



分光感度波長帯域の広い GaInAs フォトダイオード

和田 守夫・榊原 勝利・樋口 昌彦・関口 陽一

光計測技術開発(株)中央研究所 〒180 武蔵野市中町 2-11-13

(1992年3月10日受付, 1992年4月28日受理)

Wide-Wavelength GaInAs Photodiodes

Morio WADA, Katsutoshi SAKAKIBARA, Masahiko HIGUCHI and Yo-ichi SEKIGUCHI

Optical Measurement Technology Development Co. Ltd., 2-11-13, Naka-machi, Musashino 180

(Received March 10, 1992; Accepted April 28, 1992)

A new photodiode with high quantum efficiency over a wide wavelength region of 0.60-1.75 μm and a very smooth responsivity has been developed by using a thin InP cap layer and a thick GaInAs light-absorbing layer lattice-mismatched to InP. The responsivity of GaInAs photodiodes is simulated and discussed in detail. A low dark current of 2 nA at -2 V bias for the 110- μm -in-diameter photodiode has been achieved by the use of a strained-superlattice buffer layer combined with thermal cycle annealing. Precise Zn diffusion corresponding to the cap layer thickness less than 100 nm is performed by a newly developed open-tube diffusion technique. A -3 dB cutoff frequency higher than 2 GHz is measured at wavelengths of 0.78 and 1.55 μm .

1. はじめに

波長 0.6~2 μm の受光素子は, 光通信システム, リモートセンシング, ガス分析, 分子分光等に広く応用されている。このように広い波長範囲では, 各々の応用に適した受光素子が選択されてきた。約 0.95 μm 以下の波長では, 外部量子効率が 60% 以上で暗電流の低い Si フォトダイオード (PD) が使用され, 1~1.6 μm の波長範囲では, 通常, Ge または GaInAs PD が使用される。従来の GaInAs PD は Ge PD と比較して, 暗電流が約 2 桁小さく, 量子効率も高く優れているが, Ge PD の方が分光感度は長波長側まで延びている¹⁾。この点の改善を目標として本研究を行った。

従来の GaInAs PD は, InP に格子整合するように成長した GaInAs 吸収層上に InP キャップ層を形成した構造である。この InP キャップ層は InP の吸収端波長約 0.94 μm より短い光を強く吸収するので, このキャップ層が厚い程短波長側での GaInAs PD の内部量子効率は低下する²⁻⁴⁾。また, InP キャップ層上に形成される反射防止膜とキャップ層との間で入射光の干渉が生じ

るため, 波長 1~1.3 μm 間で波長変化に対して平坦な外部量子効率は得られない^{5,6)}。InP キャップ層がなく, GaInAs 層が受光部表面に露出している構造では, GaInAs 層内の p^+-n 接合を浅くした場合は大きいキャリア表面再結合速度のために内部量子効率が 10% 以上低下し, p^+-n 接合を深くした場合は $p^+-\text{GaInAs}$ 層の光吸収で分光感度波長帯域すべてにわたって内部量子効率が低下する³⁾。

したがって, InP キャップ層を 0.1 μm 以下に薄く形成し, 同時に p^+-n 接合を InP/GaInAs 界面近傍の GaInAs 吸収層内に形成する必要がある。しかし, 従来の Zn 拡散法 (閉管拡散法) では, 拡散速度が速くて, 拡散深さの再現性, 制御性を考えると使用し難い。厚さ 0.1 μm の InP キャップ層を用いた場合, 閉管法による Zn 拡散での拡散時間は 10 秒以下である⁷⁾。本研究では, InP キャップ層の厚さを 0.06~0.1 μm とし, 新たに開発した拡散深さの制御性に優れた Zn 拡散法を使用した。

GaInAs PD の長波長側の分光感度は, GaInAs のバンドギャップエネルギー E_g に対応した吸収端波長 λ_g

(300 K)~1.65 μm で制限される。 E_g の温度依存性が、波長 1.5 μm 付近から長波長側の分光感度の大きな温度依存性の原因となっている^{1,5,6)}。したがって、光吸収層の吸収端波長をさらに長波長側に移動できれば、波長 1.55 μm 付近で E_g の温度依存性の影響をなくすることができる。この条件の GaInAs と InP は格子整合していない。格子不整合のあるヘテロ構造の転位発生機構は、Matthews⁸⁾ と People ら⁹⁾によってモデルが提案され、Temkin ら¹⁰⁾は $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{InP}$ 歪量子井戸構造を用いて臨界膜厚を測定した。

GaInAs PD において、 $\lambda_g \sim 1.8 \mu\text{m}$ として波長 1.5 μm で 70% 以上の量子効率を得ようとする場合、2 μm 以上の厚さの吸収層が必要である。この時の格子不整合 GaInAs 吸収層の厚さは臨界膜厚を遙かに越える。一方、InP キャップ層は、70 nm 程度と薄いので臨界膜厚以下となる。本研究では、格子不整合 GaInAs 吸収層の成長のために、まず、転位を導入して格子不整合による応力を低減し、その後、転位密度を低減する方法を行った⁶⁾。

