



Title	GaAsを活性層とする光伝導形受光素子
Author(s)	長沢, 進; Nagasawa, Susumu; 藤島, 直人 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 132, 101-111
Issue Date	1986-07-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41999
Type	departmental bulletin paper
File Information	132_101-112.pdf



GaAs を活性層とする光伝導形受光素子

長沢 進** 藤島 直人*** 大野英男* 長谷川英機*

(昭和61年3月31日受理)

Photoconductive Detectors with GaAs Active Layer

Susumu NAGASAWA, Naoto FUJISHIMA, Hideo OHNO and Hideki HASEGAWA

(Received March 31, 1986)

Abstract

GaAs photoconductive detectors are promising elements in optoelectronic integrated circuits (OEIC's) because of their low driving voltage and simple planer structure. A slow response time and a long tail, however, were observed under low photon flux density excitation. Thus two new structure photoconductive detectors with GaAs active layer are proposed and investigated for the improvement of response time.

One is the AlGaAs/GaAs double heterostructure photoconductive detector and the other is the photoconductive detector with metal film. Both structures are conceived to eliminate the build-up of holes at the surface due to Fermi level pinning at the surface. The response time is improved by a factor of 10 to 10^3 . This result shows that the detectors with a surface hole sink layer is promising for high-speed detectors.

1. 緒 言

近年、OEIC(光・電子集積回路)の研究開発が盛んに行なわれている。OEICは、同一の基板上に受光・発光素子など半導体光素子と増幅器、論理回路など電子回路を集積したもので、その集積化により、動作性能の向上だけでなく、新機能を得ることも可能である。前者は、寄生リアクタンスの減少に伴う高速化、高信頼性があげられ、後者の例として双安定スイッチング素子や光のリピーターがあげられる。また、集積度を増し、生産性を向上させることにより、より小型化、低価格化が実現できる潜在的利点を有する。

半導体レーザーを中心とした集積化が、1978年にYarivらのグループにより報告¹⁾されてから今日まで様々の集積化の例が報告されている。従来のOEICの報告の多くでは、受光素子として、pinホトダイオード、APDが採用されている。しかしこれらpn接合を有する受光素子と、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。最近報告されている、MSMホトダイオードは、FETと同一のエピ層構造で製作し、集積化できる点で注目される。同素子の報告^{2,3)}によると、動作層に高抵抗のエピ層を用いている。一方、キャリア密度の選択の幅が広く集積化の自由度が大きい点で光伝導形受光素子は、さらに集積化に適した構造

* 電気工学科 電気物性工学講座

** 電気工学科 電気物性工学講座, 現在日本ケミコン(株)

*** 電気工学科 電気物性工学講座, 現在富士電機(株)

である。光伝導形受光素子と増幅器の集積化は、すでに報告されており⁴⁾、GaAsを材料として用い、MESFETを前置増幅器として用いた例では、非常にシンプルなプレーナ構造が実現されている。GaAs光伝導形受光素子は、比較的高照度で高速動作が確認されている⁴⁻⁶⁾。

しかし、GaAs光伝導形受光素子では、低照度で応答速度が遅く、立ち下がり部にtailが存在する問題がある⁷⁾。この問題を解消し、高速な光伝導形受光素子を実現することは、さらに集積度を増す必要のあるOEICへの適合性の高い素子を開発することにつながり重要である。

そこで本報告では、①すでに明らかにされたGaAs光伝導形受光素子の光応答機構⁷⁾に基づき、高速化の指針をたて、②化合物半導体を用いてGaAsを活性層とする光伝導形受光素子を試作、評価し、③素子構造の最適化を行なうことにより、OEIC用高速受光素子の実現を試みた。そのため、④AlGaAs/GaAsダブルヘテロ光伝導形受光素子⑤金属薄膜付光伝導形受光素子を初めて、提案、試作し、高速OEICへの適合性を検討した。

2. 光伝導形受光素子の光応答機構

光伝導形受光素子は、半導体の光伝導効果、すなわち、光を照射するとキャリア密度が増加して導電率が増加する現象を利用した受光素子である。基本的には、単なる抵抗素子であるために構造が極めて単純で、集積化にとって重要なプレーナ形の構造とすることが可能である。

単純なバルク中での発生・再結合モデルでは、利得、応答速度の光強度依存性はなく応答速度は、少数キャリアの実効的な寿命で決まる。今、GaAsを材料として用いた場合を考えると、ns程度の応答が期待できる。これに反して、GaAs光伝導形受光素子の実験結果は、低照度で応答速度が極めて遅い、立ち下がり部にtailが存在する問題がある。このモデルと実験値との比較を表1に示す。このように、GaAs光伝導形受光素子の光応答は、バルク中での発生・再結合モデルでは説明できないが、次に述べる、表面空乏層による電子・正孔の分離を考慮したモデルでよく説明できることが報告されている⁷⁾。

図1(a)に、GaAs光伝導形受光素子の界面を考慮したエネルギーバンド図を示す。通常n形GaAs界面においては、界面準位が、負に帯電し、図1(a)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における再結合とつりあうようにバンドの曲がりが増化する。このとき、ビルトインポテンシャル V_{bi} が減少して、空間電荷層の幅がせばめられる。この結果、半導体中における電流の通路が拡大し、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。

