走査型 X 線顕微鏡による GaAs FET の 素子構造の観察*

内 田 史 彦** 重 田 淳 二*** 鈴 木 芳 生†

Observations of GaAs FET Structure by a Scanning X-ray Microscopy

Fumihiko UCHIDA, Jyunji SHIGETA and Yoshio SUZUKI

This paper describes observations of semiconductor device structure by a scanning hard X-ray microscopy with a pair of aspheric mirrors as X-ray focusing optics. Scanning X-ray microscopic images are obtained from detected X-ray diffraction signal by scanning a sample while an X-ray focusing beam is fixed. Hard X-ray focusing beam is produced a pair of elliptical cylinder mirrors arranged in a crossed mirror geometry (Kirkpatrick-Baez configuration). Both mirrors are cut with 5 nm figure contour error by a numerically controlled diamond flycutting machine. A focal spot size of $2.8 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ is obtained at a wavelength of $2.3 \text{ \AA}$ using synchrotron radiation from KEK Photon Factory 2.5 GeV storage ring. A GaAs FET with $2 \mu\text{m}$ gate length is measured as a model sample of a thin film structure. X-ray scanning microscopic images are derived by diffracted X-ray detection at a crystal plane of (422). A difference in gray level of those images between gate metal and source or drain metal shows a difference of X-ray absorption ratio.

Key words: scanning X-ray microscopy, aspheric mirror, X-ray microprobe, diamond flycutting, hard X-ray, GaAs FET, synchrotron radiation

1. 緒 言

硬 X 線 (数 $\text{\AA}$ 以下の波長領域) の集光技術は, X 線応用の各種分析 (蛍光 X 線, X 線回折, EXAFS など) において横分解能をあげるキー技術として, 近年研究が加速されている^{1)~4)}. 極微小な硬 X 線集光ビームが得られれば, 大気圧で, しかも非破壊で局所領域の構造, 結晶欠陥, 元素の分析ができるうえ, 試料を走査することによって検出情報の二次元分布像 (走査型 X 線顕微鏡) が得られるので, より詳細な評価が実現できる. これによって, 半導体素子の異物, 欠陥分析や生体の観察などへの応用展開が可能になる. このような背景のもと, 筆者らは, サブミクロンの分解能を目指した硬 X 線集光技術の開発と応用に関する研究を進めている. これまでに筆者らは, 数値制御ダイヤモンドフライカッティング装置⁵⁾⁶⁾を用いて一対の X 線集光用楕円筒ミラーを加工⁷⁾し, これ

を組み合わせた新規な集光光学系によって波長 $2.0 \text{ \AA}$ の硬 X 線領域で $4.2 \times 5.5 \mu\text{m}$ の集光ビーム寸法を実現した⁸⁾. さらに, 光源寸法と集光ビーム寸法との関連を検討した結果, $0.6 \mu\text{m}$ ライン & スペースのパターンまで解像できることを確認するに至っている⁹⁾.

本研究の目的は, 硬 X 線集光ビームを用いた走査型 X 線顕微鏡の応用として GaAs FET の観察を行い, 半導体素子等の微細構造物の分析を行う上での有用性と課題を抽出することにある.

2. 研 究 方 法

2.1 硬 X 線集光ビームによる半導体デバイス観察の有用性

半導体プロセスにおいて生じたデバイスの欠陥を分析し, その原因を解明することは, 歩どまりの向上やデバイス性能の向上のためのキー技術である. この欠陥分析において, 理想的な手法は次のようなものになる.