われわれは、上記の Zn 拡散法と格子不整合 GaInAs 成長法により、波長 0.6~1.75 μm にわたって平坦で高い分光感度を有し、暗電流の小さい PD を実現した。本論文では、特に、分光感度特性の計算結果と測定結果について詳細に報告する。

2. 素子の構造と製作

今回試作した格子不整合 GaInAs PD は、ポリイミド埋込メサ型 PD で、その断面構造を Fig. 1 に示す。

InP と GaInAs は減圧 MOVPE (metal-organic

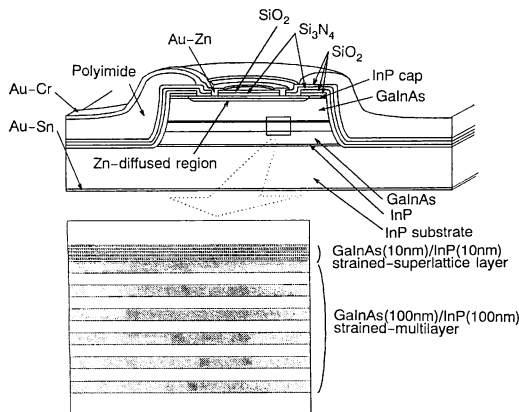


Fig. 1 Schematic diagram shows a lattice-mismatched GaInAs photodiode with a thin InP cap layer, and the buffer layer structure consisting of a strained multilayer and strained-superlattice layer of GaInAs/InP.

vapor-phase epitaxy) 法で成長した。

(100) 2° オフ InP 基板 ($n = 3 \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上に 70 nm の厚さの n 型 InP 層 ($n > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; S ドープ) を 400°C で成長し、続いて 1.2 μm の厚さの n 型 GaInAs 層 (格子不整合率 $\Delta a/a \sim 0.5\%$, $n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; S ドープ) を 600°C で成長した。この後、 PH_3 雰囲気中で熱サイクルアニール (200~700°C, 3 回往復) を行い、引き続き、n 型 GaInAs/InP 歪格子層 (100 nm/100 nm, 5 対, $\Delta a/a \sim 0.9\%$; S ドープ) と n 型 GaInAs/InP 歪超格子層 (10 nm/10 nm, 5 対, $\Delta a/a \sim 0.9\%$; S ドープ) を 600°C で成長した。次に、3 μm の厚さの n 型 GaInAs 吸収層 ($\Delta a/a \sim 0.5\%$, $n < 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) と厚さ 70 nm の n 型 InP キャップ層 ($n < 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) を 700°C で成長した。

この成長シーケンスで得られたエピタキシャルウェハには反りはなかった。格子不整合によって生じる残留歪の大きさを、結晶 X 線回折の X 線ロックンブグカーブ (XRC) の半値全幅 (FWHM) で評価した。(100) InP 基板を 0° から 2° オフ基板にし、さらに、熱サイクルアニールを行うことにより、GaInAs 吸収層の FWHM は大幅に減少して 140 秒が得られた。歪超格子の挿入により、この FWHM に変化は見られなかったが、InP キャップ層とキャップ層/GaInAs 吸収層界面付近のエッチピット密度は、 $3 \sim 4 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ から $0.6 \sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ に減少した。また、低温成長 InP 層の成長温度が 450°C 以上の時には、この InP 層のエッチピット密度は InP 基板と同じであるが、それより低温の成長温度では、 $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ と増加した。この低温成長 InP 層とオフ基板、熱サイクルアニールの組合せにより、小さい FWHM が得られた⁶⁾。

格子整合 GaInAs 成長と異なり、格子不整合 GaInAs では 2 次元成長が難しく、この GaInAs 層上には平坦な界面が得られないため、GaInAs/InP の歪格子層を設けた。Fig. 2 は、歪格子層と歪超格子層部分の走査型電子顕微鏡写真で、歪格子層内で成長が進むにつれて界面が平坦化されていく様子が観察される。

選択 Zn 拡散は、ジメチル Zn (DMZ: dimethylzinc) を Zn 源として用いる方法で行った^{11,12)}。Zn 拡散 InP キャップ層のキャリア濃度は $1 \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で、500°C, 2 分間の拡散で得られた拡散深さは、InP キャップ層/GaInAs 吸収層界面から GaInAs 層内 0.1 μm 以下であった。この方法による Zn 拡散係数は、 $0.02 \sim 0.7 \times 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ の範囲で制御でき、閉管拡散法より約 1 桁小さい。Fig. 3 には、n 型 InP 基板 (キャリア濃度 $< 1 \times$

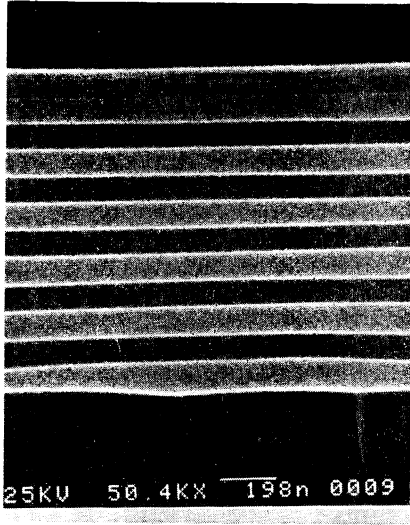


Fig. 2 Scanning electron micrograph of the buffer layer structure in Fig. 1.

