

Design and Fabrication of Surface - Illuminated - Type Semiconductor Optical Modulator with Electron Depleting Absorption Control

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-05-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00058222

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



電子空乏化を用いた平面型半導体光変調器の設計および試作

桑村 有司[†] 山田 実[†]

Design and Fabrication of a Surface-Illuminated-Type Semiconductor Optical Modulator with Electron Depleting Absorption Control

Yuji KUWAMURA[†] and Minoru YAMADA[†]

あらまし 電子空乏化を用いた平面型半導体光変調器の設計と試作を行った。最適な条件で理論設計した例での消光特性は-5Vの電圧変化で約10dB、挿入損は1dB以下、動作速度は数百MHz~数GHzの諸特性が期待できる。一方、予備的実験として試作した平面型光変調器の消光特性は-7.5Vの電圧変化で約10dBであり、低い駆動電圧で動作する光透過タイプの変調器が実現された。

キーワード 光変調器, 光コンピュータ, 光演算素子, 電子空乏化, 空間光変調器, スマートピクセル

1. ま え が き

光による並列画像処理および並列論理演算などを行う光コンピュータシステムや並列情報伝送を行う光インタコネクションのキーデバイスとして低電圧でかつ高速に動作する透過タイプ平面型光変調器の開発が望まれている。半導体中の吸収係数を変化させると半導体内部を通過した光の強度変調を行うことができ、透過タイプの光変調器が実現できる[1],[2]。筆者らは、直接遷移型半導体材料でのpn接合近傍における電子空乏化を利用した透過タイプの平面型EDAC(Electron Depleting Absorption Control)光変調器を提案し、素子試作を行ってきた[3],[4]。現在までに、消光比4.1dB(電圧変化5.5V)、挿入損13.8dBの平面型EDACの試作[4]や電子空乏化に伴う光吸収増加のメカニズム解明[5]について報告してきた。しかしながら、平面型EDACの消光比や挿入損については、更に改善が期待できる。本論文では低い駆動電圧で、高い消光比、低い挿入損を実現するための設計条件を再検討し、電界効果で動作する平面型EDACを新たに試作して特性改善を行ったことについて報告する。まず、2.ではEDACの動作原理について述べた後、消光比 δ や挿入損 κ の解析手順を示し、一對のpn接合に

おける δ や κ の数値計算例を示して、不純物濃度の最適化を行う。3.では多数対のpn接合を用いた平面型EDACについて消光比5~20dB(電圧変化5V)を目標として素子構造を設計すると共に挿入損や動作速度についての理論解析例を示す。4.では理想的な構造ではないが、現状技術での試作実験を示し、設計値との比較検討する。

2. 光変調器の動作原理と一對のpn接合における消光比

2.1 EDAC光変調器の動作原理

図1にEDAC光変調器の動作を図示する。半導体中の電子や正孔を空乏化すると、

- a. 伝導帯中の電子数や価電子帯中の正孔数の減少(バンドフィーリング効果の減少)
- b. スクリーニング効果の減少による不純物エネルギー準位の移動
- c. 内部電界(フランツ・ケルディッシュ効果)強度の増加

の三つの効果により空乏層内部の光吸収係数が1000~数千 cm^{-1} 程度増加する[5]。このため、図1のようなp-p-n-nヘテロ接合構造では、空乏層内で帯間遷移による光吸収が生ずるが、他の領域での光吸収は起きにくい。空乏層幅はpn接合への電圧印加により制御できる。図1(a)の順バイアスでは空乏層領域は閉じ、図1(b)の逆バイアスでは空乏層は広がる。そこで、pn

[†] 金沢大学工学部電気・情報工学科, 金沢市
Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa-shi, 920-8667 Japan

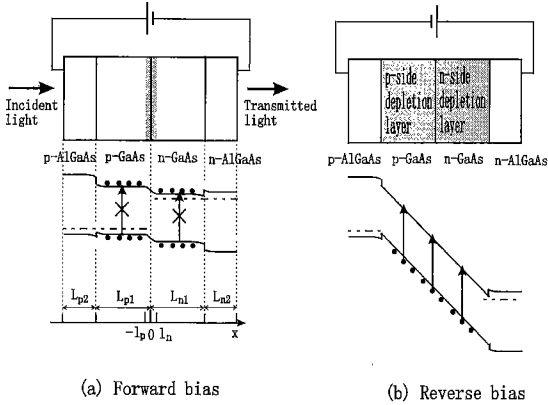


図1 平面型EDAC変調器の基本素子構造と動作
Fig. 1 Basic structure and operation of the EDAC modulator.

接合面に対して垂直方向に光を通過させれば、光は空乏領域で吸収するので、空乏層の閉じた順バイアスでは「光透過」、広がった逆バイアスでは「光遮断」となる。以上の原理に基づき光変調動作が可能となる。入射光のエネルギーをGaAsのバンドギャップ幅程度とし、逆バイアス印加時には空乏層厚がpおよびnのGaAs層厚に一致するように選定すれば、大きな消光比で小さな挿入損の変調器となる。

2.2 消光比の解析手順

図1に示す構造における一对のpn接合当りの消光比 δ と挿入損 κ を以下の手順によって求めた。各層中の不純物濃度や層厚を与えて δ や κ を計算するため、pn接合の順方向に対して V_{on} の電圧を加えたときを光透過状態、 V_{off} の電圧を加えたときを光遮断状態と仮定する。今、n-GaAs中のドナー濃度が N_D でp-GaAs中のアクセプタ濃度が N_A の階段接合の場合、接触電位差を V_D とおくと、ポアソン方程式よりn側空乏層幅 $l_n(V)$ やp側空乏層幅 $l_p(V)$ は、

$$l_n(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{e(N_A + N_D)} \frac{N_A}{N_D} (V_D - V)} \quad (1)$$

$$l_p(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s}{e(N_A + N_D)} \frac{N_D}{N_A} (V_D - V)} \quad (2)$$

となり、空乏層内部での電界分布 $F(x)$ は、

$$F(x) = \begin{cases} \frac{eN_A(l_p(V)+x)}{\epsilon_0\epsilon_s} & : -l_p(V) \leq x \leq 0 \\ \frac{eN_D(l_n(V)-x)}{\epsilon_0\epsilon_s} & : 0 \leq x \leq l_n(V) \end{cases} \quad (3)$$