表1 GaAs光伝導形受光素子の実験結果とモデルとの比較

	GaAs 光伝導形受光素子	バルク中での発生・再結合モデル
光伝導利得	$10^2 \sim 10^5$ 光強度に依存	≈ 10 光強度によらず一定
立ち上り時間	$10^{-5} \sim 10^{-8}$ sec //	$\approx 10^{-9} \sim 10^{-11}$ sec //
立ち下り時間	$10^{-4} \sim 10^{-7}$ sec //	$\approx 10^{-9} \sim 10^{-11}$ sec //
応答速度のバイアス依存性	無し	有り

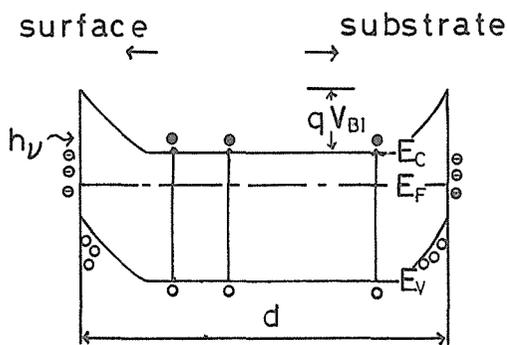


図 1(a) GaAs 光伝導形受光素子のエネルギーバンド図

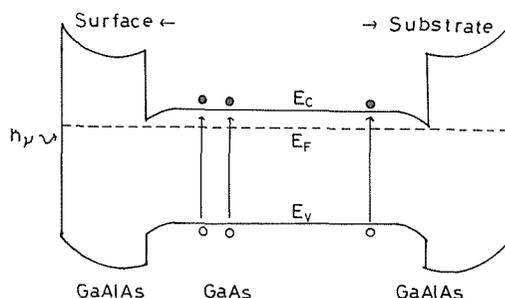


図 1(b) ダブルヘテロ構造エネルギーバンド図

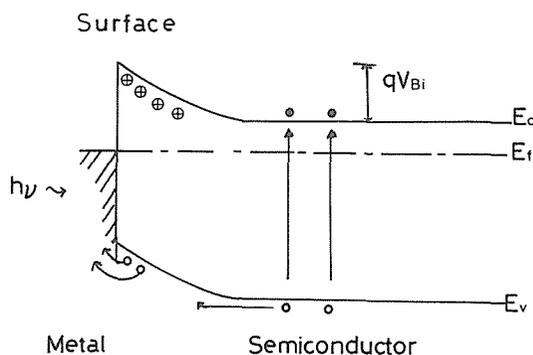


図 1(c) 金属薄膜付受光素子のエネルギーバンド図

3. 高速光伝導形受光素子の設計と製作

2章で述べた GaAs 光伝導形受光素子の高速化を阻害している要因を一言でいえば、それは界面準位の影響によると言える。ここでは、界面準位の影響を低減することにより、光伝導形受光素子の高速化を実現するための指針をたてる。界面準位の影響を低減するためには界面準位の起源を解明し、界面準位密度の低減あるいは、酸化膜等による不活性化を行なう研究が言うまでもなく重要であるが、本研究では、素子設計により界面準位に影響されない構造とすることを考えた。n 形の GaAs 光伝導形受光素子では、特に少数キャリアである正孔が界面準位を介して再結合するために応答速度が遅い。そこで、光照射によって発生した正孔の挙動を制限してやれば、高速化が得られるであろう。このことは以下の方法で実現可能である。

①正孔を、チャネル方向の強電界により、電極にスweepアウトしてしまう。

②正孔を、光吸収層に閉じ込めて、界面準位に影響されない構造とする。

③界面に蓄積される正孔を、界面準位を介する再結合以外の過程で強制的に再結合させる。

動作原理より①の方法では、高電界を印加する必要があるため、本報告では、②③の方法を用いることを考えた。②については、ダブルヘテロ構造を用いた素子が有効であると考えた。図 1(b) にそのエネルギーバンド図を示す。活性層である GaAs 層の両側の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ は、GaAs より禁制帯幅が大きいので、活性層の両側にポテンシャル障壁ができる。この障壁により、正孔を光吸収層に閉じ込めて、電子と再結合させる。このことによりバルク中での発生・再結合に基づく高速応答が達成できると考えられる。③の条件を満たす素子として、金属薄膜付光伝導形受光素

子を考えた。エネルギーバンド図を図1(c)に示す。受光部表面のオーム性電極間に金属薄膜を形成しているため、この薄膜にも、電界が印加され、表面ホールシンク層として動作させる。

