

サブバンド間遷移による負性抵抗ナノFET

超高周波発振素子を持つ化合物半導体ICの実現へ

私たちは、サブバンド間遷移を利用した負性抵抗電界効果トランジスタ (FET) を世界で初めて実現した。原子層レベルで平坦なナノ構造を作製し、サブバンド間における電子移動度の違いを利用すると負性抵抗が発現する。この素子は、三端子構造であるため集積化に有利であり、ゲート電極により負性抵抗を自由・自在に制御できる。また、その負性抵抗特性から、テラヘルツ帯 (100 GHz ~ 数 THz) での超高周波発振素子としての可能性がある。

InGaAs quantum-wire field-effect transistors (QWR-FETs) have been fabricated on (311)A InP V-groove substrates by hydrogen-assisted molecular beam epitaxy. Enhanced negative differential resistance (NDR) effects with a peak to valley ratio (PVR) as high as 13.3 have been observed at an onset voltage of 0.17 V in the QWR-FETs at 24 K. The NDR-FET is a velocity modulation transistor based on a subband transfer of electrons from the high mobility fundamental level to the low mobility higher subband levels. The NDR effects were observed up to 260 K as the In content was increased to 0.8. A unique feature of the QWR-FET is that NDR effects are controllable with the gate bias in a three-terminal configuration, and they are favorable for high speed and high frequency modules with reduced circuit complexity.

江崎博士のノーベル賞受賞の対象になった江崎ダイオードで知られる負性抵抗素子は、数100GHzの超高周波を発振できるため、今日でもテラヘルツ帯 (100 GHz ~ 10THz) における発振素子としての応用を目指し、高性能のガンダイオードや共鳴トンネルダイオードの開発が進められている。しかし、これまでの負性抵抗素子は2端子のダイオード構造が主であり、集積化に有利で特性を自由に制御できる3端子のものはほとんどなかった。今回、素子内の電子通路が原子レベルで平坦なナ

ノ細線構造を用いて、きわめて明瞭な負性抵抗を示す新しい現象に基づく速度変調型のナノFETの開発に成功した。この素子は、ナノ細線中のサブバンド間を電子が遷移する現象を利用した新しい負性抵抗FETで、しかも3端子構造であるため、ダイオードと違って負性抵抗を自由・自在に制御できる特徴を持っている。

図1は、この研究で用いたIn_{0.53}Ga_{0.47}As ナノ細線構造の断面透過電子顕微鏡写真である。図の中心部に見える黒い部分がナノ細線構造で、電流は紙面に垂

菅谷 武芳 Takeyoshi Sugaya
t.sugaya@aist.go.jp

光技術研究部門
光電子制御デバイスグループ 主任研究員

1994年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了。同年電子技術総合研究所電子デバイス部入所。分子線エピタキシーを用いた化合物半導体量子ナノ構造の作製とデバイス応用の研究に従事する。2000~2001年のアリゾナ州立大学客員研究員を経て、現在に至る。

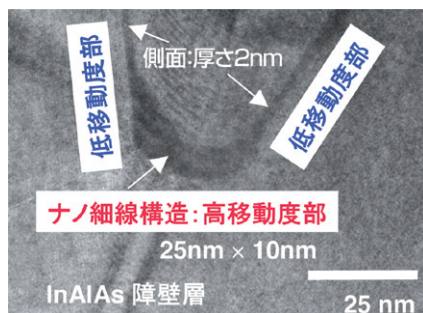
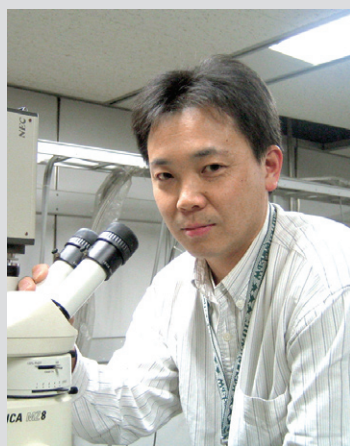