と求まる。ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 ϵ_s は半導

体の比誘電率である。

pn接合を有する半導体の場合、外部電圧の有無によらず半導体中に熱平衡領域と空乏層領域が存在するので、熱平衡領域での吸収係数を α 、空乏層での吸収係数を $\alpha'(x, V)$ と明記して区別すると、図1の構造を透過した光の強度 $T(V)$ は、

$$T(V) = T_0 \times \exp \left[- \left\{ \alpha_{p2}L_{p2} + \alpha_{n2}L_{n2} + \int_{-l_p(V)}^0 \alpha'_{p1}(x, V)dx + \alpha_{p1}(L_{p1} - l_p(V)) + \int_0^{l_n(V)} \alpha'_{n1}(x, V)dx + \alpha_{n1}(L_{n1} - l_n(V)) \right\} \right] \quad (4)$$

と書くことができる。ここで、 T_0 は入射光強度、 L_i は各層の層厚、 α_i および L_i 中の添字 $p2, p1, n1, n2$ はそれぞれp-AlGaAs, p-GaAs, n-GaAs, n-AlGaAs領域を表し、図1中のpn接合面の位置を $x = 0$ とおいた。また、光入射端面での反射損は0と仮定した。消光比 δ は、光透過状態での透過光強度 $T(V_{on})$ と光遮断状態での透過光強度 $T(V_{off})$ の比で定義され、

$$\delta = 10 \log_{10} \left(\frac{T(V_{on})}{T(V_{off})} \right) \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

光透過状態での挿入損 κ は、

$$\kappa = 10 \log_{10} \left(\frac{T(V_{on})}{T_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

で定義される。そこで、式(4)を式(5)に代入すると、消光比 δ は、

$$\delta = 4.3429 \times \left\{ \int_0^{l_n(V_{off})} \alpha'_{n1}(x, V_{off})dx - \alpha_{n1}l_n(V_{off}) - \int_0^{l_n(V_{on})} \alpha'_{n1}(x, V_{on})dx + \alpha_{n1}l_n(V_{on}) + \int_{-l_p(V_{off})}^0 \alpha'_{p1}(x, V_{off})dx - \alpha_{p1}l_p(V_{off}) - \int_{-l_p(V_{on})}^0 \alpha'_{p1}(x, V_{on})dx + \alpha_{p1}l_p(V_{on}) \right\} \quad (7)$$

と書くことができる。ここで式(4)や式(7)中の α および α' の解析手順については文献[5]に従い、フランツ・ケルディツシュ効果、バンドフィーリング効果、スクリーニング効果、自由キャリア吸収効果を考慮して付録1~3に示す。フランツ・ケルディツシュ効果

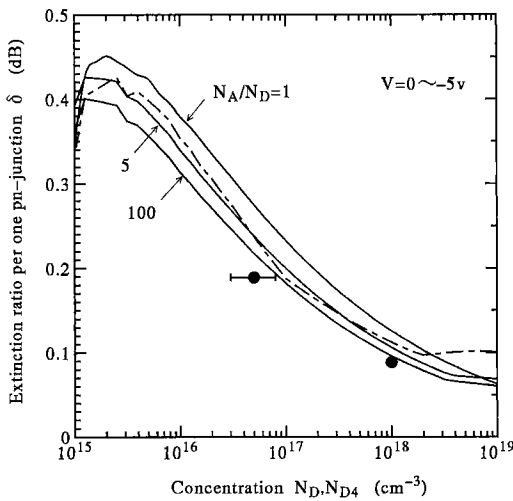


図2 一對のpn接合当りの消光比
Fig. 2 Extinction ratio per one pn-junction.

は内部電界強度 $F(x)$ により定まるが、空乏層内部では $F(x)$ が均一ではないので $\alpha'(x, V)$ は一定値でなく、式(4)や式(7)中の積分を正確に求める必要がある。一方、熱平衡領域での吸収係数 α は主にフェルミ準位の変化(バンドフィージング効果)や不純物の影響によるバンド構造の変形(スクリーニング効果)を考慮した場合の価電子帯-伝導帯間電子遷移で決まり、その値は電子数や不純物濃度に依存し、結晶内で一定値となる。従って階段接合の場合、濃度 N_D と N_A を与えれば、式(1)と(2)より空乏層幅 l 、式(3)より電界分布が決まるので式(A・8)を式(A・2)に代入して α' 、更に式(A・3)や式(A・7)を式(A・1)に代入して α の各値を見積もることができ、式(7)を用いて消光比を評価することができる。

2.3 一對のpn接合当りの消光比と挿入損

図2と図3にはドナー濃度 N_D とアクセプタ濃度 N_A を変化させて見積もった一對のpn接合当りの消光比 δ と消光比の波長特性をそれぞれ示す。数値解析に用いたGaAs結晶の材料定数は屈折率 $n_r = 3.6$ 、比誘電率 $\epsilon_s = 13.1$ 、電子の有効質量 $m_c = 0.067m_0$ 、重い正孔の有効質量 $m_h = 0.45m_0$ 、軽い正孔の有効質量 $m_l = 0.082m_0$ 、真性半導体でのバンドギャップエネルギー $E_{g0} = 1.424\text{eV}$ 、双極子能率の2乗 $|R_0|^2 = 5.79 \times 10^{-57} (E_g/E_{ba})^2 c^2 \text{m}^2$ 、バンド内電子緩和時間 $\tau_a = 0.1\text{ps}$ 、電子波動の揺らぎの相関時間 $\tau_b = 40\text{fs}$ であり、温度 $T = 300\text{K}$ とした。図2中で

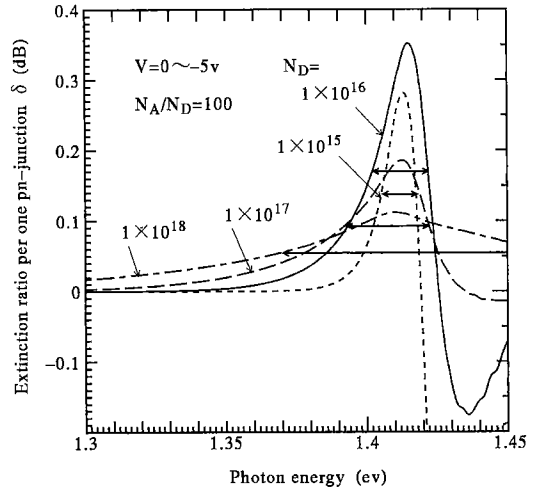


図3 一對のpn接合当りの消光比の波長特性
Fig. 3 Wavelength dependence of the extinction ratio per one pn-junction.