実験に用いた試料は、半絶縁性 GaAs 基板の上に MBE(分子線エピタキシャル成長法)、MOVPE(有機金属気相成長法)により、n形 GaAs 層を形成したものをを用いた。素子製作は、次のように行なった。ホトレジストにより、電極パターンを形成したのち、Ge, Au, Ni, をこの順に、500 Å, 1000 Å, 150 Å 真空蒸着し、不用部をリフトオフにより除去する。リフトオフ後、500°C, 1分間の熱処理により、オーム性電極を形成する。最後に、ネガ形のレジストを用い、素子上をおおい、他の部分は、 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 5 : 1 : 1$ のエッチング液で除去する。金属薄膜付受光素子では、この後、素子上にのみ、金属薄膜を、真空蒸着により形成した。

4. 光応答の測定と評価

4-1 光応答の測定

図2に光伝導形受光素子の光応答の測定系を示す。パルスジェネレーターにより、半導体レーザーをパルス発振させ、マルチモードファイバーを通して、試料に光照射を行なった。レーザーダイオード駆動用のパルスジェネレーターは、EHリサーチ Model 135 A を用いた。光源には、レーザーダイオードモジュール (NEC OD-8324-CA) を用い、レーザーダイオード

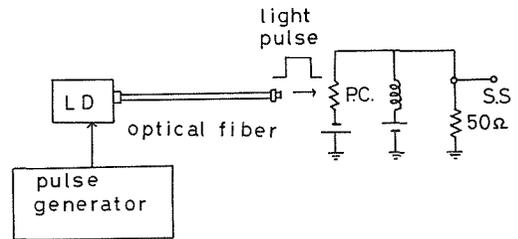


図2 光応答の測定系

の発振出力は、モジュール内部に一体化されている Si pin ホトダイオードの出力によりモニターした。光パルスの導波は、石英系のマルチモードファイバー (コア径 $47 \mu\text{m}$ クラッド径 $125 \mu\text{m}$) を用いた。ファイバー端の光出力は、Si pin ホトダイオード (浜松ホトニクス S 1188) を用いて測定した。光照射によって発生したパルス電流は、 50Ω の負荷抵抗を用いることにより、電圧パルスとして観測した。なお、バイアス回路に高周波の信号が流れるのを防ぐため、5 H のインダクタンス素子を用いた。また、インピーダンス整合のため、信号伝達系の特性インピーダンスを全て 50Ω に統一した。

4-2 光応答の評価

応答時間は、次のように定義した。

○立ち上がり時間 (rise time) t_r , 波高値の 10% より 90% まで増加するのに要する時間

○立ち下がり時間 (fall time) t_f , 波高値の 90% より 10% まで減少するのに要した時間

また、光伝導利得 (Photoconductive Gain) G は、次式を用いて計算した。

$$G = \frac{\Delta I / q}{\eta \cdot f \cdot (1 - R)(1 - e^{-\alpha d}) \cdot L \cdot D} \quad (1)$$

式中、 ΔI は光電流、 q は電気素量、 η は量子効率、 R は反射率、 α は吸収係数、 L は電極間隔、 D は電極幅、 f は光子束密度、 d はエピタキシャル層の厚さを表わす。

5. 光応答の測定結果及び理論解析

5-1 AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ光伝導形受光素子

図3に、電極部分のAlGaAs層を、選択エッチングを用いて除去し、GaAs層に直接オーミック接触を形成した素子の素子構造を示す。この構造で、電極間に印加したバイアスをすべて活性層に印加できると考えられる。図4に、この構造での光応答のバイアス依存性を示す。GaAs光伝導形受光素子では、応答速度のバイアス依存性は、電界強度で、6 kV/cmの電界まで印加した場合、まったく見られなかったが、本素子では、電界強度が3 kV/cm程度から、応答速度の改善が見られ、利得は、飽和及び減少傾向を示した。次に、光応答の温度依存性を、図5に示す。結果は、温度上昇とともに、利得の減少と、応答速度の改善が見られた。

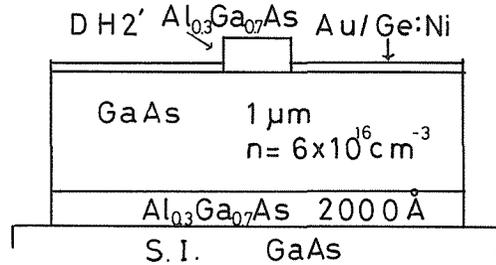


図3 ダブルヘテロ受光素子の素子構造

以上の結果をまとめると、ダブルヘテロ光伝導形受光素子では、GaAs光伝導形受光素子には見られなかった、応答速度のバイアス依存性が見られたものの、依然利得は大きく、光強度依存性があり、特に立ち下がり時間が遅い。このことから、いまだ正孔に対するポテンシャル障壁が十