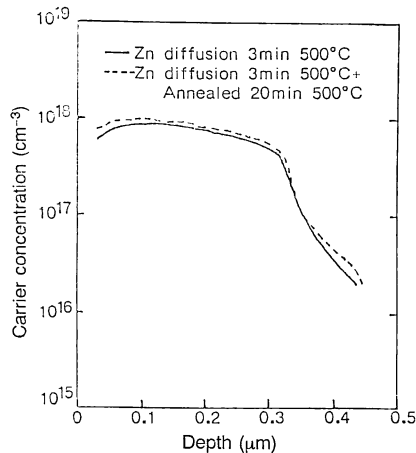


Fig. 3 Room-temperature carrier concentration profiles of the samples after the diffusions at 500°C for 3 min at a PH₃ flow rate of 200 standard cubic centimeter per minute (SCCM), with and without subsequent annealing. The subsequent annealing was performed at 500°C for 20 min at a PH₃ flow rate of 200 SCCM. The DMZ flow rate during the 3-min diffusion was 200 SCCM for these two samples.

10^{16} cm^{-3}) を用いて、500°C、3分間 DMZ を流した場合とその後に DMZ を止めて 500°C、20分間アニールを行った場合の Zn 拡散後のキャリア濃度プロファイルを示す。このように、Zn 源の DMZ の流れを止めた後に拡散深さが変化しないので、拡散深さは、DMZ を流す時間で制御できる。

InP 表面の熱分解は、同時に流す PH₃ の熱分解で供

給される鱗圧で防止されている。

反射防止膜は、反射率を比較的広い波長範囲で小さくできる 2 層膜 (SiO₂/Si₃N₄) を用いて形成した。

3. 分光感度特性の計算

波長 λ (μm) の単色光に対する絶対量子効率 $\eta(\lambda)$ は、次式で定義される。

$$\eta(\lambda) = \frac{J}{eI(\lambda)} = \frac{J}{e[\Phi(\lambda)/h\nu]} \\ = 1.24 \times 10^{-6} \cdot \frac{J}{\Phi(\lambda)\lambda} \quad (1)$$

ここに、 J (A) は光電流、 $I(\lambda)$ (個/s \cdot cm²) は単位時間当りの入射する光子数、 $\Phi(\lambda)$ (W) は単位時間当りの入射する光エネルギーである。

したがって、絶対理論分光感度 $s(\lambda)$ は、 $\eta(\lambda)=1$ として、

$$s(\lambda) = \frac{J}{\Phi(\lambda)} = \frac{\lambda}{1.24 \times 10^{-6}} \quad (\text{A/W}) \quad (2)$$

となる。

式(1)と(2)から、 $\Phi(\lambda)$ が測定されていれば、分光感度 $s_r(\lambda)$ が測定でき、量子効率 η_{real} が次式で求められる。

$$s_r(\lambda) = \eta_{\text{real}}(\lambda) \cdot s(\lambda) \quad (\text{A/W}) \quad (3)$$

分光感度の測定では、光源 (スペクトル線幅 $\Delta\lambda=10$ nm) の光ファイバー出射端の光パワーを、Ge p-i-n PD (波長範囲: 0.85~1.80 μm) と Si p-i-n PD (同: 0.45~1.15 μm) を用いて測定した。これらの Ge および Si p-i-n PD は、光パワーを等温制御法で直流電流に置き換えて測定するカロリメトリック方式のカロリメータを 1 次標準として校正した¹⁾。分光感度測定値は 10 回測定の平均値で、その標準偏差は、1% 以内であった。光ファイバーは 1.3 μm 単一モードファイバーで、波長 1.5 μm のときの受光面での照射光スポット寸法は ϕ 30 μm 、波長 0.78 μm のときは ϕ 20 μm であった。また、PD の温度は 0.1°C 以内で恒温制御した。

GaInAs PD の量子効率と分光感度を Fig. 4 に示すモデルで計算した。計算に用いたパラメータの一部は格子整合 GaInAs PD の分光感度波長特性結果と計算結果が一致するように決定した。このモデルによる計算には、次の近似を仮定した。

- 1) 光で発生する少数キャリアは、各層内で一定の寿命、移動度、拡散係数を持つとして近似する。
- 2) InP 表面と InP/GaInAs 界面での再結合速度を考慮する。

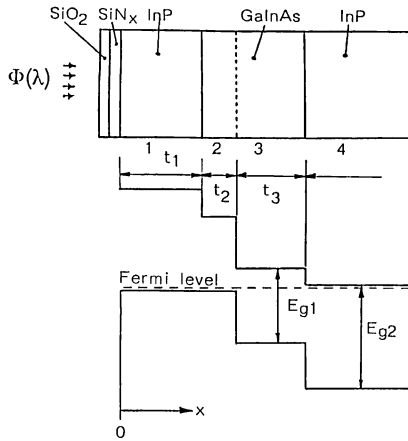


Fig. 4 Model of a p-i-n photodiode with an antireflection coating for external quantum efficiency calculation.