はアクセプタ濃度 N_A とドナー濃度 N_D の濃度比 N_A/N_D をパラメータとして1から100まで可変した。pn接合への印加電圧は $V_{on} = 0\text{V}$ から $V_{off} = -5\text{V}$ まで変化した。また、光入射の波長は δ 値のピーク波長とした。ドナー濃度 N_D が低い場合はフランツ・ケルディッシュ効果により α' 値が増大、高い濃度ではバンドフィージングおよびスクリーニング効果による α 値の減少とフランツ・ケルディッシュ効果による α' 値の増加が重なり合って吸収係数差 $\Delta\alpha (= \alpha' - \alpha)$ が増加する[5]。吸収係数差 $\Delta\alpha$ そのものの変化量は高い濃度材料の方が大きい、式(7)からわかるように消光比は空乏層の変化幅にも依存する。 N_D が低い濃度の方がn側空乏層幅が広く伸びるため、消光比が最大となる最適な濃度 N_D が存在する。最適な N_D 濃度は 10^{15}cm^{-3} 半ばで、pn接合当りの δ 値としては0.45dBまで大きくすることができる。濃度比 $N_A/N_D = 1$ の方が100の場合に比べて δ 値が大きくなっているのは、前者の全空乏層幅が後者の場合の約 $\sqrt{2}$ 倍広がりしているためである。なお、 $N_A/N_D < 1$ の条件において N_D/N_A をパラメータとして N_A に対する δ 依存性を求めると、 N_A が 10^{18}cm^{-3} より小さい範囲では図2とほぼ一致する特性となる。一方、 δ 値のピーク波長での透過光強度を $T_{peak}(V)$ で表し、光変調が可能な波長幅 $\Delta\lambda$ を $\delta \geq 10 \log_{10} [T_{peak}(0) / \{(T_{peak}(0) + T_{peak}(-5)) / 2\}]$ を満たす波長幅として図3中に \leftrightarrow 印で示した。 $\Delta\lambda$ 幅はドナー濃度 N_D を高くするほど広がる。

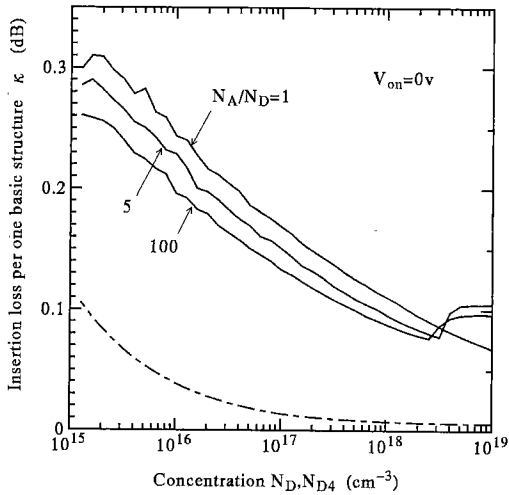


図4 一对のp-p-n-n-接合構造当りの挿入損
Fig. 4 Insertion loss per one p-p-n-n-junction structure.

一方、挿入損 κ は、無バイアス状態 ($V_{on} = 0V$) で吸収損として式(4)を式(6)に代入して見積もった。図4には一对のpn接合当りの挿入損 κ を実線で示した。ここで、各層の層厚は $L_{n1} = l_n(-5)$, $L_{p1} = l_p(-5)$, $L_{n2} = L_{p2} = 1\mu m$ とし、n-AlGaAsとp-AlGaAs中の不純物濃度は $1 \times 10^{18} cm^{-3}$ を仮定した。 N_D が $10^{15} cm^{-3}$ 半ばの低い濃度では、一对のpn接合当りの消光比は0.4dBと大きくとれるが、挿入損も0.2~0.3dBと大きくなってしまふ。図1の構造において挿入損が大きくなってしまったのは、無バイアス時においてもGaAs領域に空乏層が広がっていることが原因である。従って、無バイアス時に広がっている空乏層の領域をバンドギャップの大きなAlGaAsで置き換えれば、挿入損を低減することができる。次章では挿入損の低減を考慮した素子構成で変調器の設計を行うことにする。

3. 平面型光変調器の設計

本章では最適な動作が得られる構造を想定して理論解析を行う。

3.1 設計する素子構造

図5および図6には設計を行う変調器の素子構造を示した。高い消光比かつ低い挿入損の変調器を実現するため、以下の点に留意して素子構造を決めると共に各層厚や不純物濃度などの諸パラメータを決定した。

(1) 一つのpn接合では消光比が十分にとれない

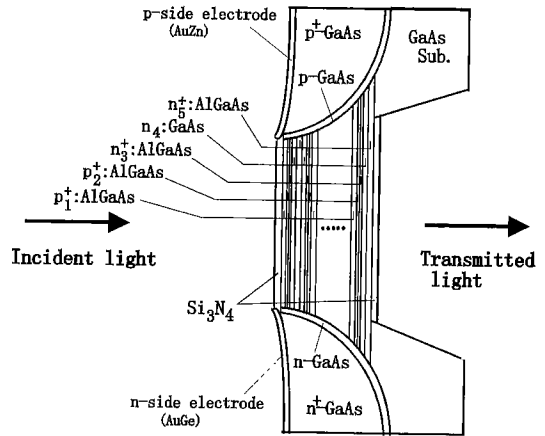


図5 設計する変調器の構造
Fig. 5 Structure of a designing modulator.

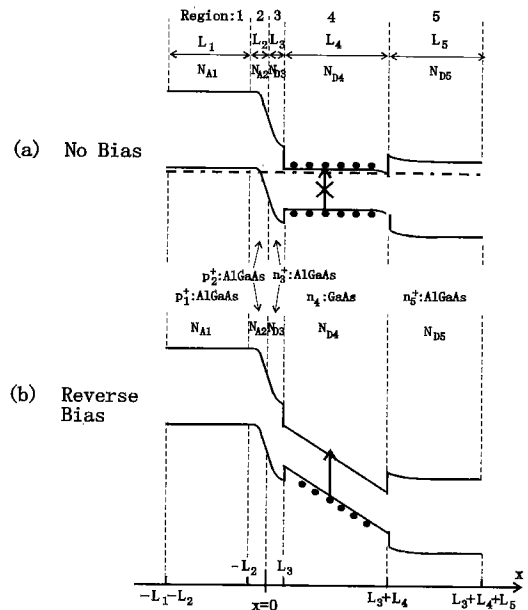


図6 多層ヘテロ構造のエネルギーバンド図
Fig. 6 Energy band diagram for multi-layer heterostructure.