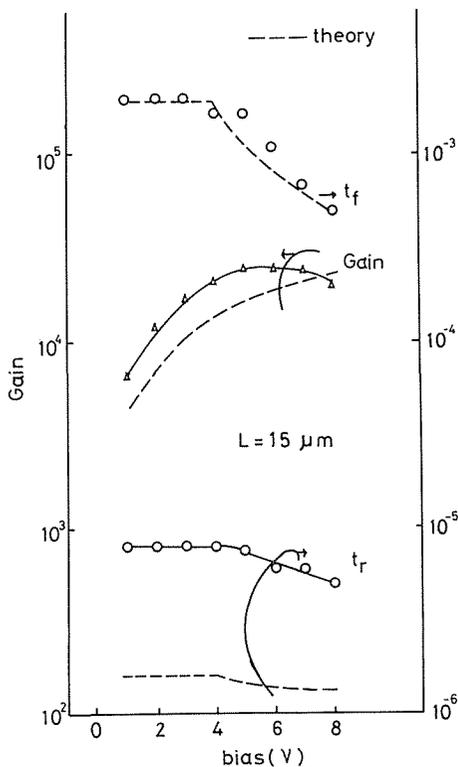
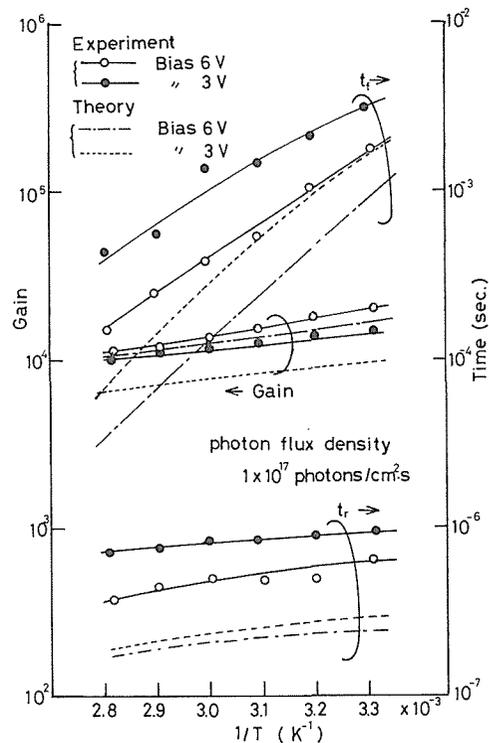
図4 ダブルヘテロ受光素子光応答のバイアス依存性 (光子束密度 1×10^{17} photons/cm²s)

図5 光応答の温度依存性

分でなく、表面への正孔のリークが存在し、表面準位を介した再結合によるモードが支配的な光応答機構が考えられる。また、バイアス電圧の増加に伴い応答速度が改善されるのは、GaAs バルク中で、オーム性電極にスweepアウトされる正孔が増加するために、表面への正孔のリークが減少して、バルク中での発生・再結合に基づくモードに移行するためと考えられる。

この考察をもとに、実験事実を説明するモデルとして、バルク中での再結合と表面での再結合の2つの過程を考慮したモデルを考えた。以下このモデルに基づいて、利得、応答速度の理論式を導く。

活性層中のキャリア密度の時間的変化は、次式で支配される。

$$\frac{d\Delta n_{\square}}{dt} = g_{\square} - S\Delta n_{\square} - \frac{\Delta p_{\square}}{\tau_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中、 Δn_{\square} は、電子の面密度の増分、 g_{\square} は、シートのキャリアの発生率、 Δn_{\square} は、表面の電子密度の増分で、 $S\Delta n_{\square}$ は、単位面積当りの表面におけるキャリアの再結合率を表わす。ここで S は、速度の次元を有する定数である。 Δp_{\square} は、GaAs 層の正孔の面密度の増加分で、 τ_{eff} は、GaAs 層での正孔の実効的な寿命を表わし、 $\Delta p_{\square}/\tau_{\text{eff}}$ は、単位面積当り、GaAs バルク中での再結合率を表わす。

GaAs 層からの正孔の流出は、熱電子放出によるもの考えた。リチャードソン・ダッシュマンの理論によりポテンシャル障壁を乗り越えて、放出される、正孔の電流密度 J_p は、

$$J_p = A^* T^2 e^{-\frac{\phi_p}{kT}} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (3)$$

$$A^* = \frac{4\pi m_h^* q k^3}{h}$$

ここで、 A^* は、リチャードソン定数、 T は絶対温度、 ϕ_p は、AlGaAs 層でのフェルミレベルから価電子帯までのエネルギー差で、正孔に対するポテンシャル障壁を表わす。 V は、光照射により、発生した過剰の正孔に対する、フェルミレベルの変化を表わす。また m_h^* は、正孔の有効質量、 k はボルツマン定数、 h はプランク定数である。暗状態での GaAs 層の正孔の密度 p_0 、光照射時の正孔の密度 p とすれば、

$$p_0 = N_v e^{-\frac{E_F}{kT}} \quad p = N_v e^{-\frac{E_F - qV}{kT}} \quad (4)$$

ただし、 N_v は、価電子帯の等価状態密度、 E_F は GaAs 層の価電子帯より測っている。(4)より

$$\frac{p}{p_0} = e^{-\frac{qV}{kT}}$$

これを(3)式に代入して

$$\frac{J_p}{q} = E_m^* \Delta p \quad \text{ただし} \quad E_m^* = A^* T^2 e^{-\frac{\phi_p}{kT}} \cdot \frac{1}{p_0} \cdot \frac{1}{q} \quad (5)$$

