

Title	半導体ヘテロ界面にある2次元電子の利用
Author(s)	稲山, 実; 井上, 正崇
Citation	大阪大学低温センターだより. 41 P.9-P.12
Issue Date	1983-01
Text Version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11094/6603">http://hdl.handle.net/11094/6603</a>
DOI	
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 半導体ヘテロ界面にある2次元電子の利用

工学部 井上正崇, 稲山実 (吹田 4567)  
犬石嘉雄 (吹田 4566)

## はじめに

GaAs と  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  のヘテロ接合を作ると、両者の電子親和力の差の作用から GaAs 側界面に2次元電子ガス (Two Dimensional Electron Gas, 略して 2DEG) が形成される。図1に示す通り、2DEG は AlGaAs 中のドナー不純物から空間的に離れて存在するため、高電子濃度でありながらイオン化不純物散乱の影響を受けにくい。従って、界面に平行な方向に走行する 2DEG の移動度は非常に大きく、最近  $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (4.2 K において) に達した。この 2DEG について物理的に興味を持たれると同時に、応用面からも次世代の超高速計算機を目指して 2DEG デバイスの研究が世界的に始められている。

1980年富士通において、この 2DEG が世界で最初にトランジスタ (高電子移動度トランジスタ HEMT) に応用され、スイッチング速度として半導体素子でもっとも速い 12.8 psec が記録された。この結果は、1979年に IBM から発表されたジョゼフソン素子の 13 psec<sup>(1)</sup> とほぼ等しいことから、スーパーコンピュータを目指す分野に衝撃を与えた。応用を考えると、デバイスの高速性と同時に信頼性、消費電力および集積化の観点からも研究されなければならないことは言うまでもない。

ジョゼフソン素子の極低温動作は勿論のこと、HEMT も低温において変調ドーピング効果の特徴が生かされる点にも注目しなければならない。

GaAs/ $n\text{-AlGaAs}$  界面の 2DEG は、基本的には Si MOS デバイス中の電子ガスと同様の物性を示すと考えられるが、Si MOS と比較して注目される特徴は以下の通りである。(1) 低温において移動度が Si の  $10^2 \sim 10^3$  倍である。(2) Si/SiO<sub>2</sub> に比較して GaAs/AlGaAs 界面での格子整合が良く理想的な 2次元状態を形成できる。またポテンシャル障壁も比較的低い。(3) 超格子構造を作ることができる。

本稿では、種々の超高速デバイスに GaAs/AlGaAs 界面の 2DEG を応用する時間問題となる輸送現象について、その一端を紹介する。

## ヘテロ界面にある電子ガス

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面に形成された三角型ポテンシャル障壁の高さは、通常の電子のエネ

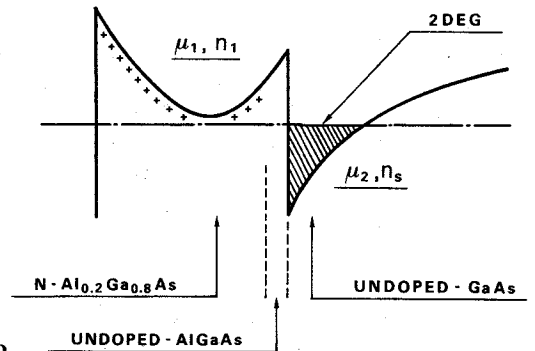


図1. ヘテロ接合界面の2次元電子ガス。  
 $\mu$  は移動度、 $n$  は電子濃度。

ルギーより高く電子は界面に閉じ込められる。このとき形成される量子準位(サブバンド構造)は、三角ポテンシャルの傾きに依存するため  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  の組成およびドーピング量によって決定される。2次元電子濃度が高くなると、電子は基底サブバンドだけでなく第2サブバンドにも分布するようになる。2次元電子系で特徴的な散乱機構として、このサブバンド間の散乱がある。

2次元電子濃度の異なる2種類の  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  ヘテロ接合の比較において、このサブバンド間散

