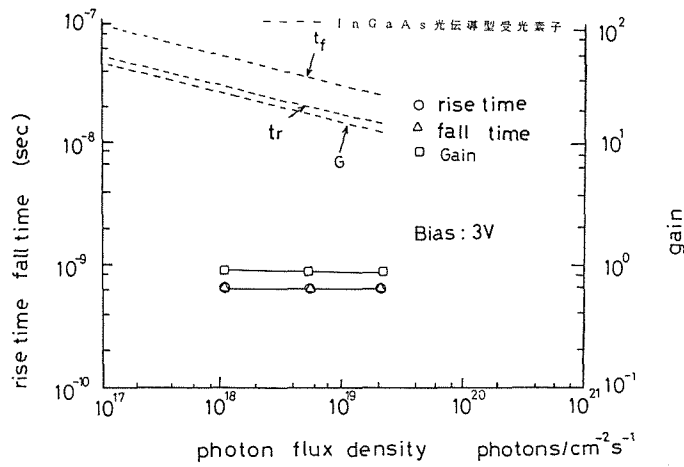


図8 光応答光強度依存性

(3) 光応答特性のバイアス電圧依存性

図9に $\text{Al-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM PD の光強度一定のもとでの応答速度，利得のバイアス電圧依存性を示す。応答速度，利得はバイアス電圧増加とともに，それぞれ減少，増加傾向を示す。図10に $\text{Al-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM PD の C-V 曲線を示してある。容量はバイアス電圧を増加させるにつれて減少するが，これはショットキー接触により形成された半導体中の空乏層幅が電圧増加とともに増加するからである。図中には，時定数から求められる容量値を示してある。この時定数 ($\text{CR}=\tau$; $\text{R}=50\Omega$) から求めた容量と C-V 測定から得られた値が一致していることより，これらの受光素子の応答速度を制限しているものは素子容量であると結論づけられる。

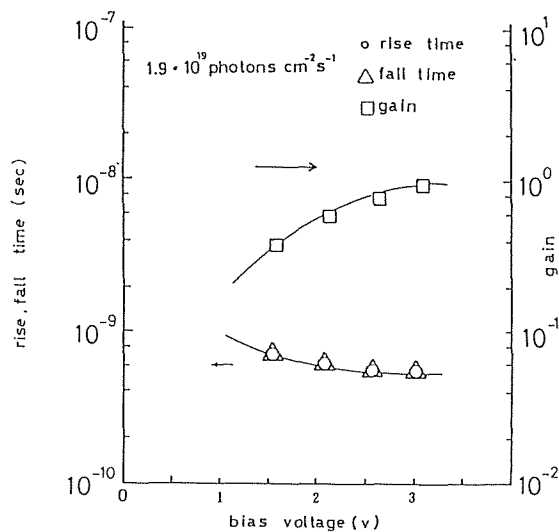


図9 光応答バイアス電圧依存性

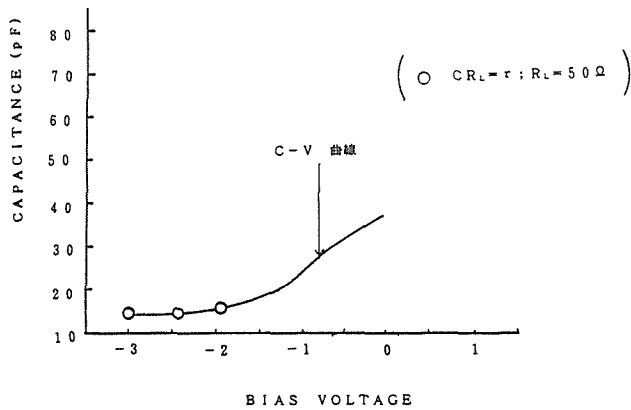


図10 容量特性

4. 光 応 答 機 構

ここでは、光伝導形受光素子の光応答機構について簡単に触れ、その後、ショットキー型 MSM PD としたことにより、高速応答を示すようになった理由を述べ、最後に、MSM PD の光電流の増幅機構の有無について議論する。