- ① デバイス中の欠陥の認識
- ② 観察された欠陥の局所領域における元素, 構造分析

* 原稿受付 平成 3 年 5 月 16 日

** 正 会 員 (株)日立製作所中央研究所 (国分寺市東恋ヶ窪 1-280)

*** (株)日立製作所中央研究所

† (株)日立製作所基礎研究所 (埼玉県比企郡鳩山町赤沼 2520)

③ 深さ方向の分析による発生起因の解明

これらをプロセスにフィードバックして、より高度なデバイス開発に寄与できるものと思われる。また、さらに実用的な面からは、

④ 上記の分析を大気圧中で、かつ非破壊で行うこと

が不可欠であろう。さらに、デバイスの電気特性を再検査することを考えれば、

⑤ 計測による損傷がないことも重要となる。

以上述べた観点から、従来の電子線やイオンビームを用いた局所分析法 (EPMA, SAES, SIMS, PIXE) と硬 X 線集光ビームを用いた分析とを比較した場合に、後者の利点をまとめると、次のようになる。

- ① 大気圧中で非破壊分析ができる。
- ② 電子線、イオンビームに比べ試料の損傷が小さい。

さらにシンクロトロン放射を光源とすれば、

- ③ 定量精度が高く、高感度である。
- ④ 波長をスキャンすることによって試料の深さ方向の分析が可能である。
- ⑤ 回折 X 線、蛍光 X 線、透過 X 線、吸収スペクトル等の硬 X 線分析を利用して結晶欠陥分析、元素分析、構造解析など種々の情報を同時に得られる。

このような利点は、上述した半導体デバイスの分析の要求に対して有力な手法となる可能性を示していると言える。

2.2 実験設備

図 1 に、試料の観察に用いたシンクロトロン放射を光源とする硬 X 線集光研究設備の構成を示す。実験は、高エネルギー物理学研究所フォトンファクトリ BL8C で行った。シンクロトロン放射光は、 10^{-9} Torr の超高真空雰囲気から Be 製の真空隔壁を介して大気中に出射し、Si (111) 二結晶分光器によって設定波長に単色化された後、非球面集光ミラーによって試料位置に集光される。

X 線集光用の非球面ミラーは楕円筒形状をしており、これを 2 枚組み合わせて光の鉛直方向と水平方向とを独立に集光する集光方式になっている。これは、2 枚の円筒鏡（あるいは球面鏡）によって光の鉛直方向と水平方向とを独立に集光していた Kirkpatrick-Baez (K-B) ミラー¹⁰⁾ の欠点である球面収差の除去をねらったものである。楕円筒形状は楕円の焦点の一方を光源に、他方を集光点、すなわち試料位置に一致す

Fig. 1 Schematic diagram of X-ray microprobe (KEK Photon Factory BL8C)

Table 1 Optical characteristics of elliptic cylinder mirrors

	M 1	M 2
Source to mirror distance a m	28	28.03
Mirror to image distance b mm	60	30
Magnification b/a	1/466	1/934
Mirror length L mm	28	28

るように設計している。楕円筒ミラーは、数値制御ダイヤモンドフライカッティング装置⁵⁾⁶⁾によって無酸素銅材を加工したもので、長さ 30 mm、幅 40 mm に対して、表面粗さ 1 nm、形状精度 5 nm（いずれも RMS 値）を達成している⁷⁾。

2.3 硬 X 線集光ビーム

表 1 に集光光学系の設計諸元を示す。ミラーは光源から 28 m の距離に設置されている。光学系の設計倍率は、それぞれ鉛直方向が 1/934、水平方向が 1/466 である。光源の寸法を KEK の公称値 $0.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ と仮定すると、集光ビームの理想寸法は $0.54 \mu\text{m} \times 4.29 \mu\text{m}$ である。鉛直方向の倍率を小さな値に設定したのは、一方のビーム寸法をできるだけ小さくして $2 \mu\text{m}$ 幅のゲート部の観察をねらったものである。ミラー最適位置の調整は、波長 $2.3 \text{ \AA}$ で行った。これは、本光学系の利用波長範囲 ($1.2 \sim 2.3 \text{ \AA}$) の中で、ミラーの表面粗さによる X 線散乱の影響の最も小さな長波長側に相当する。図 2 は、波長 $2.3 \text{ \AA}$ における集光ビームプロファイルの測定結果を示す。垂直方向の半値幅は $2.8 \mu\text{m}$ 、水平方向は $8.3 \mu\text{m}$ であった。3 節で述べるように、観察には約 $1.9 \text{ \AA}$ の波長を用いている。集光ビーム寸法と利用波長との関係を調べた筆者らの実験結果¹¹⁾ から、観察に用いた $1.9 \text{ \AA}$ の波長域では、 $2.3 \text{ \AA}$ に比べて約 20% 程度ビーム寸法が大きくなっていることが推定される。分析は、集