いので、図6に示すような p_1^+ -AlGaAs(領域:1), p_2^+ -AlGaAs(領域:2), n_3^+ -AlGaAs(領域:3), n_4 -GaAs(領域:4), n_5^+ -AlGaAs(領域:5)多層ヘテロ構造をM段積み重ねて図5に示す素子構造とした。

(2) 低電圧駆動とするため上下に設けた p^+ -GaAs/p-GaAsと n^+ -GaAs/n-GaAs層から多数のpn接合に電圧を加える電圧印加方式とした。

(3) n_4 -GaAs以外の領域はバンドギャップの大き

な AlGaAs とし、かつ AlGaAs 領域でのバンド間光吸収が無視できるように Al 組成を 0.1 以上とした。

(4) GaAs 領域中の帯間光吸収 (100cm^{-1} 程度) が原因で挿入損が生じるので、挿入損を 1dB 程度以下に抑えるには GaAs 層の全層厚を $20\mu\text{m}$ 以下とする必要があり、 n_4 -GaAs 領域の空乏化だけで光変調を行うことにした。

(5) pn 接合に加えた電圧の大部分が n_4 -GaAs 領域に加わるように各層の不純物濃度を調整した。

(6) 無バイアス時の n 側空乏層端が領域 3 と 4 の界面に一致するように n_3^+ -AlGaAs 層厚 L_3 を定めた。

(7) V_{off} の逆バイアス時に n 側空乏層端が領域 4 と 5 の界面に一致するように n_4 -GaAs 層厚 L_4 を定めた。

(8) V_{off} の逆バイアス時の p 側空乏層端が領域 1 と 2 の界面に一致するように p_2^+ -AlGaAs 層厚 L_2 を定めた。

(9) 素子の逆方向耐電圧を高くするため、メサ側面を取り囲む p-GaAs と n-GaAs 層中の不純物濃度を $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ とした。

なお、図中の p_1^+ -AlGaAs 層と n_5^+ -AlGaAs 層は各 pn 接合へ電圧を加えるための導電層であり、光吸収によって発生した電子や正孔を電源側へ流し出す役割も担う層である。

3.2 光変調器の設計

各領域 i のアクセプタまたはドナー濃度をそれぞれ N_{A_i} , N_{D_i} とすると、素子に電圧 V ($V_{off} \leq V \leq 0$) を加えたときの n 側空乏層幅 $l_n(V)$, p 側空乏層幅 $l_p(V)$ は、

$$l_n(V) = \left\{ \sqrt{\left(\frac{N_{A_2} + N_{D_3}}{N_{A_2} + N_{D_4}}\right)^2 - \frac{N_{D_3}(N_{A_2} + N_{D_3})}{N_{D_4}(N_{A_2} + N_{D_4})} \frac{V}{V_D}} + \left(1 - \frac{N_{A_2} + N_{D_3}}{N_{A_2} + N_{D_4}}\right) \right\} L_3 \quad (8)$$

$$l_p(V) = \frac{N_{D_3}L_3 + N_{D_4}(l_n(V) - L_3)}{N_{A_2}} \quad (9)$$

であり、3.1 での留意点 (6)~(8) により層厚 L_3 , L_4 および L_2 は、

$$L_3 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0 N_{A_2} V_D}{e N_{D_3}(N_{A_2} + N_{D_3})}} \quad (10)$$

$$L_4 = l_n(V_{off}) - L_3 \quad (11)$$

$$L_2 = l_p(V_{off}) \quad (12)$$

である。また、空乏層内部での電界強度分布 $F(x)$ は、

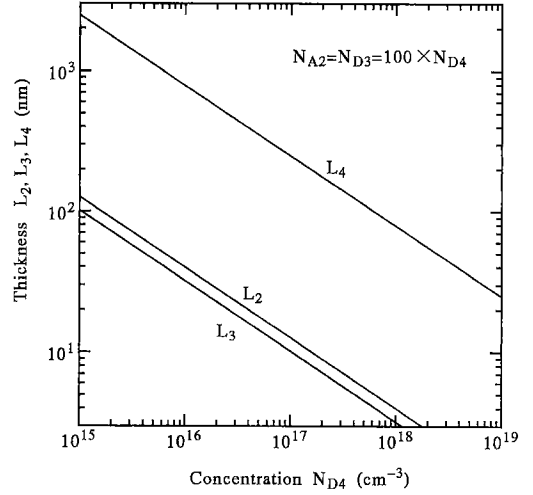


図7 層厚 L_2 , L_3 , L_4
Fig.7 Thickness L_2 , L_3 , L_4 .

$$F(x) = \begin{cases} \frac{eN_{A_2}(l_p(V)+x)}{\epsilon_s\epsilon_0} & : -l_p(V) \leq x \leq 0 \\ \frac{e(N_{A_2}l_p(V)-N_{D_3}x)}{\epsilon_s\epsilon_0} & : 0 \leq x \leq L_3 \\ \frac{eN_{D_4}(l_n(V)-x)}{\epsilon_s\epsilon_0} & : L_3 \leq x \leq l_n(V) \end{cases} \quad (13)$$

となる。領域 i 内部での熱平衡領域と空乏領域での吸収係数をそれぞれ α_i , α'_i とすると、素子からの透過光強度 $T(V)$ は、

$$T(V) = T_0 \times \exp \left[-M \left\{ \int_{L_3}^{l_n(V)} \alpha'_4(x, V) dx + \alpha_4(L_3 + L_4 - l_n(V)) + \alpha_1 L_1 + \alpha_2(L_2 - l_p(V)) + \alpha_5 L_5 \right\} \right] \quad (14)$$

と書ける。ここで、 M は多段に重ねる pn 接合数である。なお、留意点 (3) より AlGaAs 結晶中での光吸収 α_i は自由キャリア吸収だけで生じるので、自由キャリア数が少ない領域 3 での光吸収は略した。式 (14) を式 (5) に代入して、5V の電圧変化で消光比 δ [dB] を実現するのに必要な pn 接合数 M を

$$M = \frac{\delta/4.3429}{\int_{L_3}^{L_3+L_4} \alpha'_4(x, -5) dx - \alpha_4 L_4 + \alpha_2(L_2 - l_p(0))} \quad (15)$$

から見積もる。各層の不純物濃度は、留意点 (5) を考慮して $N_{A_2} = N_{D_3} = 100N_{D_4}$ の関係とし、 $N_{A_1} = N_{D_5} = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ を仮定した。また、

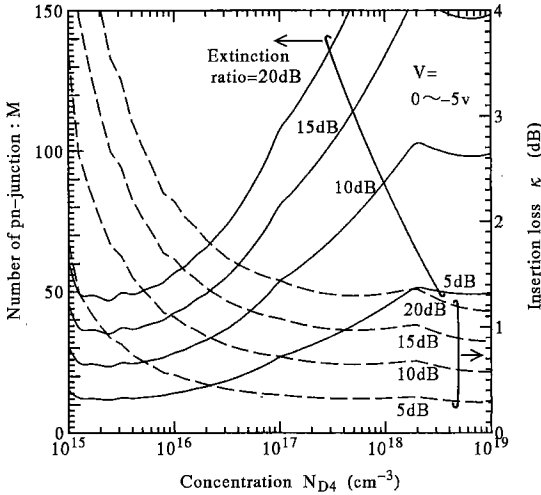


図8 消光比5, 10, 15, 20dBを実現するのに必要なpn接合数と挿入損
Fig.8 Number of pn-junction to realize a extinction ratio of 5, 10, 15 or 20dB and insertion loss.

