

UDC 537.311.33
669.871.5'872'75.018.9Ga_xIn_{1-x}Sbの電子遷移効果特性High Field Transport Properties of Ga_xIn_{1-x}Sb

堺 和夫*・安達 芳夫*・生駒 俊明*

Kazuo SAKAI, Yoshio ADACHI and Toshiaki IKOMA

1. はじめに

電子遷移効果を用いた機能デバイスは、数10 psecの速い応答速度をもち、種々の機能を簡単な構造で發揮できることから、パルス中継器或いは論理演算用デバイスとして研究されてきた。現在材料としてはひ化ガリウム(GaAs)が専ら用いられているが、GaAsは電子遷移効果の閾値電界が約3.2KV/cmと限定され、論理演算用としては、消費電力が大きい。その為、論理演算デバイス用材料として、閾値電界が小さく、速度-電界特性のpeak-to-valley比の大きな電子遷移効果材料が求められている。Ⅲ-V族化合物半導体の中で、これに適した材料を探すと二元系では該当するものはなく、三元系のGa_xIn_{1-x}Sbが材料として第一の候補と考えられる。しかし速度-電界特性等の理論的計算については、Hilsunら⁵⁾の報告があるだけであり、それもx=0.8の組成での3準位モデルを仮定した計算結果である。従って、どのような組成にした時に、速度-電界特性がデジタル素子にとって望ましいものになるかなどの事はわかっていない。

ここでは、Ga_xIn_{1-x}Sbの速度-電界特性をモンテカルロ法⁶⁾により計算した結果について述べる。デジタル素子に用いた時の最適組成について検討し、又電子遷移効果特性と材料定数との関連についても述べる。

2. 速度-電界特性

Γ谷とL谷の2つの谷の電子遷移を考え(2準位モデル)、X谷への遷移は無視した。谷間散乱の結合係数は、 $D_{rL} = 3 \times 10^8$ eV/cm, $D_{LL} = 1 \times 10^8$ eV/cmと仮定した。Γ谷の底の有効質量については実験値⁷⁾を用い、又L谷の有効質量は0.2m。(m₀:自由電子の質量)とした。その他の材料定数については、GaSbとInSbにおける値より、組成比xに応じて比例配分した値を用いた。考慮した散乱機構は、極性光学散乱、音響散乱、谷間散乱(Γ-L谷間, L谷相互間)、イオン化不純物散乱である。

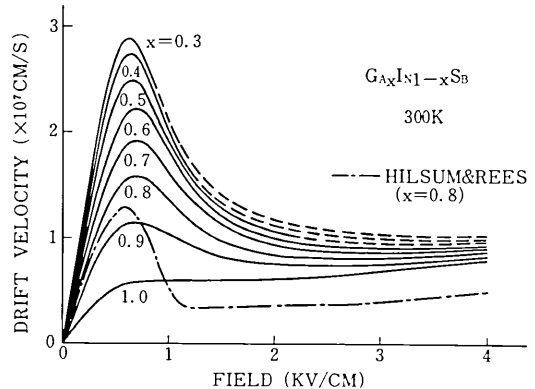


図1 Ga_xIn_{1-x}Sbの電子ドリフト速度-電界特性
 $D_{rL} = 3 \times 10^8$ eV/cm, $D_{LL} = 1 \times 10^8$ eV/cm
鎖線は3準位モデルによる計算結果⁵⁾(但し,
 $D_{rL} = 1 \times 10^8$ eV/cm, $D_{rx} = 1 \times 10^8$ eV/cm)

組成比xを0.3から1.0まで変えた時の速度-電界特性の変化を図1に示す。温度は300Kとし、イオン化不純物散乱は考慮していない(この場合の結果は、イオン化不純物濃度が 10^{15} cm⁻³以下のものに対してあてはまると考えられる)。Γ谷の電子平均エネルギーがバンド・ギャップより大きくなる電界では、破線で示してある。得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) $x \leq 0.9$ で速度-電界特性に負特性が生じる。閾値電界は、 $x = 0.9$ で700V/cm, $x = 0.3$ で600V/cmであり、xの減少と共に減少する。
- 2) peak-to-valley比はxの減少と共に増大し、 $x = 0.9$ で1.5, $x = 0.3$ で2.8である。
- 3) xが減少するとΓ谷の電子平均エネルギーは増大し、又バンド・ギャップは小さくなるので、xの減少と共に降服電界が小さくなる事が予測される。Γ谷の電子平均エネルギーがバンド・ギャップと等しくなる電界を降服電界と仮定すると、図1の破線の部分ではなだれ降服が起る。
- 4) $x = 1.0$ に近い組成では ΔE_{rL} (Γ谷とL谷のエネ