- 3) トラップ等の深い準位の影響は無視する。
- 4) PD はショートサーキットモードで動作する。
- 5) 各層で Fermi 準位は一致している。
- 6) GaInAs 吸収層が十分厚く、入射光がこの層で吸収されて、透過光を無視できる程減衰する。

また、仮定6)から、この分光感度の計算においては、歪格子層と歪超格子層の存在を考慮していない。

各層内で発生する少数キャリアは以下の輸送方程式を満たすものとする。

I 層内では、

$$\frac{\partial \Delta n_1}{\partial t} = -\frac{\Delta n_1}{\tau_1} + I \cdot \exp(-K_1 x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 n_1 E_1 + \frac{\partial n_1}{\partial x} \right) \quad (4)$$

II 層内では、

$$\frac{\partial \Delta n_2}{\partial t} = -\frac{\Delta n_2}{\tau_2} + I \cdot \exp[-K_1 t_1 - K_2(x-t_1)] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 n_2 E_2 + \frac{\partial n_2}{\partial x} \right) \quad (5)$$

III 層内では、

$$\frac{\partial \Delta p_3}{\partial t} = -\frac{\Delta p_3}{\tau_3} + I \cdot \exp[-K_1 t_1 - K_2(x-t_1-t_2)] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 p_3 E_3 + \frac{\partial p_3}{\partial x} \right) \quad (6)$$

IV 層内では、

$$\frac{\partial \Delta p_4}{\partial t} = -\frac{\Delta p_4}{\tau_4} + I \cdot \exp[-K_1(x-t_2-t_3) - K_2(t_2+t_3)] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_4 p_4 E_4 + \frac{\partial p_4}{\partial x} \right) \quad (7)$$

ここで、 Δn , Δp は光生成された少数キャリア密度、

n , p はキャリア密度、 τ は少数キャリア寿命、 μ はキャリア移動度、 K_1 は InP の吸収係数、 K_2 は GaInAs の吸収係数である。

境界条件は、電流連続の条件から以下のようにとった。

I 層内では、

$$x=0, D_1 \frac{\partial \Delta n_1}{\partial x} = S_1 \Delta n_1, \quad x=t_1, \Delta n_1=0$$

II 層内では、

$$x=t_1, D_1 \frac{\partial \Delta n_1}{\partial x} \Big|_{x=t_1} = D_2 \frac{\partial \Delta n_2}{\partial x} - S_2 \Delta n_2$$

$$x=t_1+t_2, \Delta n_2=0$$

III 層内では、

$$x=t_1+t_2, \Delta p_3=0$$

$$x=t_1+t_2+t_3, D_3 \frac{\partial \Delta p_3}{\partial x} = D_4 \frac{\partial \Delta p_4}{\partial x} \Big|_{x=t_1+t_2+t_3} - S_3 \Delta p_3$$

IV 層内では、

$$x=t_1+t_2+t_3, \Delta p_4=0$$

$$x=\infty, \Delta p_4=0$$

ここで、 S_1 は InP 表面のキャリア再結合速度、 S_2 は I-II 層界面キャリア再結合速度、 S_3 は II-III 層界面キャリア再結合速度である。光電流は、

$$J = e D_3 \frac{\partial \Delta p_3}{\partial x} \Big|_{x=t_1+t_2} - e D_2 \frac{\partial \Delta n_2}{\partial x} \Big|_{x=t_1+t_2}$$

で与えられる。

また、InP と GaInAs の吸収係数 K の温度依存性は、各々のバンドギャップエネルギー E_g の温度依存性を通じて計算する。

$$K(T) = e_2 [2(m_h + m_e)/(m_h + m_e)^{1/2}] / (n_{\text{index}} \times ch^2 m_e) \times [1.24/\lambda - E_g(T)]^{1/2} \quad (8)$$

$$E_g(T) = E_0 - (\alpha T^2)/(T + \beta) \quad (\text{eV}) \quad (9)$$

ここで、 e は電子電荷、 c は光の速度、また、 m_h は正孔の有効換算質量で $m_h^{-1} = m_{\text{hh}}^{-1} + m_{\text{hl}}^{-1}$ である¹³⁾。

外部量子効率を計算するために、反射防止膜と InP キャップ層での入射光の多重反射による損失を考慮し、入射光子数を $A \cdot I$ として計算した。ここに、 A は、II 層~IV 層に対して、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{InP}$ キャップ層の 3 層構造を考えたときの透過率とし、I 層に対しては、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ の 2 層反射防止膜のみの場合で A を近似した。 A の計算には、屈折率の波長分散を以下のように考慮した。

InP の n_{index} の測定値は、InP 吸収端波長 $\sim 0.94 \mu\text{m}$ より短い波長では理論計算値¹⁴⁻¹⁶⁾からのずれがあるため、ここでは、実験値から多項式近似で InP の n_{index}

Table 1 List of the parameters for calculations and the fabricated PD structure.