光透過状態を $V_{on} = 0V$, 光遮断状態を $V_{off} = -5V$ とすると, 各層の層厚 L_2, L_3, L_4 は濃度 N_{D4} に依存してそれぞれ図7に示す厚さとなり, L_1 と L_5 は $1\mu m$ を仮定した. なお, 留意点(9)により, n-GaAs/ p_1^+ -AlGaAs や p_2^+ -AlGaAs 接合, p-GaAs/ n_5^+ -AlGaAs や n_3^+ -AlGaAs 接合での逆方向耐電圧 V_B (アバランシェ・ブレイクダウン電圧) は文献[8]より n-GaAs や p-GaAs の不純物濃度を $N_B(\text{cm}^{-3})$ として $V_B \approx -60(E_{g0}/1.1)^{3/2}(1 \times 10^{16}/N_B)^{3/4}$ で近似されるので, $N_B = 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ では上記接合面での耐電圧 $V_B \approx -15.7v$ となる. 今, 光遮断状態は $V_{off} = -5v$ を仮定したので, $N_{D4} < 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の光遮断状態では過剰な逆方向電流を流さずに n_4 -GaAs 層中の空乏化ができると予想される.

図2中には図5の構造におけるpn接合当りの消光比を一点波線で示し, 図8には消光比5, 10, 15, 20dBを実現するのに必要なpn接合数Mを実線でそれぞれ示した. ドナー濃度 N_{D4} を 10^{15}cm^{-3} 半ばまで下げると, $M=25$ 段で約10dB, $M=50$ 段では約20dBの消光比が期待できる. 一方, 無バイアス状態 ($V=0V$) の挿入損は式(14)を式(6)に代入して求めた. 図4中にはpn接合当りの挿入損を一点破線で示し, 図8には消光比5, 10, 15, 20dBの素子構造での挿入損を破線でそれぞれ示す. 消光比10dBの素子構造において N_D を $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ とすれば挿入損は1.3dB, 10^{16}cm^{-3}

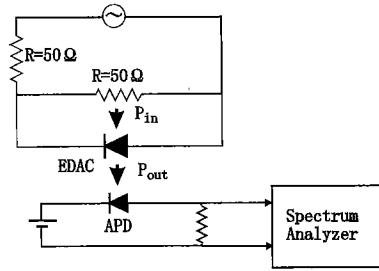


図9 動作速度測定のための駆動回路
Fig.9 Driving circuit to measure the operating speed.

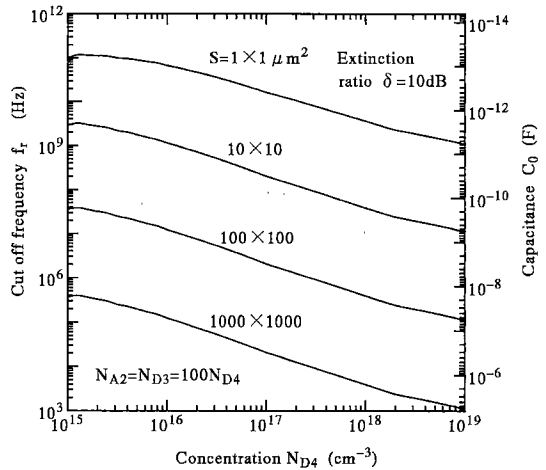


図10 動作速度の計算例
Fig.10 Example of the calculation of the operating speed.

以上とすれば挿入損を1dB以下に設計することができる.

更に, 無バイアス状態での素子の静電容量を C_0 とすると, 素子表面から見た光入射窓の表面積 S を用いて C_0 を,

$$C_0 = \epsilon_s \epsilon_0 \left\{ \frac{MS}{(l_p'(0) + l_n'(0))} + \frac{M\sqrt{SL_1}}{(l_p'(0) + l_n'(0))} + \frac{M\sqrt{SL_5}}{(l_p''(0) + l_n''(0))x} \right\} \quad (16)$$

で近似し, EDAC を図9に示す回路で駆動した場合の動作速度 f_r を

$$f_r = \frac{1}{\pi C_0 R} \quad (17)$$

で見積もった. ここで式(16)の括弧内の1項目は多層膜中の p_2^+ -AlGaAs/ n_3^+ -AlGaAs/ n_4 -GaAs接合で

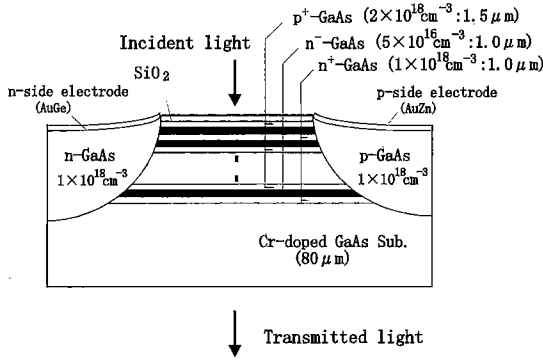


図11 試作した平面型光変調器の構造

Fig. 11 Structure of a fabricated surface-illuminated-type optical modulator.