Fig. 2 Focal X-ray spot size obtained by knife edge scan ($\lambda=2.3\text{\AA}$)

Fig. 3 Experimental setup of scanning X-ray microscopy

光ビームの長手方向にゲートの長手方向が一致するように試料をステージに設置して行った。

2.4 走査型 X 線顕微鏡

図 3 に、回折 X 線を用いた走査型 X 線顕微鏡の配置図を示す。走査型 X 線顕微鏡による観察は、次の手順で行った。

- (1) X 線検出機をウェハ面に対して一定（本実験では約 20° ）の角度に設置し、入射 X 線の波長を変えて回折 X 線のピーク信号を捕らえる。
- (2) ピーク信号が得られた波長に固定して、試料台を、X、Y の 2 方向に一定のステップで移動し、回折 X 線の強度を検出する。
- (3) 試料台走査領域の各位置での X 線計数カウンタの値を濃淡の信号に画像化することによって、走査型 X 線顕微鏡像を得る。

2.5 観察試料

図 4 に FET の構造を示す。観察した試料は、3 インチウェハに FET を 390 400 個（6 400 個/チップ）

並べたものである。FET は (a) 図に示すように、ゲート電極とソース、ドレイン電極とから構成されている。ゲート長、すなわちゲート電極の先端部分の幅は $2\text{ }\mu\text{m}$ である。電極は GaAs (100) 面の基板の上に形成され、その立体構造は、(b) 図に示すようにゲートとソース、ドレインとで異なっている。また、基板の結晶方位を示すオリエンテーションフラット (O. F.) の結晶方位は $[011]$ 方向である。

3. 実験結果

3.1 回折 X 線による観察面

図 5 に観察に用いた GaAs 基板の結晶面と入射 X 線及び回折 X 線との関係を示す。X 線検出

Fig. 4 Structure of GaAs FET

Fig. 5 Schematic diagram of X-ray diffraction on GaAs (100) substrate

Fig. 6 Scanning X-ray microscopic images of GaAs FET by diffracted X-ray detection
 $\lambda = 1.899 \text{ \AA}$, $5 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $128 \times 128 \text{ pixels}$, Dwell time : 100 ms

器の設定位置は、ウェハ面に対して O. F. 面と平行な方向に 20° 傾けた位置とした。従って、図に示すように回折面は (100) 面と 35° 傾いた結晶面になる。また、回折面と入射 X 線とのなす角 θ は 55° である。一方、この設定において、回折 X 線の検出波長 λ は $1.899 \text{ \AA}$ であった。これらの条件を Bragg の回折条件式

$$2d \cdot \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

に代入すると、1 次の回折条件 ($n=1$) において格子面間隔 d は $1.16 \text{ \AA}$ となる。格子面間隔とミラー指数 (h, k, l) との関係

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2)$$

から、相当する結晶面を求めると (422) 面となる。ここで a は GaAs の格子定数 ($5.654 \text{ \AA}$) である。以上の結果から、観察した信号は GaAs 基板の (422) 面からの回折 X 線であることがわかった。

3.2 走査型 X 線顕微鏡像

図 6 に、回折 X 線を用いた GaAs FET の走査型 X 線顕微鏡写真を示す。画面の倍率は、測定ピッチと画素数によって決まる。図は、 $5 \mu\text{m}$ ピッチ、 128×128 画素、従って測定範囲は、 $640 \times 640 \mu\text{m}$ の写真である。また、1 画素あたりの測定時間は 0.1 秒、従って全測定時間は約 27 分である。この図を図 4 の光学顕微鏡写真と比べると、X 線顕微鏡写真ではソース、

