

## InAlAs/InGaAs/InAlAsの高電界輸送特性

坂井 英幸 相島 亜洲雄

### High Field Transport Properties in InAlAs/InGaAs/InAlAs

Sakai Hideyuki and Aishima Asuo

#### ABSTRACT

High field transport properties in InAlAs-InGaAs-InAlAs double hetero structures are clarified. First, wave functions in InGaAs layers are calculated selfconsistently. Then, various scattering rates such as acoustic phonon, polaroptical phonon, inter-valley phonon, impurity, alloy scatterings are calculated using electron wave functions. Real space ensemble Monte Carlo simulations are performed to clarify the velocity-field characteristics and diffusion constants. Such results are useful for designing the InGaAs HEMT.

Keywords : InGaAs, Highfield, Transport

#### 1. はじめに

最近の微細加工技術は、原子レベルでの、精密制御を可能にした。これらによってHEMTなどの製造が可能になった。とくに最近ではHEMTが、低雑音、高利得性能を有するためマイクロ波、ミリ波領域で利用されるようになった。

HEMTは、FETの一種で、これとは別のFETの一つであるMESFETの場合、半絶縁性基板に直接活性層（キャリアが通る層）を形成するのに対し、n-InAlAs/InGaAsのHEMTの場合、キャリア層が形成されるのが、高純度InGaAs中のために、きわめて高い移動度を得られるものである。

通常ヘテロ接合を形成すると、n-InAlAsとInGaAsとの電子親和力の差によって、InAlAs層内のドナーからInGaAs側へ電子が供給され2次元電子ガス（キャリア）を形成する。また、InAlAs層のみにドナーがドーピングされているため、ドナー原子とInGaAs層の2次元電子が空間的に分離され、不純物散乱の影響が小さくなる。このキャリア層につかわれているInGaAsは、III-V族化合物半導体で、合金散乱を含んだ混晶半導体材料の一つである。この半導体材料は、電子の有効質量が軽いため電子速度が速く、HEMTに適した材料である。本文では、このInGaAsをキャリア層としたInAlAs/InGaAs/InAlAsのHEMTの数値解析を行なう。

ダブルヘテロ構造をもった量子井戸は、数千Åの幅のとき、電子とフォノンは、3次元方向へ自由に運動できるため、3次元の電子と3次元のフォノンとなる。ここで、井戸の幅を数百Åのオーダーまで薄くすると、電子は2次元方向への運動のみが許される2次元電子になり、3次元電子-3次元フォノンの場合と異なった性質を有する。さらに、井戸の幅を数十Åのオーダーにすると、フォノンが井戸内に閉じこめられるため、2次元電子-2次元フォノンになる。

ここでの解析では、層の幅を300 Åとして、2次元電子-3次元フォノンの解析を行い、電子のドリフト速度-電界特性、拡散係数-電界特性を求める。そして3次元bulkの結果と比較する。

## 2. 解析の手順

まず解析に用いたダブルヘテロ構造のモデルを設定し、その解析モデルから井戸内に閉じこめられた電子の波動関数と、電子の固有エネルギーを求める。その次に波動関数から、電子の散乱確率-電子エネルギー依存性を求め、その散乱確率を用いてモンテカルロ法で、電子ドリフト速度と、拡散係数の電界依存性を求める。

## 3. 解析モデル

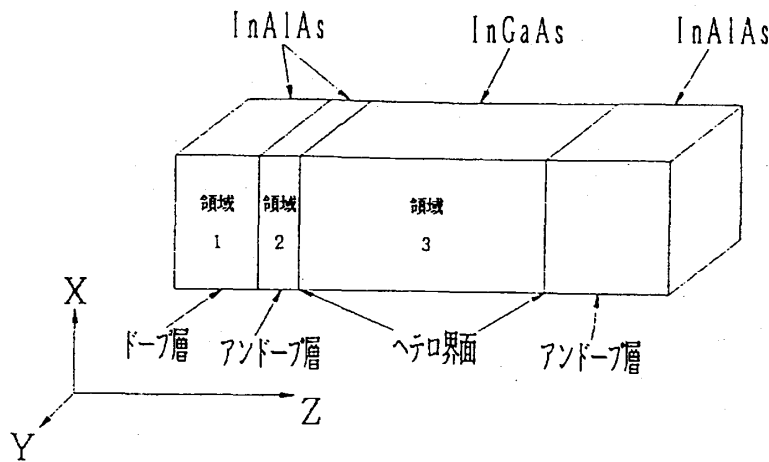


Fig.1 Schematic representation of InGaAs quantum well.