この式より、熱電子放出により AlGaAs 層表面へ流出する正孔電流密度は、光照射によって発生した、正孔密度の増分に比例することがわかる。表面へ流出した、高エネルギーの正孔電流は、表面で再結合する正孔の流れと連続するという条件から、

$$\frac{J_p}{q} = E_m^* \Delta p = S\Delta n_{\square} \quad (6)$$

ここで、(2)式において、過剰の正孔の増加分が、深さ方向に一様だとすれば

$$\Delta p_{\square} = d \cdot \Delta p \quad (7)$$

となる。ただし、 d は、GaAs 層の厚さである。

(2)(6)(7)より

$$\frac{d\Delta n_0}{dt} = g_0 - S \left(1 + \frac{d}{\tau_{eff} \cdot E_m^*} \right) \Delta n_s \quad (8)$$

(8)式より, キャリア閉じ込め効果は, 正孔の放出定数 E_m^* と, GaAs層の正孔の寿命時間で決まることがわかる。暗状態でのビルトインポテンシャル V_{bi} , 光照射時のそれを V_{bi}' とすると, 表面電子密度の増分 Δn_s は, ΔE_c を伝導帯下端のエネルギー不連続として,

$$\Delta n_s = n_1 \left\{ \exp \left(-\frac{qV_{bi}' - \Delta E_c}{kT} \right) - \exp \left(-\frac{qV_{bi} - \Delta E_c}{kT} \right) \right\} \quad (9)$$

ここで n_1 は, AlGaAs層の電子密度である。ここで, $\phi_{bi}' = qV_{bi}' - \Delta E_c$, $\phi_{bi} = qV_{bi} - \Delta E_c$ とおく, 空乏層は, ポアソンの方程式を解くことにより(10)式で表わされる。また, ビルトインポテンシャルの減少に伴う, 空乏層の変化は, (11)式のように表わされる。

$$W = \left(1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) L + \sqrt{\frac{\epsilon_2 \rho_2 - \epsilon_1 \epsilon_2 \rho_1}{\epsilon_1^2 \rho_2} L^2 + \frac{2\epsilon_2 \epsilon_0}{\rho_2} (V_{bi} - \Delta E_c)} \quad (10)$$

$$\Delta W = \sqrt{\frac{2\epsilon_2}{\rho_2}} \left\{ \sqrt{\frac{\epsilon_2 \rho_2 - \epsilon_1 \rho_1}{2\epsilon_1^2} L^2 + qV_{bi} - \Delta E_c} - \sqrt{\frac{\epsilon_2 \rho_2 - \epsilon_1 \rho_1}{2\epsilon_1} L^2 + qV_{bi}' - \Delta E_c} \right\} \quad (11)$$

ここで ρ_1 , ρ_2 はそれぞれ AlGaAs 中, GaAs 中の空間電荷密度, ϵ_1 , ϵ_2 はそれぞれの誘電率である。

また, (8)式で定常状態では, $d\Delta n_0/dt = 0$ であるので

$$g_0 = S \left(1 + \frac{d}{\tau_{eff} \cdot E_m^*} \right) \Delta n_s \quad (12)$$

(9)(12)式により

$$\phi_{bi}' = \phi_{bi} - \frac{kT}{q} \ln \left\{ \frac{g_0}{S n_1 \left(1 + \frac{d}{\tau E_m^*} \right)} \exp \left(\frac{\phi_{bi}'}{kT} \right) + 1 \right\} \quad (13)$$

光照射による, ビルトインポテンシャルの減少に伴い(11)式に従って空乏層が減少する。空乏層が ΔW 減少することにより電流の通路は, ΔW だけ増加し, シートの導電率 σ_0 が増加する。

$$\Delta \sigma_0 = q \cdot \mu_n \cdot n_2 \Delta W \quad (14)$$

ここで μ_n は, GaAs層の電子の移動度であり, n_2 は, GaAs層の電子密度である。したがって光電流 ΔI は,

$$\Delta I = \frac{D}{L} \cdot \Delta \sigma_0 \cdot V = \frac{D}{L} \cdot q \cdot \mu_n \cdot n_2 \cdot \Delta W \cdot V \quad (15)$$

ただし, L は, チャンネル長, D は, チャンネル幅, V は電極間に加えるバイアス電圧である。光伝導利得の定義により

$$G = \frac{\mu_n n_2 \Delta W V}{g_0 L^2} \quad (16)$$

ただし, ΔW は(11)式で与えられる。

次に, ステップ状の光照射を行なった際の光伝導形光検出器の過渡応答に関して, 時間と光電流の関係を求める式を, 上のモデルで導出する, (15)式において, $n_2 \Delta W = \Delta n_0$ の置き換えが可能である。すなわち, (17)式は, 空乏層の減少によりシートのキャリア密度が増加するため, 光電流が生じると解釈される。(2)式と $n_2 \Delta W = \Delta n_0$ の関係, さらに(11)式を適用することにより次式が得られる。

$$g_0 - S \left(1 + \frac{d}{\tau_{eff} E_m^*} \right) \Delta n_s = - \sqrt{\frac{\epsilon_2 n_2}{2 \rho_2}} \left(\frac{\epsilon_2 \rho_2 - \epsilon_1 \rho_1}{2 \epsilon_1^2} L^2 + \phi_{bi}' \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{d\phi_{bi}'(t)}{dt} \quad (17)$$