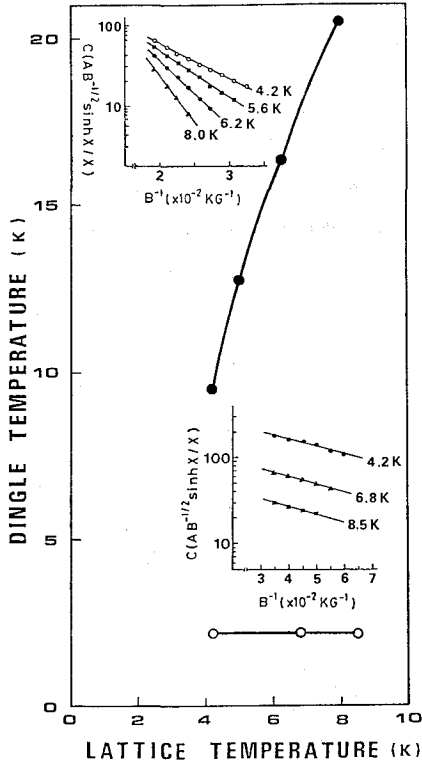


図2. 電子濃度の異なる  $\text{GaAs}/\text{n-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  ヘテロ接合界面に形成された2DEGのディンクル温度を格子温度の関数として示す。

○印:  $n_s = 4.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  
●印:  $n_s = 1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . 挿入図は SdH 振動の振幅の関数と磁場の強さの逆数  $1/B$  の関係を示している。これらの直線の傾きからディンクル温度が求まる。

では、この様にサブバンドの電子分布とサブバンド間の電子散乱が輸送現象に大きな影響を及ぼすことが分る。

### ホットエレクトロン効果

デバイスの動作状態では、2DEG が電界で加熱されるためホットエレクトロン効果が重要である。変調ドーピング法による不純物散乱確率低減の効果も、電界が高くなると小さくなると思われる。図3に、分離層  $\text{AlGaAs}$  の厚さの異なる二つの試料について、移動度の電界依存性を示す。2DEG の移

乱の影響を顕著に見ることができる。界面電子の2次元性を確かめる方法として、磁気抵抗の量子振動、即ち Shubnikov-de Haas (略して SdH) 効果の測定がある。界面に垂直に磁場  $B$  を印加すると、界面内での電子のサイクロトロン運動が可能のため  $1/B$  の同期で振動が現れる。一方、界面に平行な磁場中では振動が見られないことから、界面に垂直方向の運動の自由度がないことが分る。この SdH 振動の振幅の温度依存性からディンクル温度(電子の散乱周波数に比例した量)を求めた結果が図2である。

2次元電子濃度が低い試料(○印)においては、ディンクル温度(電子散乱確率)が低い。このことは2DEGの移動度が、 $\mu = 5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  と高い点とも良く対応している。この試料において、2DEGの電子温度は  $1.5 \text{ V/cm}$  の低電界で  $10 \text{ K}$  (格子温度  $4.2 \text{ K}$ ) 以上にも上昇することが実験から明らかとなった。一方、高電子濃度の試料(●印)ではディンクル温度が高く、且つ温度によって変化している。移動度は、 $\mu = 9.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  と低くサブバンド間散乱の影響が大きいことを示している。

サブバンド間散乱の効果を SdH 振動のフーリエ解析から直接見ることができた。<sup>(2)</sup> SdH 振動の電界依存性を高電子濃度ヘテロ接合において測定したところ、第2サブバンドに分布する電子の SdH 信号が電界が高くなると顕著になった。2次元電子系

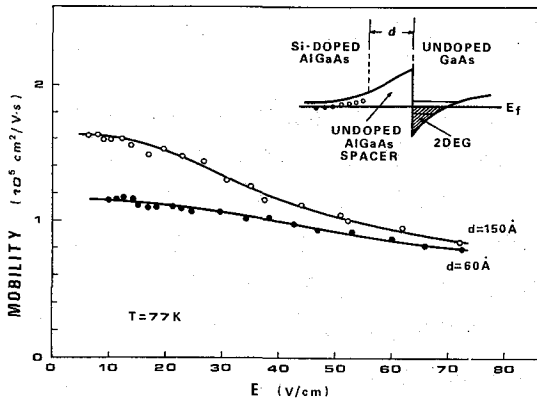


図3. GaAs/n-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Asにおける移動度の電界依存性。分離層の厚さ  $d$  が異なる2つの試料の比較を示している。

考えられる。この様な条件では、電子は電界増大とともに高エネルギー準位へ移り、ポテンシャル障壁の上部に達するにつれて次第に2次元性が薄れる。移動度の電界依存性に見られた急峻な変化は、散乱機構の変化と同時に2次元性から3次元的な物性に移ることを示していると考えている。<sup>(3)</sup>

更に高電界になると、果して2DEGの分布がどの様に変化するだろうか。このことに注目して実空間電子遷移負性抵抗という現象があり、Illinois大学のHessにより最初に報告された。先日、豊中キャンパスにおいて開かれたBardeen先生の講演会でもこの効果が紹介されたが、実験を進めるうち、この提案に対して疑問が生じてきたので少し触れてみたい。