解析に用いたモデルを、図1に示す。領域1、2は、SiをドープしたInAlAs層、ドープしないスペーサー層とし、領域3を、純度の高いInGaAs層としている。次に、解析モデルの設定値を示す。

領域1のホール密度  $5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、幅を100 Å、領域2の幅を50 Åとしている。またシート密度を  $5.0 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 、領域3の幅を300 Åとしている。

## 4. ポテンシャルの構造

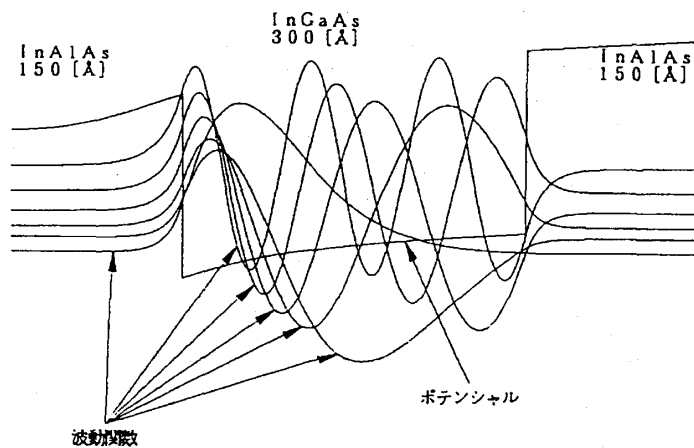


Fig.2 Potential profile and wave functions.

InGaAsをInAlAsで挟んだ量子井戸構造では、InGaAs中の電子はヘテロ平面方向で2次元的な自由粒子として振る舞い、z方向への運動は、電子波の干渉作用で定在波を形成する。

図2に電子のポテンシャルと波動関数を示す。この結果はシュレディンガーの波動方程式とポアソン方程式を連立させ、これをセルフコンシステントに解く事によって得られた。

離散化した電子のサブバンド構造、波動関数の様子が良くわかる。

## 5. 電子の各散乱確率

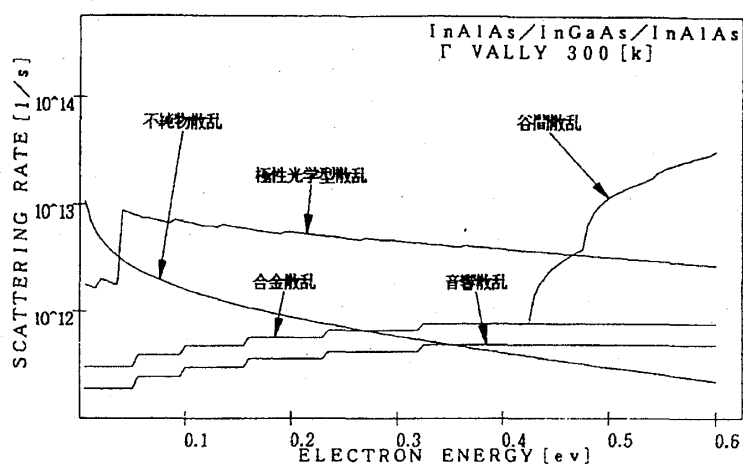


Fig.3 Scattering rates as a function of electron energy.

図3は図2に示した波動関数と電子のエネルギー固有値を用いて計算した極性光学型散乱、音響フォノン散乱、不純物散乱、合金散乱、L谷、X谷への谷間散乱の散乱率を示す。

不純物散乱は、ごく低いエネルギーの範囲では極性光学型散乱よりも大きいですが、この散乱の散乱角度が小さいため、散乱が起こっても進行方向が大きく変わらず、この散乱の寄与は小さい。従って谷間散乱の発生が生ずるエネルギーより小さなエネルギーでは極性光学型散乱が支配的である。

### 5. 1. L谷、X谷での散乱角度の決定

この解析では、InAlAs、InGaAs層とのポテンシャルギャップを0.7eVとしているため、L谷、X谷での散乱確率を3次元電子としながらも、電子の運動方向は、ヘテロ接合平面のみとして、その方向に垂直方向への運動を考えないこととした。極性光学型散乱と不純物散乱の散乱角度は、次に示す手順を使って決定した。散乱前後の波数ベクトル $k$ 、 $k'$ に対応するエネルギーを $E$ 、 $E'$ とすると、 $Q$ ならびに散乱角度 $\theta$ から、

$$\lambda(E) \rightarrow \lambda'(Q, \theta) \quad (1)$$

散乱確率—エネルギー依存性から、散乱確率— $(Q, \theta)$ 依存性に変換し、2式のようにすると、

$$\lambda''(Q) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \lambda'(Q, \theta) d\theta \quad (2)$$