の容量, 2項目および3項目はそれぞれn-GaAs/p₁⁺-AlGaAsとp-GaAs/n₂⁺-AlGaAs接合での容量であり, 各接合面での空乏層幅をそれぞれ l, l', l'' で表した。 $l_p(0)$ や $l_n(0)$ は式(9)と(8), $l'_p(0)$ と $l''_p(0)$ は式(2), $l'_n(0)$ と $l''_n(0)$ は式(1)から算出した。図10には消光比10dBの素子構造での動作速度の計算例を S をパラメータとして示した。素子の表面積 S を数十 μm^2 角まで小さくすると動作速度は数百MHz~数GHzまで早くすることができる。なお, 図10中の f_r が10GHzを超える素子の動作速度については, CR時定数に加え空乏層内のキャリアの走行時間も考慮する必要がある。

4. 平面型光変調器の試作および特性

結晶成長としては液相成長法を用いたが, Alの酸化が障害となり, また薄膜層の層厚制御も十分でないため各種のAlGaAs層を略して, 図11に示すようなGaAs結晶で構成したEDACを試作した。n⁺-GaAs, n⁻-GaAs, p⁺-GaAs接合を19段積み重ねた構造とした。光の透過と遮断はn⁻-GaAs層内部の空乏層厚を制御して行い, n⁻-GaAsの濃度は $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ とした。素子試作は3回の液相成長法を用いて行った。まず, 絶縁性GaAs基板上にn⁺-GaAs, n⁻-GaAsおよびp⁺-GaAsの各層を順次一様に成長した。その後, 化学エッチングによりn-GaAsおよびp-GaAs領域の溝を形成し, SiO₂膜を用いた選択成長により溝内部にp-GaAsとn-GaAs層をそれぞれ埋め込み成長した。p側およびn側電極を形成した後, 図11の形状に素子をへき開した。素子表面の光入射用窓の寸法は, $650 \times 650 \mu\text{m}^2$ である。

試作した素子の電圧-電流特性を図12に示す。整流

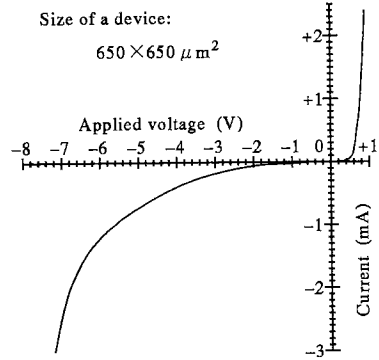


図12 電圧-電流特性

Fig. 12 Current-voltage characteristics.

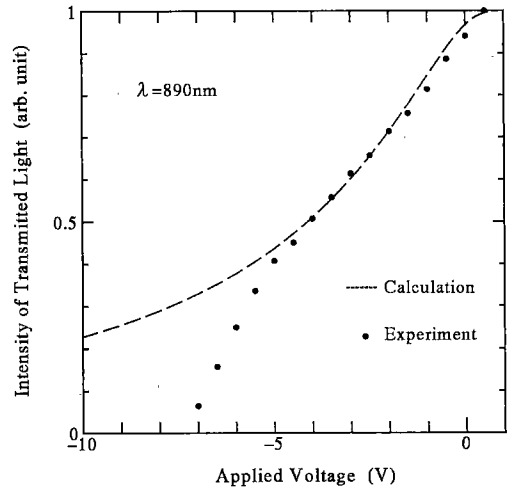


図13 電圧変化に対する透過光強度の変化

Fig. 13 Variation of the intensity of the transmitted light with applied voltage.

特性が観測でき, ダイオード構造ができていることが確認できた。しかしながら素子の逆方向耐圧は-5~-7Vであり, -5V近傍から電流は急増した。耐電圧が低い理由は, 埋込み成長したp-GaAsやn-GaAs層の濃度を 10^{18}cm^{-3} と高くしたため, 積層したp⁺-GaAsやn⁺-GaAs層との接合面での逆方向耐電圧が低くなったためである。図13には実測した素子の消光特性を黒丸印で示した。入射した光の波長は890nmである。+0.5V~-7Vの電圧変化で約90%(10dB)の消光が確認できた。また, 図13中の波線は式(14)を用いて解析した計算値である。印加電圧が0.5V~-5Vの範囲では, 実験と計算値はよく一致した。一方, -5V

より低い電圧範囲では実験値の消光が大きくなってしまった。図12では-5V近傍から素子に流れる電流が急増しているが、電流増加による発熱でGaAsのバンドギャップが長波長側へ移動してしたことが原因で実験での消光が増加していると思われた。図14には+0.5V~-6Vの電圧変化での消光比および挿入損の波長依存性をそれぞれ黒丸印および白丸印を用いて示した。消光比のピーク波長は890nmであり、ピーク波長での挿入損は約8dBであった。挿入損の内訳は、GaAs基板 ($\alpha \approx 71.5\text{cm}^{-1}$)での吸収損が約2.5dB, 光の入射端面での反射損が約2.2dBであり、残りの3.3dBが $p^+n^-n^+$ 多層領域での吸収損と見積もっている。なお、図14中には図11の素子構造での消光比および挿入損の計算値をそれぞれ実線と破線で示した。一方、図2中の2点の黒丸印は、空乏化するn-GaAs領域のドナー濃度をそれぞれ 5×10^{16} ($N_A/N_D = 40$) と $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ($N_A/N_D = 2$) [4]として試作したEDACに0V~-5Vの電圧を印加したときの消光比を一对のpn接合当り ($M=1$)に換算した実験値である。実験値は計算値に比べ若干小さいもののドナー濃度に関する依存性については両者ともほぼ一致した特性が得られた。最後に素子の動作速度を図9に示す測定系で実測した。図9中の回路でEDACに交流電圧を印加した。一定強度の光を入射すると、出射した光強度が変調を受けているので、APD光検出器で光強度を検出し、スペクトルアナライザで検出した変調信号の電力を読み取った。図15には変調された信号電力の周波数特性を示す。黒丸印が実測値であり、実線は実測した素子容量 $C_0=5.4\text{nF}$ から求めた計算値である。実測された動作速度 f_r は約1.2MHzであった。

5. む す び

電子空乏化を用いた平面型半導体光変調器の設計および試作を行った。最適な構造を目指した素子設計では、 $p_1^+:\text{AlGaAs}/p_2^+:\text{AlGaAs}/n_3^+:\text{AlGaAs}/n_4:\text{GaAs}/n_5^+:\text{AlGaAs}$ 多層ヘテロ接合構造をM段積み重ねた構造を仮定した。ドナー濃度 $N_{D4}=5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, $M=25$ 段の素子構造(図5)では、0~-5Vの電圧変化で

- 消光比：約10dB,
- 挿入損：1.3dB以下,
- 動作速度：数百MHz~数GHz,

の平面型光変調器を実現できることが予想できた。

一方、構造を簡略化した平面型EDAC光変調器を

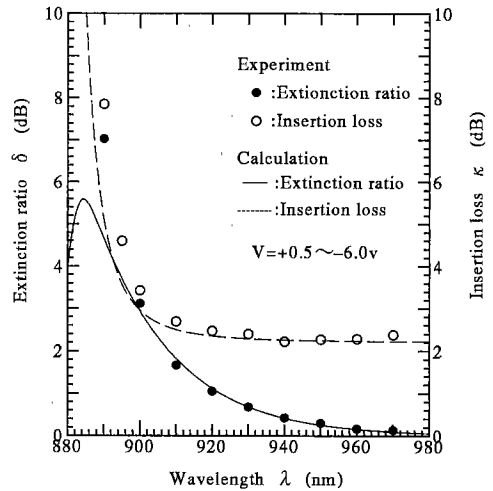


図14 消光率と挿入損の波長特性
Fig. 14 Wavelength dependences of the extinction ratio and the insertion loss.

