

直接接合シリコン基板の開発



研究ノート

酒井 朗*

Direct silicon bonding substrates

Key Words : Silicon, direct bonding, x-ray microdiffraction,
transmission electron microscopy, interface

1. はじめに

近年の情報化社会を根本から支えるキーデバイスは、Si 基板上に形成された超大規模集積回路(ULSI)の基本素子である金属-絶縁膜-半導体(MOS)トランジスタである。このMOSトランジスタの開発の歴史は約40年と比較的短いものの、現在殆どすべての情報家電に搭載され、それをういた情報処理性能の高揚は周知のとおりである。これまでSi-ULSIは、「比例縮小(スケール)則」を設計指針として、MOSトランジスタの微細化によって高性能化と高集積化を同時に達成してきた。全世界での半導体デバイスの将来展望を決める International Technology Roadmap for Semiconductors によれば、トランジスタの設計寸法を端的に表す指標である物理ゲート長は、2009年で27nmに設定されており、10年後にはその半分以下の11nmとなっている[1]。

以上のナノメートルオーダーの数値から容易に予想されるように、こうした限界に近いスケールは、デバイスの性能向上よりも、むしろデバイスに用いられている材料の物性的限界や、様々な揺らぎ・ばらつきの顕在化による精度や性能の限界を誘発する。また、ULSIの集積度の増加による膨大な発熱量や消費電力などによって、微細加工の限界以前に高集積化や高性能化が困難になることが予測される。したがって、次世代高性能MOSトランジスタの開

発には、新しい指導原理を導入し、デバイスの革新的な機能化・集積化を実現するための技術、すなわち、ポストスケール技術を構築することが重要な課題となっている。

本稿では、次世代MOSトランジスタを取り巻く様々なポストスケール技術の中で、ULSIの基盤であるSi基板材料を、従来のSi(001)基板から、より高機能なSi基板へと変えるアプローチを紹介する。直接接合シリコン(以下Direct Silicon Bonding: DSB)基板は、異なった結晶方位を有するSi基板を原子レベルで直接接合したものであり、相補型(C-)MOSトランジスタのキャリア移動度と電流駆動力を改善する有力候補の一つである。この技術は、Si(011)面において正孔の移動度が最大となる現象を有効に活用したもので、実際に、Si(011)面とSi(001)面を直接接合させたDSB基板をCMOSプロセスに適用し、Si(001)面上にn型MOS、Si(011)面上にp型MOSを作り分けることで、 I_{ON}/I_{OFF} 比が約35%向上することが実証されている[2]。

こうしたDSB基板のように、大口径Si基板を用いて異種構造・材料のチャンネルを形成する際の本質的な問題は、チャンネル/基板ヘテロ界面における欠陥導入である。Si(001)表面と異なる原子配列や格子定数の違いは格子不整合欠陥を誘発し、多くの場合、それはキャリアの散乱中心となってデバイス性能を損なう。加えて、界面欠陥に付随する不均一な歪場は、集積化されたMOSトランジスタごとの特性ばらつきを誘引し、信頼性を低下させる。したがって、次世代CMOSデバイスへのDSB基板の適用には、ヘテロ界面における欠陥の制御が極めて重要である。

後で述べるように、DSBプロセスでは、化学溶液処理されたSiウエハを界面の酸化膜を介して貼



* Akira SAKAI

1962年1月生
名古屋大学 大学院工学研究科 金属工学専攻(1986年)
現在、大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授 工学博士 半導体結晶工学
TEL: 06-6850-6300
FAX: 06-6850-6300
E-mail: sakai@ee.es.osaka-u.ac.jp

り合せ, その界面酸化膜を取り除き原子レベルで直接接合させるために高温熱処理を施す. 最近, 筆者らは Si(011)/Si(001) DSB 基板の Si(011) 層に対する X 線回折実験から, DSB プロセスによって結晶性が劣化することを報告した[3]. しかしながら, 接合界面の欠陥が DSB 基板の結晶性に如何に影響を与えるかについては, 十分に理解されていないことも多く, DSB 基板を用いた次世代 CMOS 性能の信頼性を確保するうえでも, 接合界面構造と基板結晶性の相関を明らかにする必要がある.