	Calculation	PD structure
InP cap layer thickness, t_1 (μm)	0.7	(a) 0.7 (b) 0.07
GaInAs absorbing layer thickness, t_2+t_3 (μm)	1.3	1.3 1.3
Depth of p ⁺ -n junction, t_2 (μm)	0.1	<0.1 <0.1
InP surface and heterointerface carrier recombination rates, S_1 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	10^6	
$S_2=S_3$	10^8	

を次式のように求めた。

$$n_{\text{index}}^{\text{InP}}(\lambda) = 1.1584\lambda^4 - 7.0707\lambda^3 + 16.1456\lambda^2 - 16.4842\lambda + 9.5739 \quad (10)$$

また, $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ に対して, $1.5 \mu\text{m}$ 以上の波長では, 理論式¹⁶⁾と Vegard 則による組成からの近似式(11)を用い, それより短い波長では反射率の実測値とのフィッティングから求めた値を用いた ($n_{\text{index}}^{\text{GaInAs}} \sim 3.74$).

$$n_{\text{index}}^{\text{GaInAs}}(\lambda) = [1 + E_d/E_g + E_d(1.24/\lambda)^2/E_g^3 + \xi(1.24/\lambda)^4/\pi \cdot \ln\{[2E_g^2 - E_0^2 - (1.24/\lambda)^2]/[E_0^2 - (1.24/\lambda)^2]\}]^{1/2} \quad (11)$$

$$E_d = (12.39x - 12.71)y + 7.54x + 3.2891$$

$$\xi = \pi E_d/[2E_g^3(2E_g^2 - E_0^2)]$$

SiO_2 と Si_3N_4 の屈折率波長分散は報告されている測定結果¹⁷⁾を次の多項式で近似して計算した。

$$n_{\text{index}}^{\text{SiO}_2} = 1.463 - 1.224 \times 10^{-2}\lambda \quad (12)$$

$$n_{\text{index}}^{\text{Si}_3\text{N}_4} = 3.600 - 0.150\lambda^2 \quad (13)$$

他のパラメータの推定をするために, 設計波長 $1.5 \mu\text{m}$ の反射防止膜 (SiO_2 : 140 nm / Si_3N_4 : 130 nm) を形成した従来型の格子整合 GaInAs p-i-n PD を試作し, 外部量子効率実験値との比較を行った。計算に用いたパラメータと素子構造を **Table 1** に示し, 分光感度特性を **Fig. 5** に示す。

長波長側の分光感度の限界を決める格子不整合 GaInAs 吸収層の λ_g を制御, 評価するには, 格子不整合による歪の影響を無視できない。そこで格子不整合による歪が E_g に与える影響について以下詳細な検討を行った。

$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ のバンドギャップエネルギー $E_g(300 \text{ K})$ は,

$$E_g(x) = 0.36 + 0.629(1-x) + 0.436(1-x)^2 \quad (\text{eV}) \quad (14)$$

で与えられる¹⁸⁾。この混晶比 x に対応する格子定数 a は,

$$a = 6.0590 - 0.4054(1-x) \quad (\text{\AA}) \quad (15)$$

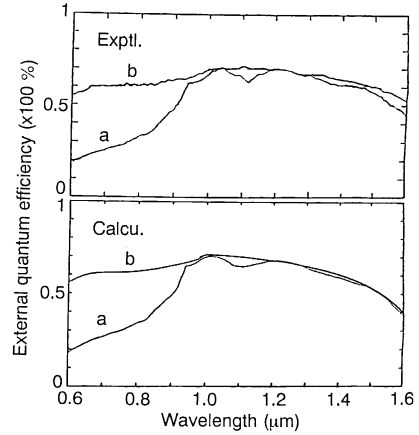


Fig. 5 Comparison of the measured and calculated external quantum efficiencies for conventional lattice-matched GaInAs p-i-n photodiodes. The InP cap layer thickness of these diodes are (a) $0.7 \mu\text{m}$ and (b) $0.07 \mu\text{m}$ while the GaInAs absorbing layer thickness is $1.3 \mu\text{m}$ for these diodes.

したがって, InP との格子不整合 $\Delta a/a$ は,

$$\Delta a/a = \frac{a(\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}) - a(\text{InP})}{a(\text{InP})} \quad (16)$$

となる。

XRC 測定から得られる $\Delta a^+/a$ は, 格子不整合で生じた応力の影響を受けて, (16)式から求められる値とは異なっている。結晶欠陥等による応力緩和がなく, コヒーレント成長を仮定したときは, 両者の間に次式の関係がある。

$$\Delta a/a = [C_{11}/(C_{11} + 2C_{12})](\Delta a^+/a) \quad (17)$$

ここで, 弾性定数 C_{11} , C_{12} は, Vegard 則から,

$$C_{11} = 11.88(1-x) + 8.33x \quad (\times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2) \quad (18)$$

$$C_{12} = 5.38(1-x) + 4.526x \quad (\times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2) \quad (19)$$

となる¹⁹⁾。

格子不整合による応力が全く緩和されていない場合, $\Delta a^+/a$ を(17)式に代入し, (15)~(19)式について組成 x

を計算する. この組成 x に対応した 2 軸性圧縮応力の影響を考慮したバンドギャップエネルギー E_g^s (300 K) は¹⁹⁾,

$$E_g^s(x) = E_g(x) + [-2A(C_{11} - C_{12})/C_{11} + B(C_{11} + 2C_{12})/C_{11}] \varepsilon \quad (20)$$

で与えられる. ここで, $E_g(x)$ は (14) 式から求められる. 弾性歪 $\varepsilon = \Delta a^4/a$ とし, 静水圧変形ポテンシャル A とせん断変形ポテンシャル B は,

$$A = -(1/3)(C_{11} + 2C_{12})(\partial E_0/\partial P) \\ = -(1/3)(C_{11} + 2C_{12})[1.15x + 1.00(1-x)] \quad (21)$$

$$B = -1.7x - 1.8(1-x) \quad (22)$$

として Vegard 則から求めた.

