

ケルビンプローブ顕微鏡を用いた GaAs HEMT 断面・ヘテロ構造の電位分布測定

水 谷 孝

名古屋大学工学研究科 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

(1998 年 10 月 2 日受理)

Potential Profile Measurement of GaAs HEMTs and Heterostructures Using Kelvin Probe Force Microscopy

Takashi MIZUTANI

Graduate School of Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603

(Received October 2, 1998)

Kelvin probe force microscopy (KFM) was successfully applied to the two-dimensional potential profile measurements of the cleaved surface of GaAs HEMTs under bias voltage. A high-field region was observed at the drain-side edge of the gate. By measuring the cleaved surfaces of GaAs/AlAs and InAlAs/InGaAs heterostructures, we have obtained potential profile reflecting the work function difference of the material. The minimum distinguishable thickness of the InAlAs/InGaAs heterostructure by the KFM was 40 nm. The present KFM technique combined with device simulation will provide a powerful tool for analyzing the electrical properties of the device, not only GaAs devices but also others.

1. は じ め に

半導体デバイスの微細化が進むにつれて、ミクロなスケールでのデバイスの評価技術の重要性がますます高まってきた。走査型プローブ顕微鏡を用いた各種評価技術は、この要求を満足し得る技術として高い期待を集め、近年盛んに研究されている。この中で、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) 法は、金属の接触電位差¹⁾、PN 接合²⁻⁴⁾、InGaAs 抵抗⁵⁾等の評価技術として検討が進められてきた。

本稿では、この技術をバイアス印加時の HEMT に適用して⁶⁻⁸⁾ HEMT 断面の電位分布測定を可能にした結果、および多層ヘテロ構造に適用し⁹⁾、仕事関数差を反映した電位分布像を得るとともに、空間分解能について検討した結果について報告する。

2. 測定システム

Fig. 1 に KFM の測定系のブロック図を示す。このシステムは Z フィードバックと電圧 (V) フィードバックの 2 つのフィードバック機能を有する。すなわち、Z フィードバック機能により探針-試料間の距離を一定に保ちつつ表面形状を測定するノンコンタクト AFM の機能に、探針-試料間に働く静電気力を測定する V フィードバック機能を付加したものである。静電気力の測定のために、探針-試料間に周波数 ω の交流電圧 V_{ac} と直流電圧 V_{off} とを印加している。半導体の表面電位を V_s とすると、探針-試料間に働く周波数 ω 成分の静電気力は以下の式で与えられる。

$$A_{\omega} = -S \frac{\partial C}{\partial Z} (V_{off} + V_s) V_{ac}$$

ここで C は探針-試料間容量、 S は補正係数である。この式は静電気力が探針と試料間の電位差の 2 乗に比例する結果として現れるものである。

上式からわかるように周波数 ω 成分の静電気力がゼロになるように V_{off} を変化させると、この時の V_{off} がサンプルの表面電位を与える。探針をサンプル上でスキャ

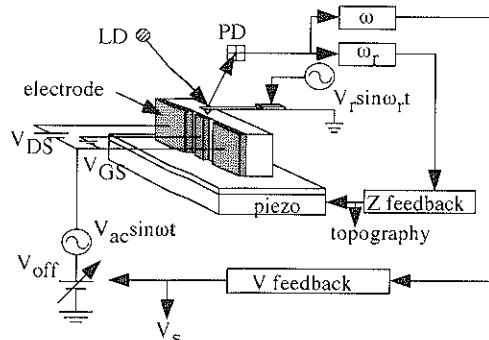


Fig. 1 Schematic diagram of the KFM measurement system.

Table 1 Measurement condition.