図1 ナノ細線構造の断面透過電子顕微鏡写真

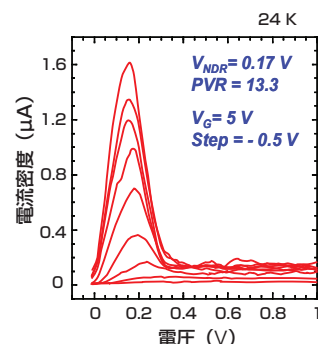


図2 量子ナノFETの電流-電圧特性
明瞭な負性抵抗が観察される。

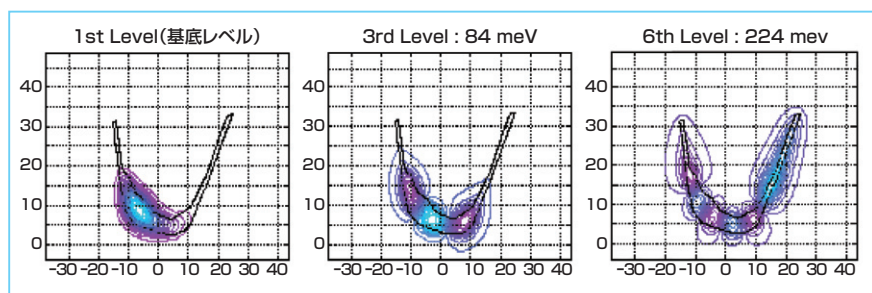


図3 ナノ細線構造における電子波導関数の分布
高次サブバンドになるほど電子移動度の低い側面部分に電子が分布する。

直の方向に沿ってナノ細線中を流れる。これまで、非常に細く小さなナノ細線構造を作製すると、その境界面での凹凸が電子の運動の妨げとなり、高品質で高移動度をもつナノ構造を作製できないという問題があったが、ここでは原子状水素やV族クラッキングソースを用いた独自の分子線エピタキシー技術を用いてこれを解決し、高品質なナノ細線構造の作製を可能にした。ナノ細線をチャンネルとするトランジスタ構造を作製したところ、図2のような低電圧 (0.17V)、高ピーク/バレイ比 (13.3) で顕著な負性抵抗を示す素子が得られた。

一般に知られている負性抵抗効果が発現する要因としては、加速された電子の低移動度障壁層への実空間遷移やガン効果がある。しかし、この素子では、負性抵抗の発生時にゲートリーク電流が認められないため障壁層への移動ではなく、発現電圧が低いためガン効果でも説明できない。また、その構造から共鳴トンネル効果によるものでもない。

この研究におけるInGaAsナノ細線構造の基底レベル、高次サブバンドレベルの電子分布を図3に示す。図の縦軸、横軸は図1の断面写真の空間座標に相当する。基底レベルの電子はナノ構造中の底に分布し、この部分は高品質であり電子移動度が高い。ドレイン電圧が低い場合、電子はエネルギー的

に安定なこの部分に分布している。一方、高次サブバンドになるほど、その電子分布はナノ構造の側面に主に分布しているのがわかる。側面の部分は2nmの量子井戸から成っており、その厚さが非常に薄いため、電子移動度がきわめて低い。基底レベルとのエネルギー差は約0.22eVであり、ナノ細線中の電子がドレイン電圧によってそのエネルギーを得ると、低移動度の高次サブバンド領域に遷移することができる。高次サブバンドでは、移動度が低いため電流は流れにくく、結果として負性抵抗が発現する。

このように、この素子は電子のサブバンド間遷移を利用した新しい速度変調による負性抵抗素子である。図4はナノ細線層のIn組成を0.8まで増加することにより、さらにナノ細線層の電子移動度を増加させた素子の温度特性である。図2に示すIn組成0.53の素子の場合には200K程度で負性抵抗が消滅したが、0.8のものでは260Kでも観測される。今後は、素子構造の最適化によって室温動作を目指す予定である。

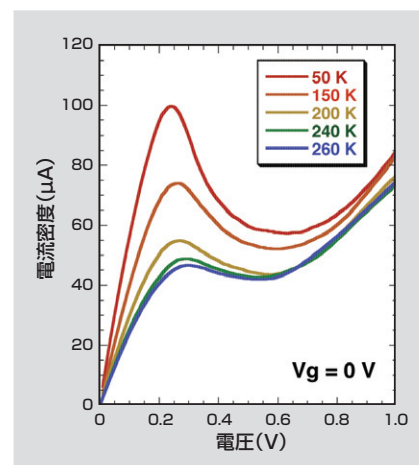


図4 In_{0.8}Ga_{0.2}As 量子ナノFETの温度特性
260Kまで負性抵抗が観察される。

今回開発した素子は、通常のFETと同じ製作プロセスが使えるため集積化に適しており、これによって超高周波(数100 GHz)発振素子を搭載した本格的な化合物半導体集積回路を実現できる可能性がある。また、その負性抵抗特性からテラヘルツ帯での超高周波発振素子としても期待ができる。

テラヘルツ電磁波は、光と電波の中間領域に属し、その発生技術および検出技術が未開拓な周波数帯であり、半導体素子やICカード、郵便物など等の非破壊検査や、生体への安全性からX線に変わる医学分野への応用など、幅広い分野での応用が期待されている。しかし、現在小型で安価なテラヘルツ電磁波の発生源がなく、その実現が望まれている。今後は、今回開発した素子についてさらに検討を加えることで、これらテラヘルツ分野への応用が可能にしていく考えである。

関連情報：

- T. Sugaya et al : J. Appl. Phys., Vol. 97, p. 034507 (2005) .
- 日経産業新聞, 日刊工業新聞 : 2004年11月25日 .
- 特願 2003-14613 「負性抵抗電界効果素子」 .
- 特開 2002-299637 「負性抵抗電界効果素子」 PCT 出願 米国 10/472843、カナダ 2442127.