

梅野正義 服部肇 三木七郎
(名古屋大学 工学部 電子工学科)

§1 まえがき

赤外線領域におけるレーザの進歩に伴ない、赤外線領域における分光光学や光通信にとって、高能率変調素子が大変重要となって来ている。従来赤外線領域における変調器としては、化合物結晶における電気光学効果⁽¹⁾や半導体中の free carrier による吸収⁽²⁾が用いられている。しかしながら、これらの効果を用いて能率よく大きな変調度を得ることは困難である。そこで筆者らは、ゲルマニウム(Ge)単結晶中の excess carrier (hole) の inter-valence band transition による強い吸収特性を利用した赤外線変調方式を提案し、試作した変調器の諸特性と高速応答化への考察を行った。⁽³⁾

§2 変調機構

Fig.1はGeの valence band の構造を示す。valence band はスピン軌道相互作用により三つの band からなっている。二つの band は $K=0$ で縮退しているけれども、他の部分では三つの band が互いに分離している。 V_1 -band は heavy mass band, V_2 -band は light mass band, V_3 -band は split-off band である。また Δ は spin-orbit coupling energy で Ge では 0.28 eV である。hole のエネルギーは 300°K では 0.026 eV で図中の点線の位置まで hole が存在している。この inter-valence band transition に対する吸収係数は Kane によって計算されている。⁽⁴⁾ その結果は

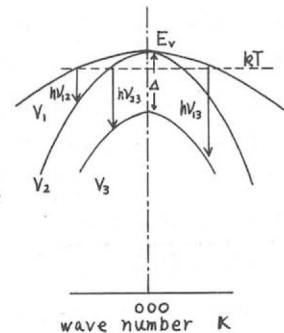


Fig.1 Inter-valence band transition in Ge.

$$\alpha_{ij} = \frac{ze^2 k^3 P W_{ij}}{c \hbar n N_v (E_i - E_j)} \left(e^{-\frac{E_i}{kT}} - e^{-\frac{E_j}{kT}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\left(\frac{d^2 E_i}{dk^2} - \frac{d^2 E_j}{dk^2} \right)$$

である。 α_{ij} は i -band から j -band への transition による吸収係数, P は hole density, e は hole の電荷, k は hole の波数, E_i, E_j はそれぞれ i -band および j -band の hole のエネルギー, c は光の速度, n は屈折率, N_v は hole の状態密度, W_{ij} は matrix element である。(1)式は吸収係数 α が hole density P に比例していることを示している。

一方赤外線領域で吸収を示すものとして, free carrier による吸収がある。しかし室温で赤外線領域において(1)式と比較すると inter-valence band transition による吸収の方が, free carrier による吸収より約3ケタ大きいことがわかる。したがって hole density が 10^{15} cm^{-3} 程度の場合には, 波長 $\lambda \sim 23 \mu\text{m}$ の赤外線領域において格子振動やバンド間遷移による吸収に比べて inter-valence band transition による吸収の方が支配的である。 n 型 Ge は hole density が少ないので inter-valence band transition による吸収が少なく, その上 free carrier (electron) による吸収も少ないので, 赤外線領域においてほとんど透明である。したがって, もし hole の excess carrier の密度が n 型 Ge の bulk の中で変化できれば, その中を通過する光の強度はそれによって変化する^{(4),(5)}ことになり上記赤外線領域での高能率変調が可能となる。