Measurement temperature	Room temperature
Atmosphere	Air
Cantilever	Au/Cr-coated Si tip
radius	30-40 nm
Spring constant	1.5 N/m
Alternating voltage	1~10 V, 8 kHz
ω_r	21 kHz

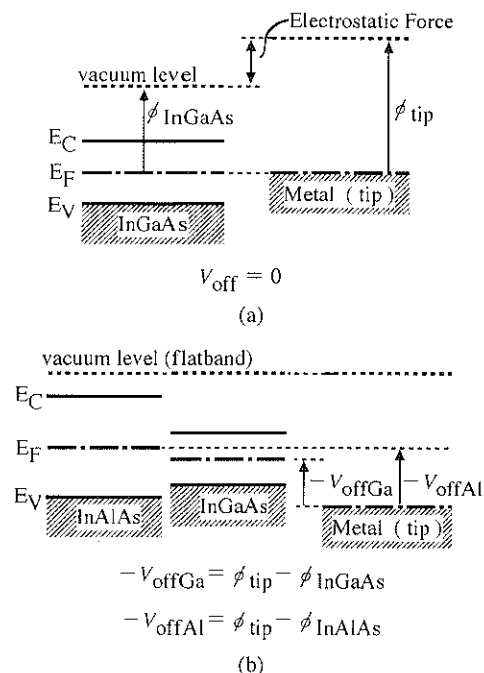


Fig. 2 Energy band diagram when the tip is near the InAlAs/InGaAs surface. (a) $V_{\text{off}} = 0$ V and (b) $V_{\text{off}} \neq 0$ V.

ンすることにより表面凹凸像と電位分布像が同時に得られる。なお2つの材料の仕事関数差を測定する標準的な方法として用いられるケルビン法は、2つの材料より構成される平行平板容量の一方の電極に交流振動を与え、これに対応した交流電流を測定し、これがゼロになるように外部直流電圧を変化させるものであり、KFMの名前はこれに由来している。測定条件等を表にまとめて示す。本システムの電圧分解能は10 mV 以下であった。

Fig. 2 は探針を半導体 (InAlAs/InGaAs) 表面に近接させて置いた場合の理想状態におけるエネルギーバンド図であり、(a) は $V_{\text{off}} = 0$ V, (b) は $V_{\text{off}} \neq 0$ V の場合である。 $V_{\text{off}} = 0$ V では探針と半導体 (InGaAs) の仕事関数に差があるため、その差に対応した電界が発生し静電気力が働く。この仕事関数差だけの V_{offGa} を印加して Fig. 2 (b) に示すようにフラットバンド状態にすることによりこの静電気力はゼロとなる。InAlAs でも同様に V_{offAl} を印加することにより、静電気力はゼロとなる。したがって V_{offGa} と V_{offAl} との差が InGaAs と InAlAs の仕事関数差を与える。同一半導体材料内において電位分布がある場合も同様であり、電位が傾いている分だけ $V_{\text{off}}(x)$ が異なることから、この $V_{\text{off}}(x)$ が電位分布を与えることになる。

3. 測定結果

Fig. 3 は測定に用いた AlGaAs/GaAs HEMT の断面図である。素子製作には MBE 結晶を用い、ゲート電極部を掘りこんだゲートリセス構造を有している。測定サンプルは劈開により準備したが、劈開前後のドレイン電流比 (0.66) はゲート幅比 (0.69) にほぼ等しく、またゲート電流は劈開前後でほぼ同じ特性を示したことから、劈開は素子の電流-電圧特性に影響を及ぼさないことが確められた。

Fig. 4 は HEMT の電位分布の測定結果の一例であり、明瞭な電位分布像が得られている。ゲート電極下の高密

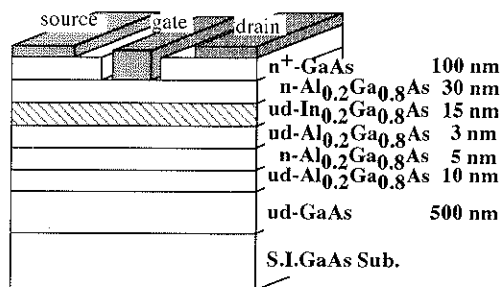


Fig. 3 Schematic cross-sectional view of the measured HEMTs.