図11に、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 光伝導型受光素子に界面準位を考慮したエネルギーバンド図を示す。通常 n 形 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 界面においては、界面準位が負に帯電し、図11のようなバンドの曲がりを生じている。この部分には、空間電荷層が形成され高電界となっている。光照射により半導体中で電子-正孔対が発生するが、空間電荷層によるバンドの曲がりのため分離される。このため、正孔は界面に蓄積され、キャリアの発生が表面フェルミレベルにおける再結合とつりあうようにバンドの曲がりが増える。このときビルトインポテンシャルが減少して、空間電荷層の幅がせばめられ、この結果、半導体中の電流通路が拡大し、光電流が流れる。再結合の過程が表面を介するため、正孔の寿命は大きくなり、利得の増大、応答速度の増加につながる。

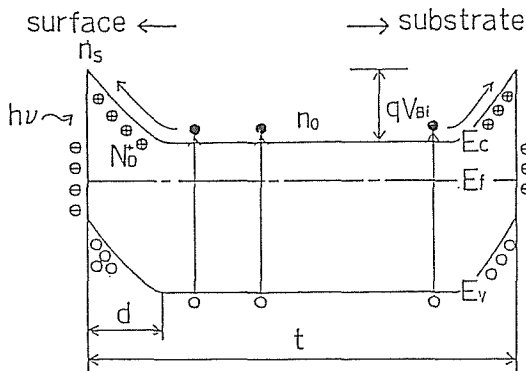


図11 光伝導型受光素子のバンド図

ショットキー電極を用いた $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM 構造では、図12に示すように $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 中に空乏層が形成されている。

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ にバンドギャップ E_g 以上に相当する波長を持つ光が照射されると、半導体中に電子-正孔対が形成される。ここで、(1)空乏層内で発生したフォトキャリアは、空乏層内の電界で分離、ドリフトし光電流として観測される。空乏層内で生成されたフォトキャリアは空乏層内の高電界のため界面、表面に達する前にスweepアウトされる。また、(2)中性領域で発生したフォトキャリアも光電流に寄与する。すなわち、空乏層端から拡散長以内の領域で発生した少数キャリアのうち、空乏層端にたどりついた少数キャリアのみが光電流の発生に寄与する。中性領域で発生したフォトキャリアのうち、いくつかは、界面、表面にトラップされるかもしれない。しかし、光吸収層に空乏層が存在するために、バイアス電圧が、中性領域よりも空乏層領域にそのほとんどが、かかるために表面や界面にトラップされたフォトキャリアは光電流として外部回路にとりだされない。そのため遅い成分が観測されない。このような理由により、ショットキー電極を用いた $\text{Al}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM 構造ではその応答特性は表面準位や格子不整合によって形成された深い準位の影響を受けず、光伝導型受光素子で観測された遅い応答成分が界面、表面の影響が低減されたためなくなり高速応答が実現できたものと考えられる。

次に、理論的に計算した光電流と実際に観測された光電流とを比較し上述の機構の妥当性について検討し、あわせて光電流の増幅機構の有無を示す。

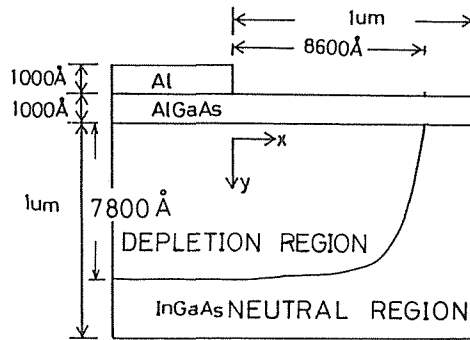


図12 チャネル内での空乏層の広がり方

外部回路に取り出される光電流は、(4-1)式のように書くことができる。

$$I_{\text{TOT}} = I_{\text{DRIFT}} + I_{\text{DIFF}} \quad (4-1)$$

I_{DRIFT} は空乏層領域で発生したフォトキャリアに起因するドリフト電流であり、 I_{DIFF} は中性領域で発生した少数キャリアに起因する拡散電流を表わす。フォトン1個につき電子-正孔対が1対生成されると考えると、光強度と電子-正孔対密度の関係は(4-2)式で与えられる。

$$G(y) = \Phi_0 \alpha e^{-\alpha y} \quad (4-2)$$

ここで、 $G(y)$ は生成率を表わしている。また Φ_0 は全入射光量で $\Phi_0 = P_{\text{OPT}}(1-R)$ である。ここで R は反射係数、 α は吸収係数、 P_{OPT} は光子束密度である。このとき I_{DRIFT} は(4-3)式のように表わされる。

$$I_{\text{DRIFT}} = -qz \int G(y) dy dx = -q\Phi_0 z \int (1 - e^{-\alpha W(x)}) dx \quad (4-3)$$