これは、積分の形で次のように書き直すことができる。

$$\int_0^t dt = - \sqrt{\frac{\epsilon_2 n_2}{2 \rho_2}} \int_{\phi_{bi}}^{\phi_{bi}'} \left[\left\{ g_0 - S \left(1 + \frac{d}{\tau_{eff} E_m^*} \right) \Delta n_s \right\}^{-1} \times \left(\frac{\epsilon_2 \phi_2 - \epsilon_1 \phi_1}{2 \epsilon_1} L^2 + \phi_{bi}' \right)^{-\frac{1}{2}} \right] d\phi_{bi}'(t) \quad (18)$$

上式より、このモデルにおける過渡応答は、次のように計算される。t=0で光照射を初めると電子・正孔対が発生し、発生した正孔のうち、ポテンシャル障壁をこえるのに十分なエネルギーをもったものは、表面に放出される。表面に放出された正孔は、表面再結合によって電子と再結合する。正孔が表面へ放出されることにより、ビルトインポテンシャル $V_{bi}'(t)$ がしだいに減少する、したがって空乏層が(11)式に従って変化し、(15)式に従って ΔI が増加する。表面における、キャリア密度は(9)式により増加し(12)式による定常状態では、キャリアの発生と⑦ GaAs バルク中 ④ AlGaAs 表面での再結合がつりあう。定常状態における、ビルトインポテンシャルは(13)式で与えられる。積分区間は、 ϕ_{bi} から ϕ_{bi}' までである。(18)式の積分を実行することにより、時間 t と、 $\phi_{bi}'(t)$ の関係が求まる。 ϕ_{bi}' が決まれば、(15)式より ΔI が計算されるから、電流の時間的な変化を求めることができる。また、瞬時に光をしゃ断した場合、(18)式において $g_0 = 0$ として ϕ_{bi}' から ϕ_{bi} まで同様の計算を行ない、光電流の立ち下がり計算することができる。

つぎに、光伝導利得については、(16)式を、立ち上がり、立ち下がり時間については、(18)式を用い、これらの理論計算を行ない、光強度、温度、バイアス依存性に関し、実験値との比較検討を行なう。

計算においては、以下のような仮定を行なった。

①表面再結合速度は、電子の熱速度に等しいものと仮定し、 $S = 1.6 \times 10^7$ cm/s とした。

②シートキャリアの発生率は、次のようにおいた

$$g_0 = (1 - R) (1 - \exp(-\alpha t)) F$$

すなわち、エピ層で吸収される光子は、すべて、電子・正孔対の発生に使われるものと仮定した。

③ GaAs 中の電子密度 n_2 、電子移動度 μ_n は、ホール効果測定、C-V 測定の結果と等しいものとした。AlGaAs 層のキャリア密度 n_1 は、 $n_1 = 1 \times 10^{14}$ (1/cm³) を仮定した。

④温度が変化しても、フェルミレベルの位置及び、ポテンシャル分布は、変わらないとした。

⑤ AlGaAs の比誘電率を、 $\epsilon_1 = 13.1$ 、GaAs の比誘電率を、 $\epsilon_2 = 12.2$ とした。

⑥ヘテロ界面における、価電子帯、伝導帯のエネルギー不連続 ΔE_v 、 ΔE_c とすると

$$\Delta E_v = (E_{g1} - E_{g2}) \times 0.4, \quad \Delta E_c = (E_{g1} - E_{g2}) \times 0.6$$

とした。ただし、 E_{g1} 、 E_{g2} は、それぞれ AlGaAs、GaAs の禁制帯幅に相当するエネルギーである。

⑦ビルトインポテンシャル $V_{bi} = 0.76$ (eV)、GaAs 層の正孔のライフタイム $\tau = 1 \times 10^{-8}$ (s) とした。

計算結果を図 4、5 にあわせて示す。光強度依存性、温度依存性については、以上述べたモデル及び仮定で、実験事実と一致を得たが、バイアス依存性については、次のような仮定を設けなければ、よい一致が得られなかった。すなわち、通常、バルク中での実効的な、ライフタイム τ_{eff} は、