ドレイン部において、ゲート部には見られない白い点状のコントラストが観察されている。また、ゲートとソース、ドレインのアレイパターンは識別できるが、ゲート幅 $2 \mu\text{m}$ のデバイス微細構造の観察には至っていないことがわかる。

4. 検 討

4.1 電極による画像濃淡の違い

図 6 で観察されたゲート部とソース、ドレイン部間の濃淡の違いは、GaAs に蒸着された電極用金属の X 線吸収係数 μ による差異が現れているものと推定される。すなわち、強度 I_0 の X 線が X 線吸収係数 μ の物質中を d (cm) だけ進んだ強度 I は

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d) \quad (3)$$

で表される。今、GaAs 上に全く吸収する物質が無い場合に検出される回折 X 線の強度を I_0 とすれば、式 (3) は回折 X 線の強度をパラメータとする本実験にも適用できる。ここで d は、X 線の進行距離の総和であるから

$$d = t + t / \sin 20^\circ \quad (4)$$

となる。 t は薄膜の厚さである。観察した GaAs FET に存在するすべての元素を対象にして、波長 $1.90 \text{ \AA}$ の吸収係数 $\mu^{(12)}$ をまとめると表 2 のようになる。多層構造の場合、式 (3) は、

$$I = I_0 \cdot \exp(-\sum \mu \cdot d) \quad (5)$$

となる。従って、ゲートとドレイン、ソースとでそれぞれ電極金属の厚さを考慮して金属透過時の回折 X 線強度を求めると表 3 のようになる。この表から、検出される回折 X 線の強度 I は、 I_0 で規格化して

$$\text{ゲート} \quad I/I_0 = 0.497$$

$$\text{ソース, ドレイン} \quad I/I_0 = 0.545$$

となることがわかる。得られた検出強度を比較すると、ゲート透過時の回折 X 線強度はソース、ドレイン透過時に比べて約 91.2% であることがわかる。この結果から、信号の強度差がゲートとドレイン、ソースとの顕微鏡濃淡像となって現れているといえる。すなわち、回折 X 線を用いた走査型 X 線顕微鏡を用いれば、デバイスの表面形状と同時に表面から第 2 層以下の材質構造の違いの情報を得ることができる。さらに、その材質を分析するためには蛍光 X 線を用いた

Table 2 X-ray absorption coefficients of metal at $1.90 \text{ \AA}$

	Au	Pt	Ti	Ni	W	Ge	Ga	As
Mass absorption coeff. μ/ρ	348	337	359	83.8	293	138	124	152
Density ρ	19.3	21.37	4.54	8.85	19.1	5.4	5.907	5.73
Absorption coeff. μ	6 716.4	7 201.7	1 629.9	741.6	5 596.3	745.2	732.5	871.0

Table 3 X-ray diffraction intensity ratio

Layer	Gate	Source, Drain
1st	Au(2 000 Å) $6\,716.4 \times 7.84 \times 10^{-5}$	Au(1 500 Å) $6\,716.4 \times 5.88 \times 10^{-5}$
$\mu \cdot d$ 2nd	Pt(500 Å) $7\,201.7 \times 1.96 \times 10^{-5}$	Ni(500 Å) $741.6 \times 1.96 \times 10^{-5}$
3rd	Ti(500 Å) $1\,629.9 \times 1.96 \times 10^{-5}$	W(500 Å) $5\,596.3 \times 1.96 \times 10^{-5}$
4th		AuGe(500 Å) $4\,447.3 \times 1.96 \times 10^{-5}$
$\Sigma \mu \cdot d$	0.699 7	0.606 3
I/I_0	0.497	0.545

Fig. 7 Scanning X-ray microscopic images of GaAs FET by diffracted X-ray detection
 $\lambda = 1.899 \text{ \AA}$, $1.25 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $128 \times 128 \text{ pixels}$, Dwell time : 100 ms