本報告においては, ヘテロチャネル構造の欠陥制御に関わる研究の一環として, これまでに筆者らが進めてきた DSB 基板の作製と評価について述べる. 特に, 異なる表面方位を有する Si 基板の原子接合過程で導入される界面欠陥と歪に関して, X 線マイクロ回折法 (X-ray microdiffraction: XRMD) と透過電子顕微鏡法 (Transmission electron microscopy: TEM) を駆使して明らかにした結果について述べる.

2. DSB基板の作製

DSB 基板作製の手順を以下に説明する. まず, 鏡面研磨された Si(011) ウエハと Si(001) ウエハを RCA 洗浄によって親水性表面とし, クリーンルーム内において室温で貼り合せた. 貼り合せに際しては, Si(011) ウエハの面内 $[0\bar{1}1]$ 方向と, Si(001) ウエハの面内 $\langle 220 \rangle$ 方向が一致するようにする. この貼り合せウエハに対して, 100% Ar 雰囲気中, 1273K にて 1 時間の接合強化熱処理を施した後, Si(011) 側を厚さ 200 nm 程度まで研削・研磨した (この段階でのサンプルを as-bonded と称する). さらに, 界面酸化膜を取り除くために, 100% Ar 雰囲気中, 1473K で 1 時間の酸化膜外方拡散熱処理 (ODA) を行なった (ODA-treated). 図 1 は, as-bonded および ODA-treated サンプルの断面 TEM 像である. 前者で観察される界面の酸化膜が, ODA 処理によって, 完全に消滅していることがわかる.

3. XRMDによる結晶性評価

XRMD には, 高輝度光科学研究センター Super Photon ring, 8 GeV (SPring-8) のビームライン BL13XU に設置の X 線マイクロ回折光学系を用いた. 本光学系はゾンプレートと複数の狭幅スリットから構成され[4,5], $0.7 \times 0.9 \mu\text{m}^2$ サイズの X 線マイ



図 1. as-bonded (上)および ODA-treated (下) サンプルの断面 TEM 像.

クロビームによるサブミクロンスケール領域の X 線回折評価を可能とする. 本実験では, as-bonded および ODA-treated サンプルを対象として, それぞれの基板における Si(011) 層からの 022 回折強度を検出し, 格子面傾斜の局所的な揺らぎを検出した. 図 2 は X 線入射方向に対するサンプル設定を表す模式図である. ここでは X 線を Si(011) 層の面内 $[100]$ ($[100]_{\text{Si}(011)}$) もしくは $[0\bar{1}1]$ ($[0\bar{1}1]_{\text{Si}(011)}$) 方向に沿って入射し, 入射方向と垂直な軸回りに 0.0005° ステップで, $\pm 0.02^\circ$ の範囲にわたってサンプルを回転させてロッキングカーブを測定した. また, サンプルを回転軸に対して垂直もしくは平行に, $2.5 \mu\text{m}$ ステップで走査することにより, 位置依存の結晶性を表すロッキングカーブマップを得た.

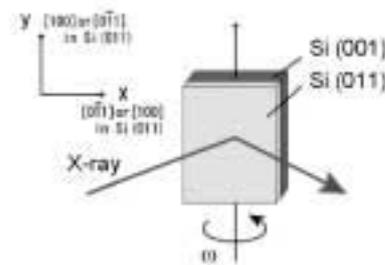


図 2. X 線マイクロ回折実験におけるサンプル設定. はロッキングカーブ測定のサンプル回転角.