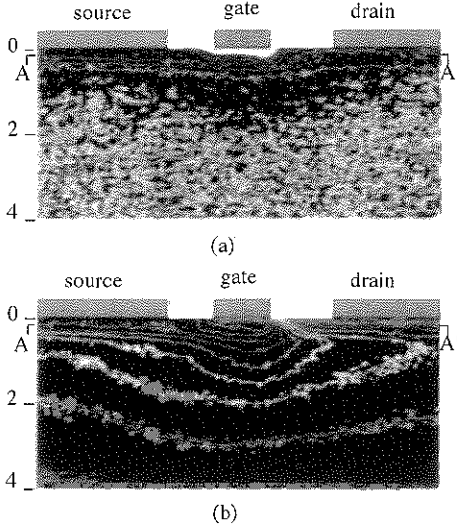


Fig. 4 Two-dimensional potential profiles at $V_{GS} = -0.3$ V for V_{DS} 's of (a) 0.2 V and (b) 1.5 V. Voltage steps of each contour line are 25 mV and 50 mV for (a) and (b).

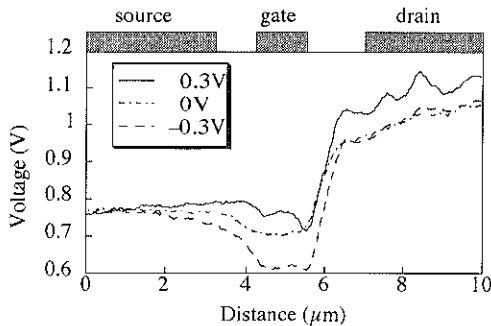


Fig. 5 Potential distribution along the AA' line in Fig. 4 at $V_{DS} = 1.5$ V for V_{GS} 's of 0.3, 0, and -0.3 V.

度な等電位線は、ゲート空乏層に対応している。Fig. 4 (b) の $V_{DS} = 1.5$ V の電流飽和領域では、ドレイン側のゲート電極端で等電位線の密度が高くなっており、電界集中が起こっているのがわかる。この様子は Fig. 5 に示すように、素子表面に平行な方向の電位分布を見るとよくわかる。電位分布はゲート電圧 = 0.3, 0, -0.3 V の場合を示した。ソース・ドレイン間の電圧降下がドレイン側のゲート電極端で起こっているのがわかる。このような電界集中はドレイン電圧の小さな線形領域では Fig. 4(a) に示すように見られていない。なお MBE 成長 GaAs MESFET では、このようなドレイン側の顕著な電界集中は見られなかった¹⁰⁾。素子表面に多くの表面準位がある場合に電界集中が緩和され、高耐圧素子が得られるとの報告もあり¹¹⁾、素子構造に依存した電界緩和効果が観

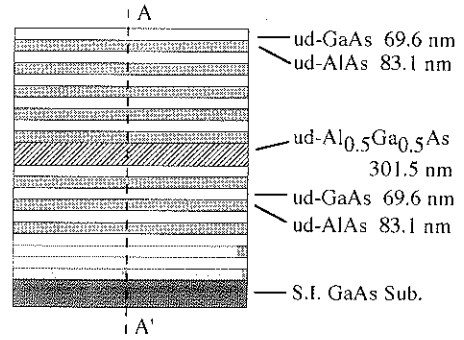


Fig. 6 The GaAs/AlAs MQW structure used for the measurement.

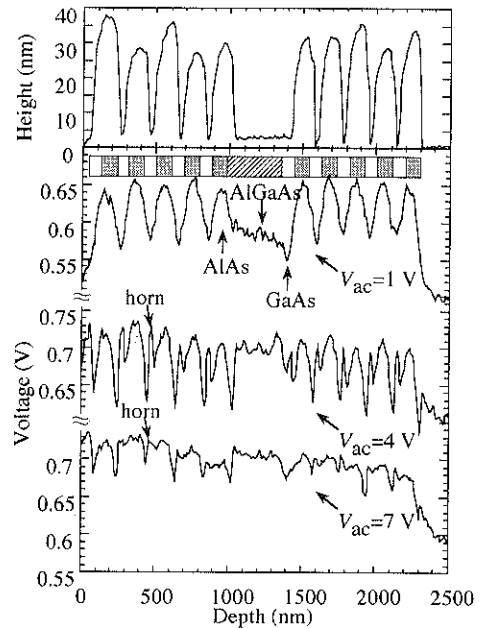


Fig. 7 Measured topographic and potential depth profiles of the GaAs/AlAs MQW structure for V_{ac} of 1, 4, and 7 V.