内部応力が完全に緩和された場合は, (16) 式が組成を与えていると考えられる.

これらの計算結果と測定結果の比較を Fig. 6 に示す. 実線は, 応力が完全に緩和された場合で $\Delta a^4/a = \Delta a/a$ に対する E_g の変化の計算結果, 点線は応力が全く緩和されていない場合の計算結果である. ○印は, InP 基板上に厚さ約 0.1 μm の GaInAs 層を成長したときの測定結果, ●印は, 本研究で製作した PD の厚さ 2.3~3 μm の GaInAs 吸収層の測定結果である. E_g の測定は 77~200 K の フォトルミネッセンス (PL) 測定の発光ピークエネルギーを 300 K まで外挿して求めた (Ge 検出器の感度が 0.72 eV 付近から急激に低下するため). PD の GaInAs 吸収層は格子不整合により生じる歪の

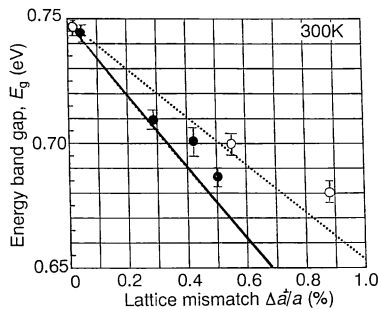


Fig. 6 Energy band gap of undoped $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ layers at room temperature as a function of the lattice mismatch normal to the wafer surface $\Delta a^4/a$. These data were estimated from the photoluminescence measurements in the temperature range from 77 to 200 K for (○) the 0.1 μm thick $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ layers grown on InP substrates and (●) the $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ light-absorbing layers of the photodiode structure in Fig. 1. Dotted and solid lines represent the calculations with and without the biaxial compressive strain in the $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ layers.

応力を緩和するように製作されていることが示されている.

一方, PL, XRC の測定の困難さと高い Zn 濃度, MOVPE 成長における InP 層への As の取り込みの問題²⁰⁾から, InP キャップ層の吸収端波長に対する歪の効果のはっきりとした測定結果は得られていない.

分光感度波長特性の計算には, (14) 式で与えられる吸収端波長を用いた. また, 分光感度波長特性の測定結果に対する計算のフィッティングは, GaInAs 吸収層内の II 層内の少数キャリア寿命と InP キャップ層の吸収端波長を変化させて行い, 他のパラメータは, 格子整合 GaInAs PD の計算と同じ値にとった.

4. 実験結果と考察

4.1 分光感度

試作した PD の印加電圧 0V, 20°C での分光感度波長特性の測定結果を Fig. 7 に示す. Fig. 7 には, Si および Ge p-i-n PD (市販品) の測定結果も併せて示した. 本研究の PD は, 0.6~1.75 μm の範囲波長で, 高い分光感度 (外部量子効率 > 60%) であった. 点線で示した計算結果は, 格子整合 PD の分光感度計算における II 層内の少数キャリア寿命の値を 1/3 とした場合で, 測定結果と比較的よく一致している. また, InP キャップ層の吸収端波長を 0.98 μm として計算した.

Fig. 8 は, 受光部径 ϕ 300 μm の試作 PD の波長 0.85 μm の感度 (外部量子効率約 80%) の面内分布測定結果で, 相対感度変化は $\pm 1\%$ 程度であった.

温度変化に伴う分光感度の変化 $\Delta R[(\text{mA/W})/\text{K}]$ の測定結果を Fig. 9 に示した⁶⁾. この測定は, 定格子整合 GaInAs PD (InP キャップ層厚: 0.65 μm , GaInAs 吸

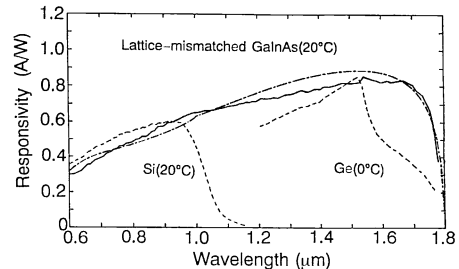


Fig. 7 Measured responsivity of a lattice-mismatched GaInAs photodiode (solid line), and comparison to responsivities of conventional Si and Ge p-i-n photodiodes (dashed lines). Dash-dotted line denotes the calculated responsivity for the lattice-mismatched GaInAs photodiodes.