図 3 は as-bonded サンプルの Si(011) 層を $125 \mu\text{m}$ 走査して得た一連の 022 回折ロッキングカーブのコントラストマップである. このマップから明らかのように, ロッキングカーブのピーク位置がサンプル内位置に依存して揺らいでいる. こうした揺らぎはバルク Si(011) 基板では観測されないことから[3], 貼り合せ基板特有の構造であるといえる.

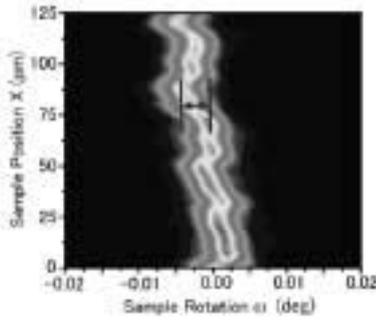


図3 . as-bonded サンプルSi(011) 層の022 回折ロックカーブのコントラストマップ．X線入射方向は $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ ．サンプル走査方向は $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ ．矢印は m を表す．

ODA-treated サンプルに対して同様に得たロックカーブコントラストマップを図4に示す．図4(a)および4(b)のX線入射方向は、それぞれ、 $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ および $[100]_{Si(011)}$ である． $[100]_{Si(011)}$ (図4(b)) 入射では、ピーク位置の揺らぎが、as-bonded サンプルのそれ(図3)と同程度であるのに対して、 $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 入射(図4(a))ではかなり大きな揺らぎが観察される．ピーク位置を与える m 値の揺らぎの最大値を m として、各サンプル、測定条件について比較すると、ODA-treated サンプルの $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 入射で測定した m が他に比べて大きく[5]、Si(011) 層における(022) 格子面の傾斜揺らぎは、 $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 軸回りよりも $[100]_{Si(011)}$ 軸回りに優先的に生じていることになる．

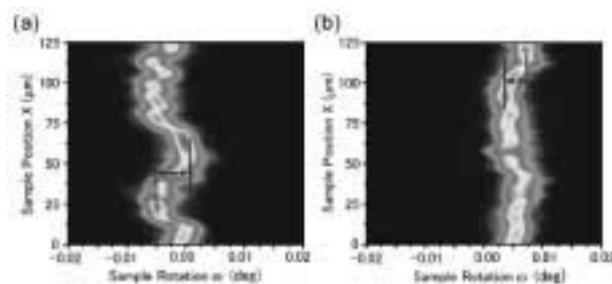


図4 . ODA-treated サンプルSi(011) 層の022 回折ロックカーブのコントラストマップ．X線入射方向およびサンプル走査方向はともに、(a) $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 、(b) $[100]_{Si(011)}$ ．矢印は m を表す．

4. TEMによる界面欠陥・構造評価

次に、ODA-treated サンプルの接合界面欠陥に対するTEM 観察結果について述べる．平面TEM 観察においては、主として $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 方向に走る線

状欠陥が観察された．接合界面を含む同一の観察視野に対して、回折ベクトル g を、それぞれ $0\bar{2}2_{Si(011)}$ および $400_{Si(011)}$ とした二波励起明視野TEM 像を、図5(a)および5(b)に示す．欠陥のコントラストが $g = 400_{Si(011)}$ で消失していることから、本欠陥の変位ベクトルは、欠陥が走る方向と平行な螺旋成分を有していることがわかった．これより、本欠陥は貼り合せ時に不可避免的に生じたウエハ回転角のずれによって導入されたと考えられる．

図6(a)および6(b)は、ODA-treated サンプルを、それぞれ、 $[100]_{Si(011)}$ および $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 方向から観察した断面TEM 像である．Si(011) 面とSi(001) 面を接合した場合、 $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ 方向に沿っては、Si(011) 面に垂直な(022) 格子面の間隔はSi(001) 面に垂直な(220) 格子面のそれと完全に一致する．そのため、図6(a)に見られるような平坦な界面が形成されたと考えられる．