§3 実験方法および結果

n型Ge結晶中に hole の excess carrier を生成するためには PN 接合からの注入による方法を用いた。使用した n 型 Ge は室温で比抵抗 $\rho = 14 \Omega\text{-cm}$ 、大きさ $3 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ の直方体である。光の入出力面 ($3 \times 6 \text{ mm}^2$) は光学的に研摩が施されている。 $3 \times 6 \text{ mm}^2$ の一方の面には p 層を、他方面には Ohmic Contact と得ている。変調の実験には赤外線領域での代表的レーザである CO_2 レーザ (出力約 6 mW, 波長 $10.6 \mu\text{m}$) を用いて行った。変調器はレーザ共振器の外側に置く外部変調方式として用い、変調器中を透過した光も液体窒素温度の Ge: Au により検出した。その結果試料の PN 接合に順方向パルス電圧を印加し、その時の変調度とパルス電流の関係を示したのが Fig-2 である。尖頭電力 $1.0 \times 1.2 \text{ A}$ の弱いパルスを試料に加えることにより 55% の変調度と最高応答時間 $70 \mu\text{sec}$ が得られているけれど、変調度をさらに大きく取りたい場合には、注入電流をさらに増加させてもよいし、また光の透過する部分の結晶の厚さを増すことによっても可能である。実験結果からこの素子は高効率に動作しているが、応答速度はあまりよくない。しかしこれは次節で述べるような事を行うことにより応答速度を大きく改善することが可能であると考えられる。

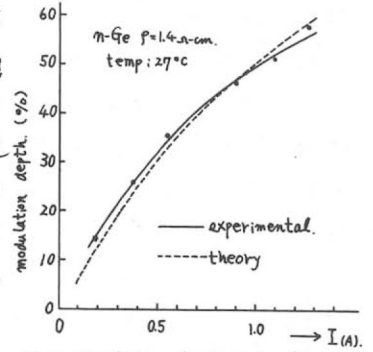


Fig-2. Modulation depth is function of injection current through modulator

§4 高速応答化

実験結果よりさらに高速応答化するためには次の三つのことが考えられる。

(1) inter-valence band transition の機構を利用した変調器は hole の life-time によって応答速度が決まる。したがって hole の life time を短くするために heavy dope として compensate した試料を用いれば $0.1 \mu\text{sec}$ 程度の応答速度が容易に得られるものと思われる。さらに変調器をレーザ共振器の内部に配置する内部変調方式として使用すれば、応答速度並びに変調感度が一層改善されることが期待できる。(2) n 型 Ge に p 層を拡散して PN 接合を作り、この接合面に平行あるいは垂直方向に赤外線と照射し、impatt diode のような Avalanche を利用した変調器が考えられる。(3) p 型 Ge に高電界を印加すると、hot electron 効果により carrier の分布関数を変化させることができ⁽⁶⁾、この機構を利用した変調方式も非常に高速応答が可能と思われる。

§5. むすび 変調器の母材として使用した n 型 Ge は赤外線領域の光に対しては殆んど透明であるが、そこに hole を注入すると inter-valence band transition による強い吸収特性を示し、深い変調を低い電圧で容易に得ることができ、その上室温で使用可能という特長を有している。またこの変調器を赤外光とブリュースタ角になるように配置することによって表面での反射による損失と除くことができ、赤外線を極めて有効に変調することができる。以上現在までのところ高効率ではあるが、応答速度はあまりよくない。しかし高速応答化の項で述べた事を実施すれば、大きな改善が期待できると考えられる。

文献

- (1) for example, T.E. Welsh: R.C.A. Rev. 27 323 (1966)
- (2) (a) A.F. Gibson: Proc. Phys. Soc. B. 66 588 (1953)
- (b) T.S. Moss: Infrared Physics 2 129 (1962)
- (c) P.W. Kruse et al.: Electronics March 177 (1961).
- (4) E.O. Kane: J. Phys. Chem. Solids 1 82 (1956).
- (5) A.F. Gibson et al.: Progress in Semiconductors, 9 181 (Heywood 1965).
- (6) E.G.S. Paige: Proc. I.C. physics of Semiconductors, KYOTO, 1966. XI.

- (3) (a) 本: 稲野 服部: 昭44年電気学会春期大会, JA-E-7.
- (b) 本: 稲野 服部: 昭45年電気学会大会, 1525
- (c) 稲野 服部: 本: 昭45年応用物理学会, 1P-E-3.
- (d) 服部: 稲野: 本: 電子通信 理工研資料, AE70-1.