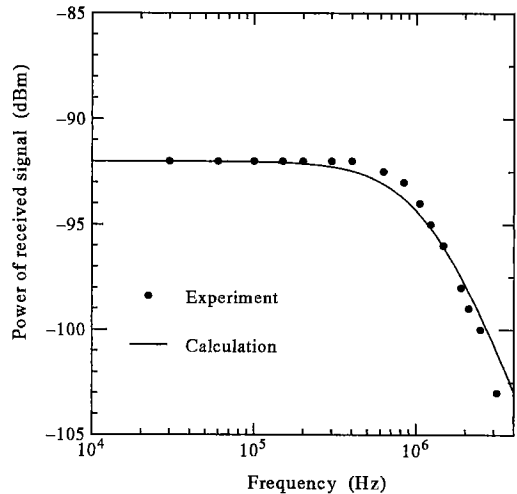


図15 光変調信号の周波数特性
Fig. 15 Frequency characteristics of the modulated optical signal.

試作し、7.5Vの電圧変化で約10dBの消光比が得られた。現状での挿入損は8dB、動作速度は1.2MHzではあるが、AlGaAs材料を利用したり、素子のサイズを小さくすることにより、素子設計で予想された値まで特性改善できると期待される。

謝辞 本研究開発当初に平面型EDAC光変調器の設計を行って頂いた川端努氏と素子試作を手伝って頂いた清水真氏に感謝します。本研究は文部省科学研究

費からの援助を受けて行われたものである。

文 献

- [1] G.E.Stillman, C.M.Wolfe, C.O.Bozler, and J.A.Rossi, "Electroabsorption in GaAs and its application to waveguide detectors and modulators," Appl. Phys. Lett., vol.28, pp.544-546, 1976.
- [2] D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.C. Damen, A.C. Gosard, W. Wiegmann, T.H. Wood, and C.A. Burrus, "Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures," Phys. Rev. vol.B32, pp.1043-1060, July 1985.
- [3] M.Yamada, K.Noda, Y.Kuwamura, H.Nakanishi, and K.Imai, "Semiconductor optical modulator by using electron depleting absorption control," IEICE Trans. Electron., vol.E75-C, no.9, pp.1063-1070, Sept. 1992.
- [4] Y.Kuwamura, M.Yamada, and M.Suzumi, "Panel-type semiconductor optical modulator using electron depleting absorption control," Jpn. J. Appl. Phys., vol.32, Pt.1, no.1B, pp.578-582, Jan. 1993.
- [5] 桑村有司, 山田 実, 橋本 晋, "電子空乏化を用いた半導体光変調器の動作機構解析," 信学論 (C-I), vol.J78-C-I, no.12, pp.616-625, Dec. 1995.
- [6] Y.Kuwamura and M.Yamada, "Analysis of modified Franz-Keldysh effect under influence of electronic intraband relaxation phenomena," Jpn. J. Appl. Phys., vol.35, Part 1, no.12A, pp.6117-6125, Dec. 1996.
- [7] H.C.Casey, Jr. and M.B.Panish, "Heterostructure Lasers," Part A : Fundamental Principles, pp.174-176, Academic Press, 1978.
- [8] S.M.Sze, "Physics of Semiconductor Devices," Wiley-Interscience, 2nd Edition, Chapter 2.5, pp.96-108, New York, 1969.

付 録

1. 吸収係数の表現

GaAs 結晶では光吸収に寄与する機構として帯間電子遷移による吸収と自由キャリア吸収が存在するので、熱平衡状態での吸収係数 α は、

$$\alpha = \alpha_{hc} + \alpha_{lc} + \alpha_{fc} \quad (\text{A}\cdot\text{1})$$

と書くことができる。ここで、 α_{hc} や α_{lc} はそれぞれ重い正孔や軽い正孔帯から不純物バンドを含めた伝導帯への電子遷移による吸収係数であり、 α_{fc} は電子や正孔による自由キャリア吸収である。

一方、空乏化状態を記号' で表し空乏化状態での吸収係数 $\alpha'(x, V)$ を、

$$\alpha'(x, V) = \alpha'_{hc}(x, V) + \alpha'_{lc}(x, V) \quad (\text{A}\cdot\text{2})$$

と記述する。ここで α'_{hc} や α'_{lc} は電界や不純物の影響によるバンド構造変形を考慮した場合の帯間遷移に

よる吸収係数である。なお、付録 2. と 3. では主に n 形半導体中の吸収係数 α や α' の計算手順について述べるが、p 形半導体についても n 形と同様の手順で計算した。

2. 熱平衡状態での吸収係数

不純物バンドを含めた伝導帯端のエネルギーを E_c 、価電子帯端のエネルギーを E_v とし、伝導帯電子と価電子帯正孔の有効質量をそれぞれ m_c , m_j とし、 $j = h$ で重い正孔、 $j = l$ で軽い正孔を示す。帯間遷移による光吸収係数 α_{jc} は、光の角周波数を ω として

$$\alpha_{jc} = \frac{\omega}{n_r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} \left(\frac{2m_c m_j}{m_c + m_j} \right)^{\frac{3}{2}} \int_{E_g}^{\infty} |R_0|^2 \sqrt{E_{ba} - E_g} [f_j - f_c] S(\hbar\omega - E_{ba}) dE_{ba} \quad (\text{A}\cdot\text{3})$$

で与えられる。ここで、 n_r は屈折率、 E_g は実効的なバンドギャップエネルギー、 E_{ba} は伝導帯と価電子帯中のエネルギー準位差 $E_b - E_a$ 、 R_0 は双極子能率、 f_c と f_j はフェルミ・ディラック分布関数、 $S(\hbar\omega - E_{ba})$ はスペクトル形状関数である。なお、光吸収端近傍で実験的に観測されるテイル状光吸収特性を精度良く解析するためスペクトル関数としては次式を用いた [6]。

$$S(\hbar\omega - E_{ba}) = \frac{1}{\hbar} \text{Re} \int_0^{\infty} \exp \left[j \left(\frac{E_{ba} - \hbar\omega}{\hbar} \right) \tau - \left\{ \frac{\tau_b}{\tau_a} \left(\frac{\tau}{\tau_b} + e^{-\frac{\tau}{\tau_b}} - 1 \right) \right\} \right] d\tau \quad (\text{A}\cdot\text{4})$$