分析が必要になる。図6では、ソース、ドレイン部の内部でさらに画素の濃淡の違いが観察されるが、これはノイズ成分の影響と思われる。

4.2 測定分解能の検討

図7は、測定倍率を図6の4倍（ピッチ $1.25 \mu\text{m}$ 、測定範囲 $160 \times 160 \mu\text{m}$ ）に上げて観察したGaAs FETの走査型X線顕微鏡写真である。ゲートとソース、ドレイン間の横方向ライン（幅 $10 \mu\text{m}$ ）は画像化されているのに対して、FETの微細構造部（ゲート長 $2 \mu\text{m}$ ）の観察には至っていないことがわかる。従って、回折X線を検出する走査型X線顕微鏡の画像分解能は $10 \mu\text{m}$ 程度であると言える。

一方、筆者らはこれまで、本報告と同様に光源を直接集光する光学系において、透過X線を検出することによって $2 \mu\text{m}$ ライン&スペーステストパターンの走査型X線顕微鏡像を得ている⁸⁾。テストパターンの透過X線観察では、信号の絶対値が回折X線に比べて大きく、また遮蔽部（ライン：Au）の厚さを大きくすることによって透過部（スペース：SiN）との信号強度差が大きくなるので画像での濃淡信号をより明確にできる。これに対して、今回行った実デバイスの回折X線観察では、信号の絶対値が透過X線よ

りも小さく信号対ノイズ比が低下すること、また信号の強度差がデバイスの構造に依存することから、画像分解能が劣っているものと思われる。従って、実デバイスの観察にはより輝度が高く、かつ微小なX線集光ビームが必要となることがわかった。今後さらに、半導体デバイスの有効な観察を実現するために、ビームの微小化と高輝度化を推進する方針である。

5. ま と め

シンクロトロン放射を光源とする走査型X線顕微鏡によりGaAs FETの観察を行った。本研究の内容は、次のようにまとめられる。

- (1) 2枚の無酸素銅製の非球面ミラーによって走査型X線顕微鏡に有用な、半値幅 $2.8 \times 8.3 \mu\text{m}$ の硬X線集光ビームを実現した。
- (2) (422)面からの回折X線を検出し、GaAs FETの走査型X線顕微鏡像を得た。
- (3) X線顕微鏡像におけるゲートとソース、ドレインとの濃淡の違いは、これらの薄膜立体構造の違いによるX線吸収係数の差に起因することを示した。

今後は、蛍光X線顕微鏡についても検討するとともに、実用的なサブミクロンビームの実現を目指す。本研究は、高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の承認（acceptance No. 90-001）を得て行われた。

参 考 文 献

- 1) A. C. Thompson, J. H. Underwood, Y. Wu, R. D. Giaque, M. L. Rivers and R. Futernick : X-ray Microprobe Studies using Multilayer Focussing Optics, *Advances in X-ray Analysis*, 32, (1989) 149.
- 2) J. H. Underwood, A. C. Thompson, Y. Wu and R. D. Giaque : X-ray Microprobe Using Multilayer Mirrors, *Nucl. Instr. & Meth.*, A 266, (1988) 296.
- 3) K. Saito, K. Inagawa, K. Kohra, C. Hayashi, A. Iida and N. Kato : Fabrication and Characterization of Multilayer Zone Plate for Hard X-Rays, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27, (1988) L 2131.
- 4) Y. Gohshi, S. Aoki, A. Iida, S. Hayakawa, H. Yamaji and K. Sakurai : A Scanning X-Ray Fluorescence Microprobe with Synchrotron Radiation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26, (1987) L 1260.

- 5) 内田史彦, 森山茂夫, 瀬谷英一: 工具切込み量の回転角同期制御による非球面鏡の加工, 精密工学会誌, 55, 1 (1989) 179.
- 6) S. Moriyama, F. Uchida and E. Seya: Development of a Precision Diamond Turning Machine for Fabrication of Asymmetric Aspheric Mirrors, Opt. Eng., 27, 11, (1988) 1008.
- 7) 内田史彦, 森山茂夫, 鈴木芳生: 硬 X 線集光用非球面反射鏡の加工に関する研究, 精密工学会誌, 57, 2 (1991) 348.
- 8) Y. Suzuki, F. Uchida and Y. Hirai: X-ray Microprobe with a Pair of Elliptical Mirrors, Jpn. J. Appl. Phys., 28, (1989) L 1660.
- 9) Y. Suzuki and F. Uchida: X-ray Focusing with Elliptical Kirkpatrick-Baez Mirror System, Jpn. J. Appl. Phys., 30, (1991) 1127.
- 10) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: Formation of Optical Images by X-rays, J. Opt. Soc. Am., 38, (1948) 766.
- 11) 内田史彦, 鈴木芳生: X 線集光用非球面ミラーの開発, Microoptics News, 8, 2, (1990) 21.
- 12) C. H. Macgillavry and G. D. Rieck: Int. Tables for X-ray Crystallography, Vol. 3, (1962) 175.