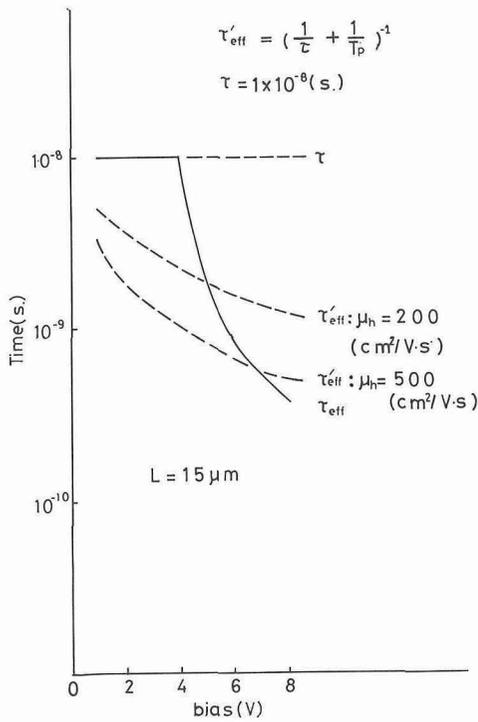


図6 計算で仮定した活性層での正孔の実効的な寿命

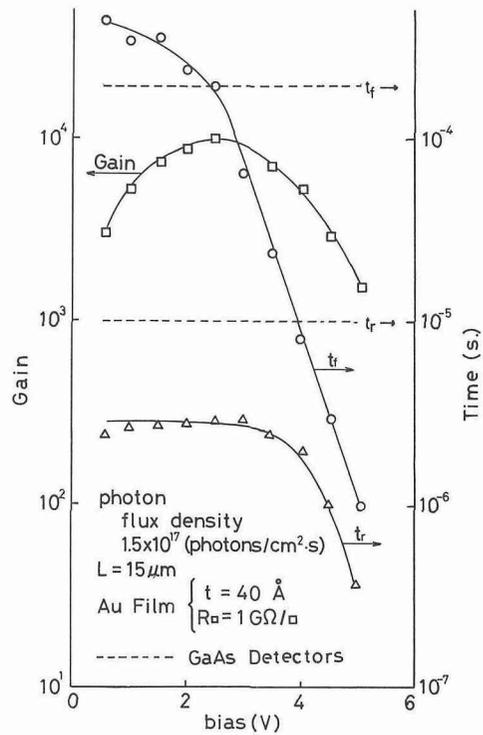


図8 光応答のバイアス依存性とその GaAs 光伝導形受光素子との比較

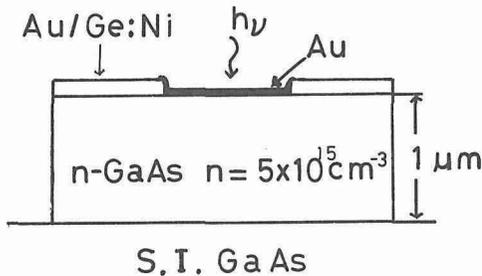
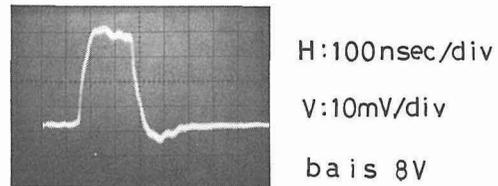


図7 金属薄膜付受光素子の素子構造

図9 応答波形 (光子束密度 8×10^{17} (photons/cm²s), チャネル長 20 μ m)

$1/\tau_{eff} = 1/\tau + 1/T_p$ として表わされるが、よい一致を得るためには、低バイアスでは、 $\tau_{eff} = \tau$ 、高バイアスになるにつれて、 $\tau_{eff} = (1/\tau + 1/T_p)^{-1}$ となることを仮定しなければならない。(仮定した τ_{eff} のバイアス依存性を図6に示す。)この理由として、低バイアスでは、バンドの曲がりのため、GaAs層での過剰な正孔が、界面方向に速度を得て、(8)式で示した、 E_m^* より大きな、放出定数で、表面へ正孔がリークしていると考え、説明できる可能性があるが、なお、詳細な検討が必要である。

5-2 金属薄膜付受光素子

素子構造を図7に、また、光応答のバイアス依存性を図8に示す。GaAs光伝導形受光素子の応答速度も比較のため点線で示したが、十分なバイアス電圧を印加した場合、GaAs光伝導形受光素子の応答速度は、改善できたとと言える。この素子構造で確認できた応答波形を図9に示す。同一

照度での GaAs 受光素子に比べ、立ち上がり時間で 80 倍、立ち下がり時間で 1700 倍ほどの改善が得られた。光強度を変えた場合の光応答のバイアス依存性をみると、光強度が大きい方が、高速化され利得も小さい。

金属薄膜付受光素子では、電極間に十分な電界を印加することにより、応答速度の改善が得られ、この場合、GaAs 光伝導形受光素子の応答速度を改善できた。しかし、依然として、利得、応答速度の光強度依存性が存在することと、まだ十分満足できるほど、高速の受光素子を実現していないことから、過剰の正孔は、完全に金属薄膜中で再結合していないと考えられる。いいかえると正孔は、完全にスweepアウトされていない。スweepアウトが完全でない理由として、以下のようなものが考えられる。①金属薄膜を流れる電子電流が、正孔と再結合するのに十分でない。②金属薄膜の構造欠陥により、受光部表面が、完全にホールシンク層でおおわれていない。③金属—半導体界面のトラップに正孔が捕獲される。②の薄膜の構造欠陥は、薄膜がまだ、十分薄い場合は、島状構造なりと均一かつ連続な薄膜になっていない可能性をさす。

金属薄膜付受光素子の応答速度が、バイアスの増加に伴い改善されることから、正孔の表面での実効的なライフタイム τ_p は、バイアスの増加に伴い、減少していると考えられる。これは、いいかえれば、バイアスの増加に伴いスweepアウトされる正孔が増加していることを意味している。この点については、なお、詳細な検討が必要である。