ここで τ_a , τ_b はそれぞれバンド内電子緩和時間、電子波動の揺らぎの相関時間である [6]。

不純物を含む半導体では、連続したエネルギー準位である伝導帯や価電子帯のほかに、不純物を作るエネルギー準位が存在する。この準位は、不純物濃度が低いときには水素原子に類似した離散準位であるが、濃度が高くなると不純物バンドと呼ばれる連続準位となり、伝導帯や価電子帯と重なり合ってくる。GaAs 結晶の場合、n 形では $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以上、p 形では 10^{18}cm^{-3} の半ばから不純物バンドが形成されることが知られている。まず、不純物バンドが形成された場合の準位を文献 [5] 3.3 節のモデルで取り扱い、実効的な伝導帯端エネルギー E_c が不純物バンド準位端まで移動するものとして不純物の影響を導入する。一方、不純物バンド端エネルギーは帯電した不純物原子が結晶内部に作る静電ポテンシャルの分布より決定され

るが、熱平衡状態での半導体では電荷を持った多数のキャリア（電子や正孔）が存在するので、不純物を作る静電ポテンシャルの形状を変形してしまう。キャリアの存在によるポテンシャル変形はスクリーニング効果と呼ばれ、スクリーニング効果の有無により不純物準位が変化する。熱平衡状態では多数キャリアによるスクリーニング効果が効き、不純物バンドを考慮した伝導帯端エネルギー E_c を

$$E_c = E_{c0} - \frac{\hbar^2}{2m_c a_B} \frac{48L_{sc}}{d^3} \left[L_{sc} - \left(\frac{d}{2} + L_{sc} \right) e^{-\frac{d}{2L_{sc}}} \right] \quad (A \cdot 5)$$

で近似する。ここで E_{c0} は真性半導体での伝導帯端エネルギー、 L_{sc} がスクリーニング長で電子密度 n と正孔密度 p を用いて $L_{sc} = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_s k_B T / e^2 (n + p)}$ 、 a_B は有効ボア半径で $a_B = 4\pi \epsilon_0 \epsilon_s \hbar^2 / m_c e^2$ 、 d は不純物原子間の平均間隔で $d = (6/\pi N_D)^{1/3}$ である。

電子数の変化（バンドフィードバック効果）はフェルミ準位 E_F の移動で表すことができるので以下のように定めた。バルク材料中つまり熱平衡状態では電子密度 n を

$$n = \frac{(2m_c)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \int_{E_c}^{\infty} \frac{\sqrt{E - E_c}}{1 + \exp \frac{E - E_F}{k_B T}} dE \quad (A \cdot 6)$$

とし、電気的中性条件より E_F を決定した。

熱平衡状態での吸収係数 α は式(A.1)で与えられ、 α_{hc} および α_{lc} は式(A.3)より算出する。ここで、 α_{jc} の算出には実効的なバンドギャップエネルギー $E_g = E_c - E_v$ を用いる。

一方、自由キャリア吸収 α_{fc} については、GaAs材料での実験式[7]

$$\alpha_{fc} \approx 3 \times 10^{-18} n + 7 \times 10^{-18} p \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (A \cdot 7)$$

で近似した。

3. 空乏層中での吸収係数

p-n接合における空乏層内では、イオン化したドナーとアクセプタのため内部電界が生じている。この電界によりフランツ・ケルディッシュ効果が生じる。電界 F が印加された半導体中の光吸収はバンド-バンド間の電子遷移過程として解析できる。Airy関数を $Ai(z)$ と記すと、均一電界 F のもとの光吸収係数 α'_{jc} は、

$$\alpha'_{jc}(x, V) = \frac{\omega}{n_r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{M_{jc} e F}{\pi \hbar^2 E_f} \times \int_{-\infty}^{\infty} |R_0|^2 [f_j - f_c] S(\hbar\omega - E_{ba}) \left\{ \frac{E_{ba} - E'_g}{E_f} \left| Ai\left(-\frac{E_{ba} - E'_g}{E_f}\right) \right|^2 + \left| Ai'\left(-\frac{E_{ba} - E'_g}{E_f}\right) \right|^2 \right\} dE_{ba} \quad (A \cdot 8)$$

と導出される。ここで M_{jc} は $1/M_{jc} = 1/m_c + 1/m_j$ で表される換算質量、 E_f は $E_f = \{(\hbar e F)^2 / 2M_{jc}\}^{1/2}$ 、 $Ai'(z)$ は Airy 関数の微分を意味する。

空乏層中では電子や正孔は枯渇しているのでスクリーニング効果は効かなくなり、等価的な伝導帯端は E'_c 値まで下がってしまう。ここで E'_c を

$$E'_c = E_{c0} - \frac{e^2}{\pi \epsilon_0 \epsilon_s d} e^{-\frac{d}{2L_{sc}}} \quad (A \cdot 9)$$

で近似し、空乏層内部でのバンドギャップ E'_g は $E'_g = E'_c - E_v$ とする。また、空乏層ではフェルミ準位 E_F がバンドギャップ E'_g の中央付近 E'_F 値まで下がっているものとした。ここで E'_F は、

$$E'_F = \frac{E'_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{1}{m_c} \frac{m_h m_l}{m_h + m_l} \right) \quad (A \cdot 10)$$

である。

空乏層中での光吸収係数 α' は式(A.2)で与えられ、 α'_{hc} および α'_{lc} は式(A.8)より算出する。ここで、 α'_{jc} の算出には実効的なバンドギャップ E'_g およびフェルミ準位 E'_F を用いる。

(平成9年7月3日受付, 9月10日再受付)



桑村 有司 (正員)

昭56徳島大・工・電子卒。昭58同大大学院修士課程了。同年日本電気入社。昭62金沢大・工・電気・情報工学科勤務、現在、同大・工・電気・情報工学科講師。半導体レーザおよび半導体光変調器に関する研究に従事、博士(工学)。



山田 実 (正員)

昭46金沢大・工・電気卒。昭51東工大大学院博士課程了。同年金沢大・工・電気工学科勤務。現在、同大・工・電気・情報工学科教授。昭57～58米国ホルムデル・ベル研究所客員研究員。現在、半導体レーザおよび半導体光変調器に関する研究に従事。工博。米沢記念学術奨励賞(昭50)、本会論文賞(昭51)、本会業績賞(昭53)受賞。