$\lambda(Q)$  散乱確率— $Q$ 依存性を決定できる。

次に電子エネルギー $E$ 、 $E'$ から、 $Q_{\min} = |k' - k|$ 、 $Q_{\max} = |k' + k|$ を求め、一様乱数 $X_0$ 、 $X_1$ を生成し、乱数から式3をみたす $Q$ の値が現れるまで繰り返す。 $\lambda_{\max}$ は、 $Q_{\min}$ から $Q_{\max}$ の範囲のなかでもっとも大きい $\lambda$ の値である。

$$\lambda(Q_{\min} + X_0 * Q_{\max}) < \lambda_{\max} * X_1 \quad (3)$$

得られた $Q$ を用いて式4から散乱角度 $\theta$ を求める。

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{|k'|^2 + |k|^2 - Q^2}{2|k'| |k|} \right\} \quad (4)$$

残りの音響フォノン散乱、合金散乱谷間散乱の散乱角度は、

$$\theta = 2\pi X \quad (X \text{は、一様乱数}) \text{とした。}$$

6. 3次元電子と、2次元電子のドリフト速度電界特性

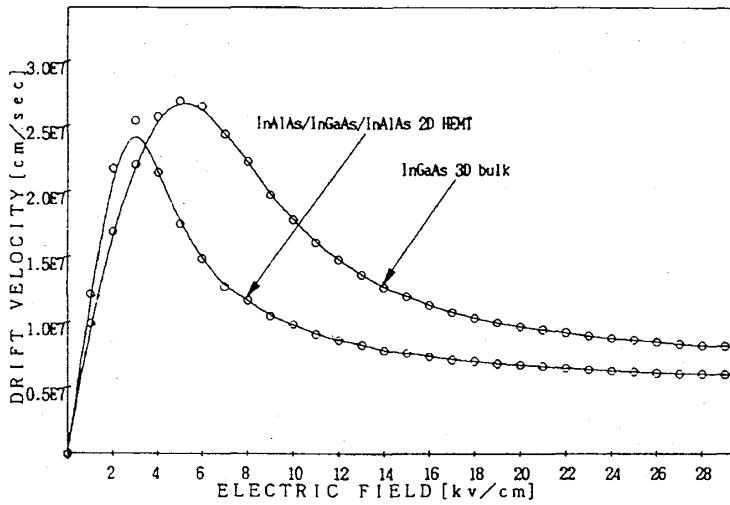


Fig.4 Drift velocity vs. electric field.

図4は、電子群に電界印加後16p秒経過したのちの、InGaAsの、3次元電子-3次元フォノンの相互作用を考慮した速度電界特性と、InAlAs/InGaAs/InAlAsの2次元電子-3次元フォノンの相互作用を考慮した、電子ドリフト速度-電界特性を、重ね合わせた図である。3次元電子のドリフト速度-電界特性は、印加電界50.kv/cmで最大になり、電界が大きくなるにしたがいドリフト速度が小さくなる。また、2次元電子は、3.0kv/cmの電界でドリフト速度が最大になり、電界が増加するにしたがって減少している。

7. 拡散係数

図5、6は、InGaAsの3次元電子と、InAlAs/InGaAs/InAlAsの、2次元電子の電界方向拡散係数 $D_{//}$ と電界に、垂直方向拡散係数 $D_{\perp}$ を示した図である。ともに電界印加後16p秒経過したのちの、拡散係数を表している。図5の3次元電子では、6.kv/cmで最も大きな異方性が現れ、図6の、2次元電子では、低電界下のとき、3次元電子にくらべて拡散係数が小さな値を有している。また、25kv/cm以上のとき3次元電子と2次元電子との差があまりみられない。

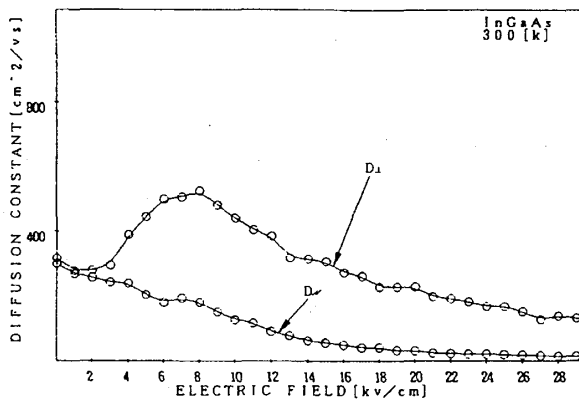


Fig.5 Diffusion constant vs. electric field.