測されているものと思われる。

本測定システムの空間分解能については、GaAs/AlAs 多層構造、InAlAs/InGaAs 多層構造を用いて評価した。各層はすべてアンドープである。Fig. 6 は GaAs/AlAs 多層構造の断面図であり、GaAs/AlAs MQW で $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ をはさんだ構造を有している。測定結果を凹凸分布、電位分布と併せて Fig. 7 に示した。 $V_{ac} = 1$ V の場合に最も明瞭な電位分布像が得られている。 V_{ac} を小さくし過ぎると雑音の影響が現れ⁹⁾、大きくし過ぎるとサンプルの電位状態に影響を与えることが懸念されることから、 V_{ac} としては 1~2 V が適当である。GaAs の最小の厚み 69.6 nm が識別できているのがわかる。凹凸分布では AlAs

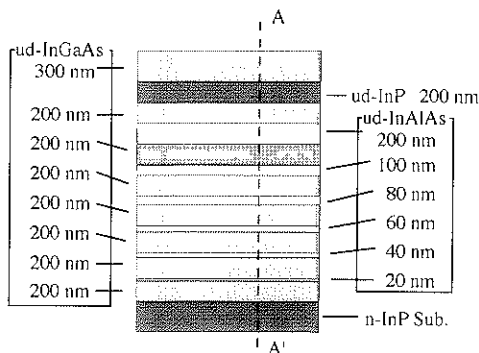


Fig. 8 InAlAs/InGaAs layered structure used for the measurement.

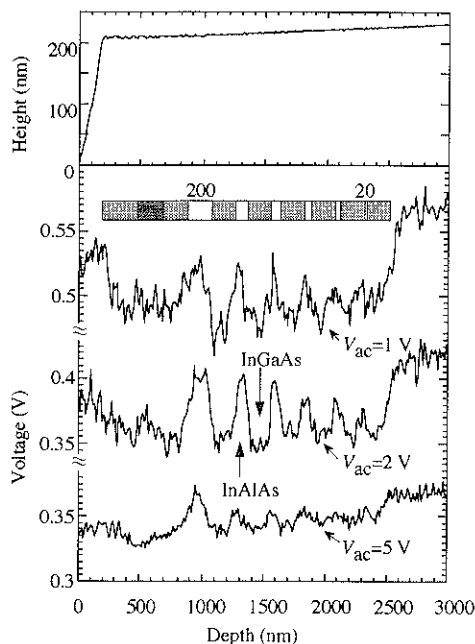


Fig. 9 Measured topographic and potential depth profiles of the InAlAs/InGaAs layered structure A for V_{ac} of 1, 2, and 5 V.

が盛り上がっているが、これは AlAs が酸化されやすく、この酸化により AlAs の体積が膨張したためであり、AlAs 領域は AlAs 酸化物の電位を測定していることになると思われる。図中 $V_{ac}=4, 7$ V で horn と書いた部分は、この凹凸の影響を受けたものではないかと考えられるが、更に検討が必要である。

Fig. 8 は InAlAs/InGaAs 多層構造 A の断面図である。InGaAs の厚みを 200 nm と一定に保ったまま、InAlAs の厚みを 200 nm から 20 nm に変化させている。Fig. 9 は劈開面の凹凸分布 (上) と電位分布 (下) の測定結果

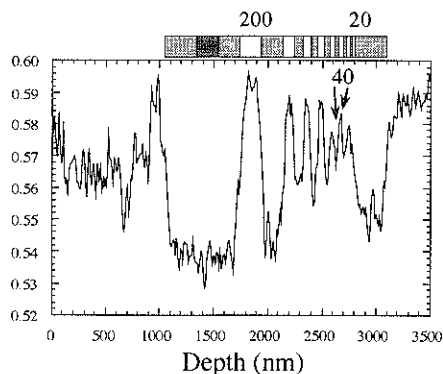


Fig. 10 Measured potential depth profile of the InAlAs/InGaAs layered structure B at V_{ac} of 2 V.