ただしここで $W(x)$ は空乏層幅, q は電気素量で, z は素子の幅である。

一方, 拡散電流は (4-4) 式で近似的に与えられる。

$$I_{\text{DIFF}} = DZq \int \frac{dp}{dy} dx + DW \int \frac{dp}{dx} dy \quad (4-4)$$

ここで D は正孔の拡散係数, L_p は拡散距離であり, $L_p = D\tau$ の関係がある。光照射下の定常状態における拡散電流はバルク中での正孔の増加分 Δp を知ることで計算することができる。バルク中で光照射によって発生した少数キャリアである正孔は多数キャリアである電子と再結合して消滅する。その消滅の割合を $\Delta p/\tau_p$ とすると正孔の発生, 再結合の時間変化は, (4-5) で与えられる。

$$\frac{dp}{dt} = G - \frac{p_{no} - p_n}{\tau_p} \quad (4-5)$$

これより定常状態でのバルク中の Δp は次式で与えられる。

$$\Delta p = G\tau_p \quad (4-6)$$

以上の式より $P_{\text{opt}} = 1.9 \times 10^{19} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, バイアス電圧 3 V のときの光電流を求めると, $5.4 \times 10^{-4} \text{A}$, $2.5 \times 10^{-4} \text{A}$ となるので $I_{\text{TOT}} = 7.9 \times 10^{-4} \text{A}$ となる。但し $\alpha = 2 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$, $R = 0.3$, $\tau^n = 500 \text{ps}$, $D^n = 5.2 \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ とし, W には 2 次元のポアソン方程式を解くことより求められた値を使用した。

光応答特性測定より得られた光電流値は第 3 章でみたように $I_{\text{PH}} = 6 \times 10^{-4} \text{A}$ である。計算より求められた光電流値は $I_{\text{TOT}} = 7.9 \times 10^{-4} \text{A}$ なので, ほぼ一致していると考えてよい。このことから測定された光電流が空乏層内で生成されたフォトキャリアに起因する光電流 I_{DRIFT} と中性領域で生成されたフォトキャリアが拡散によって寄与する電流成分 I_{DIFF} の 2 つの光電流成分で決定されるものと結論づけられる。この結論は同時に, 光電流を増幅するような機構が存在しないことも示している。

5. 結 言

本研究では, 界面準位の影響を低減することにより, 高速な受光素子を実現することを目的としてショットキー型の MSM 構造を提案, 試作した。ショットキー型の MSM を作製するとき問題となった低ショットキー障壁は $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上に $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ を成長させることによって克服することができた。Al-Al_{0.4}Ga_{0.6}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As 構造では, ショットキー障壁の高さは, 0.6 eV となった。MSM 構造とすることによって, 光電流が表面の影響に左右されなくなったために, 光伝導型受光子で問題になっていた遅い応答成分を除去することができた。同時にセルフアラインプロセスによって素子の微細化を実現したため光強度が $1.9 \times 10 \text{photons/cm}^2 \cdot \text{s}$, $V = 3 \text{V}$ で $t_R = t_F = 650 \text{ps}$ と高速応答を示すデバイスが完成された。この応答は素子容量で主として決定されている。光電流に関する議論より, 光電流は主として空乏層内で生成したフォトキャリアに起因するドリフト電流と中性領域で発生したフォトキャリアによる拡散電流で決定されていることが示された。光電流利得は 1 以上にならず, 光電流を増幅するメカニズムは存在しないといえる。

6. 謝 辞

本研究にあたり、試料を MOCVD 法により作製していただいた、大内 敦氏、ならびに大塚俊介氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) N. Matsuo, H. Ohno, and H. Hasegawa: Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) L648.
- 2) 長沢, 藤島, 大野, 長谷川: 北海道大学工学部研究報告第132号 (昭和61年).
- 3) W. Roth, H. Schumacher, J. Kluge, H. J. Green and H. Beneking; IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED=32, No. 6, pp. 1034-1036, 1985.
- 4) C. J. Wei, H. J. Klein and H. Beneking; Electronics Letters, vol. 17, pp. 688-690, 1981.
- 5) Kajiyama et al. Appl. Phys. Lett., vol. 23, p. 458, 1973.
- 6) H. Tamura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 25, L254, 1986.
- 7) T. Pearsall. IEEE. Trans. J. Quantum. Electronics, vol, QE-16, no. 7, 1980.