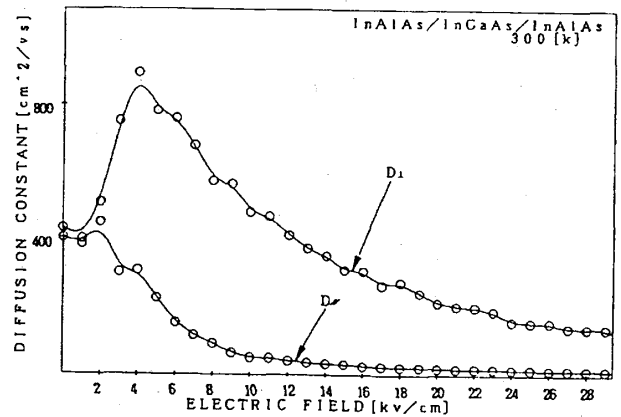


Fig.6 Diffusion constant vs. electric field.

8. 電子の分布図

図7、8は、3.0、6.0、9.0、12.0.kv/cmの電界を印加した後、16.0p秒経過後の3次元電子と2次元電子を平面に描き直した図である。3次元電子と2次元電子ともに3.0.kv/cmの低電界では、球状であり異

方性が見られないが、12.0kv/cmの高電界下では、凸レンズ状の形をして、異方性がよくあらわれている。

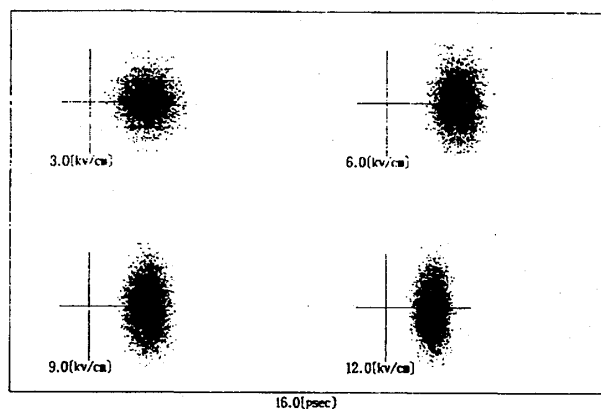


Fig. 7 Two dimensional locations of 10000 electrons.

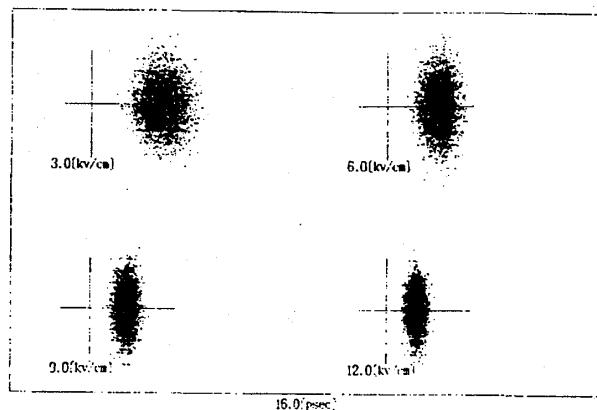


Fig. 8 Two dimensional locations of 10000 electrons.

## ま と め

InAlAs/InGaAs/InAlAs のダブルヘテロ構造のアンサンブルモンテカルロシミュレーションを行い電子のドリフト速度-電界特性、拡散係数-電界特性を求めた。その結果次のようなことがわかった。

- (1) 拡散係数-電界特性は、3次元電子の bulk と2次元電子のHEMTは25kv/cmの高電界のときあまり差がみられないが低電界では、電界に垂直方向拡散係数に1.7倍近くの差が現れる。
- (2) 電子ドリフト速度-電界特性では、2次元電子は、3次元電子より低い電界の2 kv/cmで最大のドリフト速度が得られた。

今後の課題としては、図3の各散乱確率-電子エネルギー依存性にみられるように、LOフォノン散乱の影響が最も大きいと考えられるため、2次元電子と2次元フォノンを考えに入れる必要がある。

## References

1. K.S.Yoon,G.B.Stringfellow, and R.J.Huber J. Appl.Phys 62(5),1 september 1987
2. Ryoji Sakamoto,Kiyoyasu Akai,and Masataka Inoue IEEE Transactions on electron devices. vol 36, No 10,october 1989
3. J.R.Hauser,M.A.Littlejohn,and T.H.Glisson:Appl.Phys.Lett.Vol.28(1976)458
4. N Sawaki J.Phys.C:Solid State Phys.19(1986)4965-4975.Printed in Great Britain