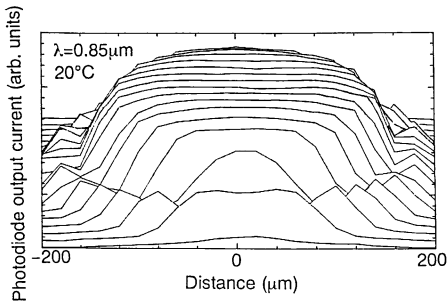


Fig. 8 Photoresponse scans at 0.85 μm of a lattice-mismatched GaInAs photodiode. The scan step was 20 μm .

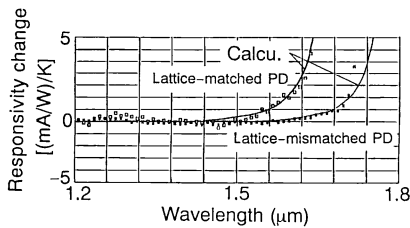


Fig. 9 Responsivity variations of lattice-matched and -mismatched photodiodes with temperature. Solid curves represent the calculations.

吸収層厚: 2.6 μm) と歪超格子層のない格子不整合 GaInAs (キャップ層厚: 60 nm, 吸収層厚: 2.3 μm) で行った。実線は、(8)式の E_g の温度依存性から計算した結果で、測定結果とよく一致する。

4.2 暗電流と周波数応答特性

本研究で試作した PD (p^+n 接合径: ϕ 110 μm) の逆方向電流電圧特性を **Fig. 10** に示した。歪超格子層を挿入することで約 1 桁暗電流が減少している。

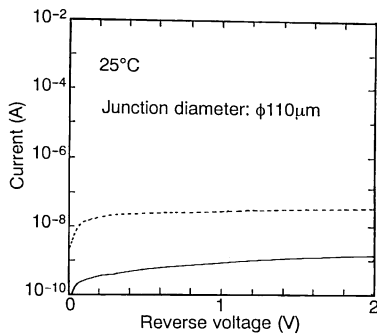


Fig. 10 Reverse dark current versus bias voltage characteristics for lattice-mismatched GaInAs photodiodes with (solid line) and without (dashed line) strained-superlattice buffer layer. The junction diameter of these photodiodes is 110 μm .

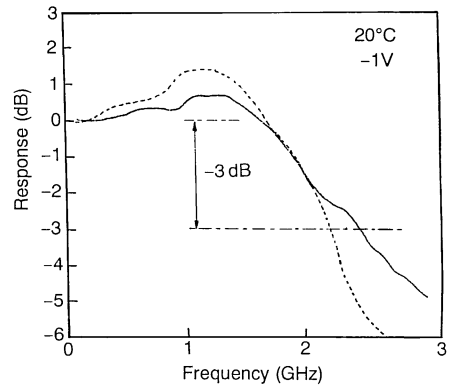


Fig. 11 Frequency response measured on a 110 μm -diam lattice-mismatched GaInAs photodiode at wavelengths of 0.78 (dotted line) and 1.55 μm (solid line) at a reverse bias voltage of 1 V.

格子不整合 GaInAs PD の暗電流は、転位密度で決定されるキャリア生成速度に関係すると考えられている²¹⁾。また、GaInAs/InP 歪量子井戸の p-i-n 構造の逆方向電流が、臨界膜厚を越えた時に著しく増加することが報告されている¹⁰⁾。今回試作した PD では、InP キャップ層と GaInAs 吸収層上部でエッチピット密度が歪超格子層により約 1/5 程度に減少していることから、暗電流の減少は転位密度の減少に関係すると考えられる。

試作した接合径 ϕ 110 μm の PD の遮断周波数 f_{-3dB} を、光ヘテロダイン法で測定した結果を **Fig. 11** に示す。 f_{-3dB} =2.2 GHz (波長 0.78 μm)、2.5 GHz (波長 1.55 μm) が得られ、この周波数帯域では、遮断周波数の波長依存性はほとんど見られなかった。

5. ま と め

PD の分光感度波長特性の問題点を検討し、格子不整合 GaInAs 吸収層と薄い InP キャップ層の構造を持った、分光感度波長帯域が非常に広い PD を製作した。厚い光吸収層の成長には、格子不整合によって生じる歪を低減する方法が有効であることを示した。さらに、歪超格子を挿入して、実用的な値まで暗電流を低減できた。また、新たに開発した Zn 拡散法を用いて、この PD に必要な浅い p^+n 接合を形成することができた。PD の分光感度測定結果は、分光感度計算の結果とほぼ一致し、長波長側の温度依存性、InP キャップ層による入射光の多重反射の低減効果を確認した。

PD の分光感度波長特性を考えると、光吸収層のエピタキシャル成長に格子整合の必要条件が外されると、

混晶半導体の利用の選択範囲は格段に広がる。本研究のPDはその一例である。しかし、半導体レーザーダイオードに歪格子を利用する場合等とは異なり、PDでは、転位が発生する臨界膜厚を越えるような厚い格子不整合エピタキシャル層が必要である。今後、格子不整合の許容度の大きい良質な混晶成長の研究とその物性研究が進捗し、本研究で示したような新しい受光素子の出現が期待される。