* 東京大学生産技術研究所 第3部

研究速報

ルギー差)が小さいので、低電界でL谷へ遷移する電子が多くなり、 $x=1.0(\text{GaSb})$ では50%以上の電子が低電界でL谷へ遷移している。

5) この為、 $x=1.0$ では速度-電界特性に負特性が見られず、又低電界移動度も x が1.0に近づくにつれ、急激に減少する。

ところで、 $\Delta E_{\Gamma-L}$ は x の減少と共に増加する。従って Γ 谷からL谷へ遷移するには、 x が小さい程大きなエネルギーを必要とする。しかし閾値電界は x が小さい程低くなっている。これは、 x が小さくなると Γ 谷の有効質量 m^*_Γ が小さくなる為に、電界が低くても Γ 谷の電子エネルギーが大きくなり、その結果閾値電界は低くなる為と考えられる。即ち閾値電界の低い材料としては、 m^*_Γ の小さいものを選ぶことが肝要である。

温度を300Kから400Kまで上げた時の速度-電界特性の変化を、 $x=0.5, 0.8$ について図2に示す。イオン化不純物散乱は考えていない。温度上昇と共に速度は減少し、peak-to-valley比も小さくなる。即ち、 $x=0.5$ では300Kで2.7が400Kで2.3に、又 $x=0.3$ では300Kで2.3が400Kで1.5になる。又閾値電界は、300Kから400Kまで温度が上がると、約10%増加する。

次にイオン化不純物散乱による影響を考える。イオン化不純物濃度 N_i を 10^{17}cm^{-3} とした時の、 $x=0.9$ に対する速度-電界特性を図3に示す。温度は300Kであり、又電子濃度 n_0 に等しいと仮定した($n_0 < N_i$ の場合には、電子による遮蔽効果が小さくなる為、更に電子速度が小さくなる)。図3には、イオン化不純物散乱を考えない場合についても示した。不純物散乱の導入により、閾値電界付近の速度が大きく減少する $x=0.5$ の場合、peak-to-valley比は2.7から2.0へ減少し、閾値電界は650V/cmから800V/cmへ増加する。又 $x=0.9$ の場合、負特性はほぼ消滅する。

一方、今までに報告されている実験結果¹⁻⁴⁾を見てみると、閾値電界については各測定値ともばらつきはあるが、400~900V/cmの範囲に入っている。実験値については、不純物や結晶欠陥による散乱を考慮せねばならないし、又オーム性接触が良くない為に、その部分での電圧降下がある事も考えられる。こうした点を考えあわせると、閾値電界の実験値は良い一致を示していると言える。又ドメイン速度の計算値は極小値の速度($\sim 1 \times 10^7 \text{cm/sec}$)にはほぼ等しくなる。一方実験結果の方では、 $6.5 \times 10^6 \text{cm/sec}$ ¹⁾或は $1.1 \times 10^7 \text{cm/sec}$ ²⁾といった値が報告されており、大体計算値と一致している。

3. デジタル素子への応用

論理演算用デジタル素子に $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ を用いるには、速度-電界特性の上からは x が小さいものの方が望ましい。しかし、降服電界についても考えあわせると、 $0.6 \leq x \leq 0.8$ の組成のものがデジタル素子に適すると考えられる。 GaAs と $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ で、同一寸法のデジタル素子の特性量³⁾を検討すると、 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ では、 GaAs の場合に比べて、消費電力が大幅に減り1/6~1/8になる事、電界トリガ性能指数については、閾値電界が低い為に約1/3になる事、出力パルス電流は GaAs と同程度ないし約半分と組成により変る事、又最小トリガ電界、電界変化率、出力パルス幅等については、ほとんど変わりが無い事がわかった。

温度を300Kから400Kに上昇させた場合には、出力パルス電流は減少するが、そのほかはほとんど変化が見られず、400Kに温度上昇しても十分動作する事がわかった。

又イオン不純物濃度 N_i が大きい場合には、不純物散乱により速度-電界特性が変わるが、 N_i の増加に伴う電子濃度 n_0 の増加の影響が大きい。即ち n_0 の増加に