編集後記

技術が高度化するに伴い、異分野の技術を融合した境界領域に独創技術が誕生しつつあります。オプトメカトロニクスは光を媒介とした電子と機械の融合技術であり、このような技術の代表と言えます。本技術では光の力学作用、化学作用等を介して情報とエネルギーの融合を目指すとともに、光より得た原始情報を加工・高度化し、制御系へフィードバックする光情報システムの構築をめざしております。

精密工学会光情報システムのオプトメカトロニクス研究専門委員会では、新たな技術分野を切りひらきたいという熱意のもとに、当研究専門委員会での議論をベースとして本特集を企画しました。執筆いただいたほとんどの方は、本専門委員会で発表された内容を中心にその後の進展を含め、解説して下さいました。年の瀬のあわただしい時期にもかかわらず、原稿をお寄せ下さった方々に感謝申し上げます。

本特集号を通読して感じますことは、光と力が融合したときにもつ技術の広がりとその深さであります。霜田先生、大津先生、豊田先生、内野先生の解説記事からもわかりますように、光の持つ力、熱、電気作用が、第一級の技術テーマとして積極的に研究されております。例えば、光の運動量変化を利用して細胞などの微粒子操作が可能で、将来は微小加工、微小アクチュエータなどに発展する可能性を内在しています。また、光の波長制限を打破した光-STM 技術では尖鋭端によるエバネッセント波(減衰波)を検出でき、生体などの超高分解能観察を可能としています。さらに、原子 1 個 1 個の操作が現実のものになりつつあります。

光はもともと波としての性質(超高速、超高密度、超

高分解能)を利用し高精度計測、極限計測の手段として利用されてきました。しかし最近では、高増、加藤両先生の解説にもありますように光計測の柔軟化が進んでおります。また、微小化、簡素化、集積化という実用面も追及され、よりなじみやすい技術として産業界に浸透しております。特に、平面集積(プレーナ)技術による大量生産が可能になりつつあります。浮田の解説にその端緒がありますが、機械部品も光源、光検出器とモノリシック集積化されようとしております。

以上の要素技術のほか装置技術としては光スキャン技術を使用した以下の 3 解説があります。光センサと電子処理、機械制御の結合である宇宙におけるレーザの捕捉・追尾制御技術(姉川氏)、光スキャン、光硬化材料、コンピュータ画像処理技術の融合である光造形(山本氏)、光プリンタのヘッド技術(森氏)である。いずれもオプトメカトロニクスの実用技術であります。今後は板生委員長の展望記事にある「光を媒介とした情報とエネルギーの技術融合」がますます進み、新たな装置が開発されるものと期待されます。

以上述べたように、現在、マイクロスケールのオプトメカトロ技術が急速に立ち上がり、精密工学の新分野が興隆しつつあります。現在のところ実験が先行しているようではありますが、本技術の着実な進展には、新たな光学理論(光操作、原子操作)、マイクロスケールでの物理化学・材料工学(光センサ、アクチュエータ)、さらには柔軟機構制御工学(応用)などの理論を構築することが必要になっております。まさに学際領域研究が求められているわけであり、本学会員の一人ひとりが広い世界観、技術観を持ち、ともにオプトメカトロニクスという新たな境界領域を開拓できることを期待したいと思います。本特集号がそのために少しでも役立てれば幸いです。(浮田 宏生)