である。この材料系では AlAs に比べて自然酸化が少なく凹凸のないフラットな面が得られている。一方、電位には InAlAs/InGaAs ヘテロ構造に対応した分布が見られ、また GaAs/AlAs で見られた凹凸に起因すると考えられる horn-like な電位分布は見られない。 $V_{ac}=2$ V で最も明瞭な電位分布が得られている。エビ構造との比較により、電位の高い領域が InAlAs、電位の低い領域が InGaAs と判断でき、厚み 20 nm の InAlAs が明瞭に識別されている。

Fig. 10 は InAlAs と InGaAs の両方の厚みを 200 nm から 20 nm に薄くした InAlAs/InGaAs 多層構造 B の劈開面の電位分布である。この場合、識別可能な InAlAs の厚みは InGaAs 薄層の影響を受けて 40 nm と、Fig. 8 の構造 A の場合 (20 nm) に比べて厚くなった。この理由は、本測定法が長距離力である静電気力を測定しているためと思われる。以上の結果から、空間分解能は 40 nm 程度と考えられるが、厚みを薄くするにつれて電位差が少なくなる傾向があることから、更に検討が必要である。

Fig. 7 や Fig. 9 に示した電位の大小関係 $V_{AlGaAs} > V_{GaAs}$, $V_{InAlAs} > V_{InGaAs}$ は、2つの材料の仕事関数から予測される電位の大小関係と一致している。しかしながら両材料の電位差は、仕事関数差から予測される値と異なる (例えば InGaAs 系では予測値 150 mV に対して測定値 54 mV)。アンドープ試料の場合、界面でのバンドの曲がり は少なく、仕事関数差より小さく測定される可能性がある。またヘテロ接合界面に形成されるダイポールによるポテンシャルの不連続や、表面準位の影響も考慮する必要がある。これらについては今後の課題である。

4. ま と め

KFM 法をバイアスを印加した HEMT に適用し、ゲート電極のドレイン側端に電界集中を観測するなど、本方

法が電位分布測定に有用であることを示した。また InAlAs/InGaAs 多層ヘテロ構造の電位分布測定から識別可能な最小厚みは 40 nm 程度であることを示した。今後の課題としては、表面準位の影響の解明等が残されている。

本技術は HEMT に限らず他の種々のデバイスに適用可能であり、デバイスシミュレーション技術と組み合わせることにより、新しいミクロな電位分布測定技術として発展することが期待される。

謝 辞

空間分解能評価用の結晶を成長していただいた NTT の岩村英俊氏に感謝致します。本研究の一部は、科学研究費補助金、財団法人村田学術振興財団および日本ヒューレット・パッカートの助成を受けてなされた。

文 献

- 1) M. Nonnenmacher, M.P. O'Zboyle and H.K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **58**, 2921 (1991).
- 2) M. Nonnenmacher, M.P. O'Zboyle and H.K. Wickramasinghe: Ultramicroscopy **42-44**, 268 (1992).
- 3) A.K. Henning and T. Hochwitz: J. Appl. Phys. **77**, 1888 (1995).
- 4) M. Tanimoto and O. Vatel: J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 1547 (1996).
- 5) O. Vatel and M. Tanimoto: J. Appl. Phys. **77**, 2358 (1995).
- 6) M. Arakawa, S. Kishimoto and T. Mizutani: Extended Abstracts of the 1996 Int. Conf. Solid State Devices and Materials (Yokohama, 1996) p. 100.
- 7) T. Mizutani, M. Arakawa and S. Kishimoto: Technical Digest, IEDM (San Francisco, 1996) p. 31.
- 8) T. Mizutani, M. Arakawa and S. Kishimoto: IEEE Electron Devices Lett. **8**, 423 (1997).
- 9) T. Usunami, M. Arakawa, S. Kishimoto, T. Mizutani, T. Kagawa and M. Iwamura: Extended Abstract, 1997 Int. Conf. Solid State Devices and Materials (Hamamatsu, 1997) p. 330.
- 10) K. Matsunami, T. Usunami, S. Kishimoto, K. Maezawa and T. Mizutani: 1998 Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics for Information Systems Applications (Shonan Village Center, 1998) p.76.
- 11) H. Mizuta, K. Yamaguchi and S. Takahashi: IEEE Trans. Electron Devices **34**, 2027 (1987).