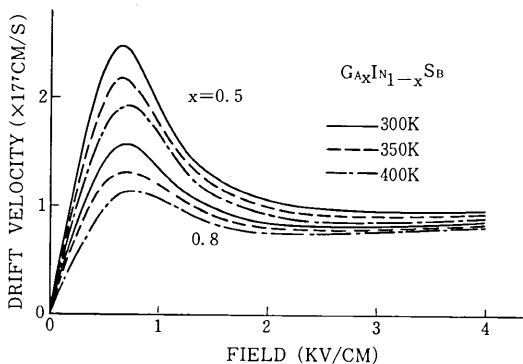


図2 速度-電界特性の温度依存性

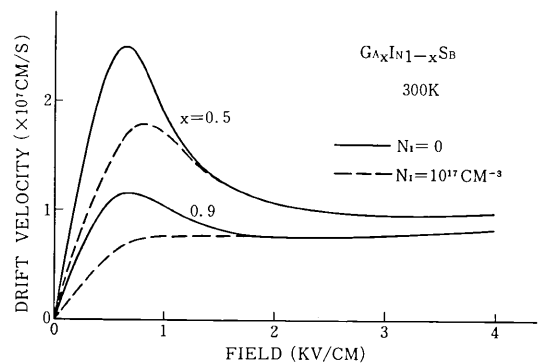


図3 イオン化不純物散乱による速度-電界特性の変化

研究速報
 より、ドメインの最大電界及び最小トリガ電界が増加するからである。これを考えると、 n_0 の最大限度は 10^{16}cm^{-3} と見積られる。一方、 $n_0 < N_T$ の場合には電子による遮蔽効果が小さくなり、 $n_0 = N_T$ の場合よりも peak-to-valley比が小さくなる事を考えると、 N_T の最大限度もほぼ 10^{16}cm^{-3} と見積られる。

次に高電界ドメイン形成に要する時間について検討する。一例として、 $x=0.5$ の組成で、電極間距離 $50 \mu\text{m}$ 、 $n_0=10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、 $N_T=0$ の素子に、300Kで閾値電界の1.2倍のトリガ電界を印加した時の、ドメイン形成の遅延時間は50psec以下と予測される。従って、GaAsの場合の遅延時間(～50psec)と同程度、或はより高速のパルス応答が期待される。

以上述べたように、 $0.6 \leq x \leq 0.8$ の組成の $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ を用いる事により、GaAsよりも大幅に消費電力の小さいデジタル素子を実現できる可能性のある事がわかった。

謝 辞

有益な討論をして頂いた東京大学柳井久義教授、電

子技術総合研究所駒宮安男部長、片岡照栄室長に感謝する。本研究は一部科学技術庁特別研究促進調整費の援助を受け、一部本所選定研究費(昭和49年度)の援助を受けた。関係各位に感謝する

(1975年7月1日 受理)

参考文献

- 1) J. C. McGroddy et al.: Solid State Commun. 7, 901 (1969)
- 2) A. Hojo et al.: Proc. 5th Conf. on Solid State Devices (Tokyo, 1973) p. 226.
- 3) J. Mitchel et al.: Proc. 5th Symp. on GaAs and Related Compounds
- 4) H. Miki et al.: Proc. 5th Symp. on GaAs and Related Compounds
- 5) C. Hilsun et al.: Electron. Lett 6, 277 (1970)
- 6) W. Fawcett et al.: J. Phys. Chem. Solids 31, 1963 (1970)
- 7) M. J. Aubin et al.: Can. J. Phys. 47, 631 (1969)
- 8) 菅田ら: 通信学会論文誌 (C), 55-C, 437 (1972)
- 9) K. Sakai et al.: Electron. Lett. 10, 402 (1974)



次 号 予 告 (10月号)

研究解説

サイリスタ回路の解析.....原 島 文 雄

研究速報

画像情報の抽出処理による交通流計測.....
 { 高 羽 禎 雄
 谷 口 忠 勝
 兼 子 隆

多チャンネルA E 標定システムの一方式.....
 { 山 口 楠 雄
 阿 藤 壽 孝

サイリスタ負荷の無効電力の検出とその制御.....
 { 坪 井 邦 夫
 原 島 文 雄

M系列変調相関法による遮音.....橋 秀 樹

円筒シェルの非線形振動.....
 { 皆 川 洋 一
 半 谷 裕 彦

研究室紹介

浜田研究室.....浜 田 喬