6. 高速受光素子の素子設計

ダブルヘテロ受光素子については、前述した理論計算を用いて、高速受光素子の実現の条件を考えた。図 10 は、5 章に述べた素子構造のまま、正孔に対するポテンシャル障壁を大きくした場合の利得と応答速度を計算したもので、価電子帯のエネルギー不連続 ΔE_v と、利得及び応答速度の関係を示している。 ΔE_v の増大に伴い、利得の減少、応答速度の改善が見られる。特に立ち下がり時間の改善が著しい。このため、 $\Delta E_v = 0.63$ (eV) とすると、 t_r , $t_f \approx 3$ ns で利得は、 $G \approx 4$ になり、バルク中での発生・再結合に基づく応答速度、利得と同程度になる。この結果より、

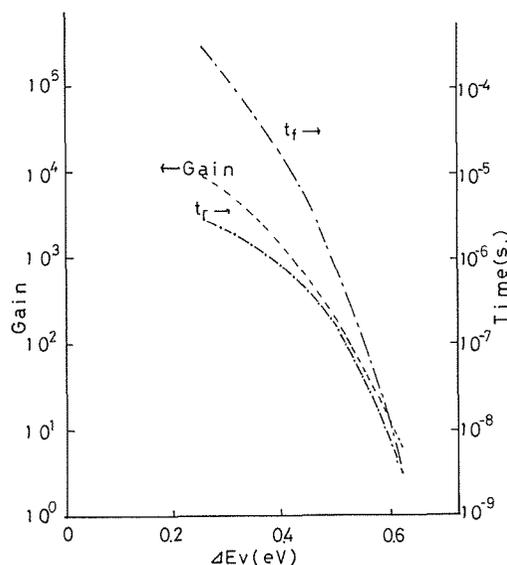


図 10 ポテンシャル障壁高さと利得、応答速度の関係

高速受光素子の実現には、 $\Delta E_p = 0.63$ (eV) 程度の比較的大きな、エネルギー不連続が必要であると考えられる。

金属薄膜付受光素子について、より高速な受光素子の実現には、図 11 のような素子構造が適当であると考えられる。金属薄膜を流れる暗電流を少なくするために、薄膜は、負電極とのみ接触

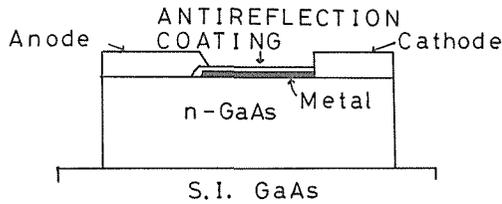


図 11 高速受光素子の素子構造

させ、正電極とは、非接触とする。このとき反射防止膜により、正電極と薄膜の分離を行ない光を有効に吸収させる。金属薄膜と、反射防止膜との適当な組み合わせとして、Au 膜と ZnS がある。膜厚 100 \AA の Au 膜上に、厚さ 500 \AA の ZnS を反射防止膜として形成した場合、He-Ne レーザーの波長の光に対しては、95%の透過率が得られることが知られている⁹⁾。

7. 結 言

本研究では、界面準位の影響を低減することにより、高速な光伝導形受光素子を実現することを目的として新しい構造の光伝導形受光素子④ AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ光伝導形受光素子⑤金属薄膜付光伝導形受光素子を提案、試作した。④については、 3 kV/cm 以上の電界を印加することにより、応答速度の改善が得られた。⑤についても、低バイアスから、いっそう顕著な、応答速度のバイアス依存性が見られ、十分なバイアス電圧を印加した場合は、GaAs 光伝導形受光素子の応答速度を改善できた。この結果より、表面に蓄積する正孔を減少させることが、応答速度の改善に有効であることを確認した。

8. 謝 辞

デバイス作製のため、GaAs エピタキシャル層を、MOCVD 法、MBE 法で作製していただいた、池田英治氏、ならびに赤津祐史氏に心より感謝します。

参 考 文 献

- 1) C. P. Lee, S. Marglit, I. Ury and A. Yariv: Appl. Phys. Lett., 32(1978) 806
- 2) 及川, 伊藤, 岩間, 堀松, 昭和 60 年度電子通信学会総合全国大会 4-59
- 3) T. Sugeta, T. Urisu, S. Skata and Y. Mizushima: Jpn. J. Appl. Phys., 19 Supplement 19-1, 459 (1980)
- 4) N. Matsuo, H. Ohno, and H. Hasegawa: Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) L648
- 5) J. C. Gammel and J. M. Ballantyne: Appl. Phys. Lett., 36 (1980) 149
- 6) H. J. Klein, H. Beneking and D. Bimberg: Thin Solid Films, 90 (1982) 371
- 7) N. Matsuo, H. Ohno, and H. Hasegawa: Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) L299
- 8) H. Okumura, S. Misawa, S. Yoshida and S. Gonda: Appl. Phys. Lett. 46 (1985)15
- 9) M. V. Schneider: Bell Syst. Tech. J., 45 (1966)1611