表1はGaAs/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Asヘテロ接合の2次元電子濃度  $n_{2DEG}$  (4.2 KにおけるSdH振動測定から求めたもの) とパルス電界印加ホール効果から測定した電子濃度  $\bar{n}$  を示している。 $\bar{n}$  は  $n_{2DEG}$  とAl<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As中の電子濃度を平均した値を示している。このヘテロ接合にパルス高電界を印加して、その都度SdH振動を観測する一連の実験の流れを1~7の番号で示している。これによると、電界  $E = 990$  V/cmにおいて、 $n_{2DEG}$  が  $6.0 \times 10^{11}$  cm<sup>-2</sup> から  $7.5 \times 10^{11}$  cm<sup>-2</sup> に増大していることが分る。一方  $\bar{n}$  は印加電界の上昇に伴って単調に増加している。この結果は電界とともにAlGaAs中の電子濃度が増加することを示している。AlGaAs禁止帯には、混晶への高濃度Siドーピングの影響で多くのトラップが存在する。光照射や高電界印加により、これらの準位から電子が伝導帯に励起される。先に述べたHessの提案によると、GaAs中のホットエレクトロンがAlGaAs層に遷移することによって負性抵抗がでると期待されるが、本実験結果が示す電子の流れは逆の方向

動度は、低電界で分離層の厚さに大きく依存している。しかしながら、電界が高くなると両試料の差はほとんどなくなることが分る。このことはイオン化不純物散乱からフォノン散乱へ、主とする散乱機構が変化していることを示している。4.2 Kにおいては、約300 V/cmにおいてイオン化不純物散乱の影響が小さくなった。これらの実験事実は、理論的にもホットエレクトロン効果から説明できる。<sup>(3)</sup>

4.2 Kにおいては、移動度が  $10^6$  cm<sup>2</sup>/V·sにも達するため、わずか10 V/cmにおいても電子分布は高エネルギー側に大きく裾をひくと

表1. GaAs/n-Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As界面の2次元電子濃度  $n_{2DEG}$  ( $= n_s$ ) とパルスホール効果から測定した平均電子濃度  $\bar{n}$ 。

1~7の順に電界を変化して、その都度測定した結果を示している。

	EXPERIMENT	$n_{2DEG}$ (cm <sup>-2</sup> )	$\bar{n}$ (cm <sup>-2</sup> )
1	INITIAL COND.	$6.0 \times 10^{11}$	$1.6 \times 10^{12}$
2	HALL EFFECT $E = 270$ V/cm		$2.0 \times 10^{12}$
3	SdH OSC.	$6.0 \times 10^{11}$	
4	HALL EFFECT $E = 990$ V/cm		$3.0 \times 10^{12}$
5	SdH OSC.	$7.5 \times 10^{11}$	
6	HALL EFFECT $E = 1570$ V/cm		$4.0 \times 10^{12}$
7	SdH OSC.	$7.5 \times 10^{11}$	

(AlGaAs → GaAs)を示している。今後、超格子構造において電子分布の変化を測定することにより、新しい提案の検証を行なうことができる。

分子線エピタキシー技術の進歩に伴って、今後ヘテロ接合および超格子構造デバイスが急速に進歩すると考えられる。ここで紹介した結果はヘテロ接合界面物性の一端であり、現在世界各地で基礎から応用まで広く研究が進んでいる。GaAs/n-AlGaAsヘテロ接合デバイスの特性は、77Kにおいてジョゼフソン素子のスイッチング速度と同等であることから、次世代の集積回路、さらに超高速計算機への応用上期待が大きい。一方ジョゼフソン計算機が実現した場合にも、実際の運用に際して外部回路とのインピーダンス整合が必要となることから、中間温度(77K近傍)領域で高速性を生かした整合部品としてGaAs/n-AlGaAsヘテロ接合デバイスは重要な意味を持っている。

最後に、本研究に用いた試料は富士通研究所 冷水佐寿代らによって分子線エピタキシー法で成長されたことを記し、ここに謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 最近、日本電気から10.8 psec という実験結果が報告されたが、消費電力が極度に大きく(16  $\mu$ W), IBMの特性を越えたとは言にくい。
- 2) M. Inoue *et al.*, *Proc. 16th Int. Conf. on Phys. of Semiconductors*, 1982, Montpellier, 印刷中。
- 3) M. Inoue *et al.*, *Proc. Int. Conf. on Solid State Devices*, 1982, Tokyo, Jpn. J. Appl. Phys. Suppl., 印刷中。