最後に、本研究を遂行するにあたり貴重なご意見、ご討論をいただいた大阪大学・成田信一郎名誉教授に感謝いたします。また、多くのご支援をいただいた光計測技術開発・森村正直研究所長、岩岡秀人主任研究員に感謝いたします。

文 献

- 1) H. Yamagishi, Y. Suzuki and A. Hiraide: "Precise measurement of photodiode spectral responses using the calorimetric method," IEEE Trans. Instrum. Meas., **38** (1989) 578-580.
- 2) G. A. Gaspaian, G. H. Olsen, V. S. Ban, G. Erickson, K. Woodruff and J. Colosi: "High visible response from large-area indium gallium arsenide detectors," *Technical Digest, Optical Fiber Communication Conf.* (Optical Society of America, Washington, DC, 1988) paper WQ29.
- 3) S. Kagawa, K. Inoue, I. Ogawa, Y. Takada and T. Shibata: "Wide-wavelength InGaAs/InP PIN photodiodes sensitive from 0.7-1.6 μm ," Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) 1843-1846.
- 4) M. Wada, M. Seko, K. Sakakibara and Y. Sekiguchi: "GaInAs/InP photodiodes fabricated by MOVPE and a new Zn diffusion technique," Jpn. J. Appl. Phys., **29** (1990) L401-L404.
- 5) M. Wada, K. Sakakibara, Y. Sekiguchi and H. Iwaoka: "Wide-wavelength GaInAs p-i-n photodiodes using a lattice-mismatched light-absorbing layer grown by metal-organic vapor-phase epitaxy," *Technical Digest, Conf. on Lasers and Electro-Optics* (Optical Society of America, Washington, DC, 1991) paper CThF 6.
- 6) M. Wada, K. Sakakibara, M. Higuchi and Y. Sekiguchi: "Wide-wavelength GaInAs PIN photodiodes using lattice-mismatched light-absorbing layer and a thin InP cap layer," Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) L1501-L1504.
- 7) M. Glade, J. Hergeth, D. Grützmacher, K. Masseli and P. Bulk: "Diffusion of Zn acceptors during MOVPE of InP," J. Crystal Growth, **108** (1991) 449-454.
- 8) J. W. Matthews: *Epitaxial Growth Part B* (Academic Press, New York, 1975) Chap. 8, pp. 560-609.
- 9) R. People and J. C. Bean: "Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer hetero-structures," Appl. Phys. Lett., **47** (1985) 322-324.
- 10) H. Temkin, D. G. Gershoni, S. N. G. Chu, J. M. Vanderberg, R. A. Hamm and M. B. Panish: "Critical layer thickness in strained $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{InP}$ quantum wells," Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 1668-1670.
- 11) M. Wada, K. Sakakibara, M. Higuchi and Y. Sekiguchi: "Investigation of Zn diffusion in InP using dimethylzinc as Zn source," J. Crystal Growth, **114** (1991) 321-326.
- 12) M. Wada, K. Sakakibara and Y. Sekiguchi: "A new method of Zn diffusion into InP for optical device fabrication," *American Vacuum Society Series 10 Conf. Proceedings No. 227*, ed. P. H. Holloway (American Inst. Phys., New York, 1991) pp. 138-141.
- 13) S. Adachi: "Material parameters of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ and related binaries," J. Appl. Phys., **53** (1982) 8775-8792.
- 14) H. Burkhard, H. W. Dinges and E. Kuphal: "Optical properties of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-y}\text{As}_y$, InP, GaAs, and GaP determined by ellipsometry," J. Appl. Phys., **53** (1982) 655-662.
- 15) M. Erman, P. Jarry, R. Gamonal, J.-L. Gentner, P. Stephan and C. Guedon: "Monolithic Integration of a GaInAs p-i-n photodiode and an optical waveguide," IEEE J. Lightwave Technol., **6** (1988) 399-411.
- 16) F. Fiedler and A. Schlachetzki: "Optical parameters of InP-based waveguides," Solid-State Electron., **30** (1987) 73-83.
- 17) H. R. Philipp: *Handbook of Optical Constants of Solid* (Academic Press, Inc., New York, 1985) pp. 749-774.
- 18) R. N. Nahory, M. A. Pollack, W. D. Johnston and R. L. Hauser: "Bandgap versus composition and demonstration of Vegard's law for $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ lattice matched to InP," Appl. Phys. Lett., **33** (1978) 659-661.
- 19) C. P. Kuo, S. K. Vong, R. M. Cohen and G. B. Stringfellow: "Effect of mismatch strain on band gap in III-V semiconductors," J. Appl. Phys., **57** (1985) 5428-5432.
- 20) M. Wada, M. Seko, K. Sakakibara and Y. Sekiguchi: "Incorporation of arsenic and gallium in InP layers in GaInAs/InP heterostructures grown by MOVPE," Jpn. J. Appl. Phys., **29** (1990) 2342-2350.
- 21) E. Ishimura, T. Kimura, T. Shiba, Y. Mihashi and H. Namizaki: "Dark current and diffusion length in InGaAs photodiodes grown on GaAs," Appl. Phys. Lett., **56** (1990) 644-646.