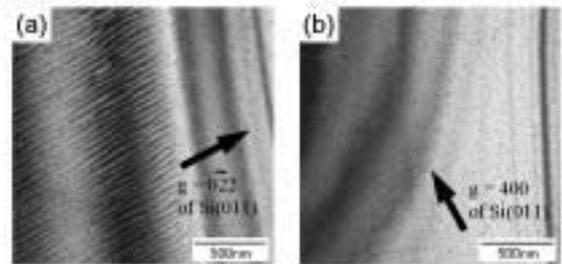


図5 . ODA-treated サンプルにおける接合界面付近の平面TEM 像．回折ベクトルは、(a) $g = 0\bar{2}2_{Si(011)}$ 、(b) $g = 400_{Si(011)}$ ．



図6 . ODA-treated サンプルにおける接合界面付近の断面TEM 像．観察方向は(a) $[100]_{Si(011)}$ 、(b) $[0\bar{1}1]_{Si(011)}$ ．

一方、図6(b)では、接合界面に原子スケールの凹凸が観察される．この凹凸界面の一部においては、Si(011) 側とSi(001) 側の両面に形成された原子スケールの $\{111\}$ 面が向き合うように接合していることが格子像シミュレーションを用いた解析によって確

認められている[7]。界面の $[100]_{\text{Si}(011)}$ 方向に沿っては、 $\text{Si}(011)$ の (400) 格子面と $\text{Si}(001)$ の $(2\bar{2}0)$ 格子面の間に格子整合性がない。したがって、こうした凹凸構造は、ODA 中に、よりエネルギー的に安定な結晶面を露出するように界面原子が再配列して形成されたものと考えられる。

5. DSB 基板の結晶性と界面構造の相関

ODA-treated サンプルに対して、XRMD で得られた $\text{Si}(011)$ 層の結晶性と TEM で観察された界面構造の相関を理解するにあたり、それぞれのデータを再見する。XRMD ロッキングカーブマップで得られた χ_m は、(022) 格子面の傾斜揺らぎが、 $[0\bar{1}1]_{\text{Si}(011)}$ 軸回りよりもむしろ $[100]_{\text{Si}(011)}$ 軸回りで大きいことを示している。一方、断面 TEM 像からは、界面揺らぎは $[100]_{\text{Si}(011)}$ 方向に沿って顕著であった。この結果は、界面構造の異方性が (022) 格子面傾斜揺らぎに影響を与えていることを強く示唆している。実際、貼り合わせる個々のウエハには、表面方位のミスカットが少なからず存在し、それは界面垂直方向の格子不整合性に起因する転位の導入を誘発する。すなわち、接合界面には、図7の模式図に表したように、 $\text{Si}(011)$ の (022) 面と $\text{Si}(001)$ の (004) 面の格子不整合性によって、転位が導入される。この転位は界面垂直方向のパーガースベクトルを有するため、 $\text{Si}(011)$ 格子面が局所的に傾斜し、転位の分布に従って傾斜の揺らぎが存在することになる。こうした転位の分布状態を界面構造に照らし合わせてみた場合、界面の $[100]_{\text{Si}(011)}$ 方向に沿っては凹凸構造が形成されている。これはナノスケールで近接した転位対の存在を意味しており、一つの転位で誘発される格子面傾斜がそれと対をなす転位によって相殺されることになる。そのため、 $[0\bar{1}1]_{\text{Si}(011)}$ 軸回りの格子面傾斜揺らぎは、 $[100]_{\text{Si}(011)}$ 軸回りのそれに比べて小さいと考えられる。

6. まとめ

$\text{Si}(011)/\text{Si}(001)$ DSB 基板を作製し、微細領域に対する X 線マイクロ回折ロッキングカーブ測定による結晶性評価と、透過電子顕微鏡による原子レベルでの界面欠陥・構造評価を行った。その結果、DSB 基板界面に導入された欠陥や面内異方性を有する原子配列が、 $\text{Si}(011)$ 層の格子面傾斜揺らぎに

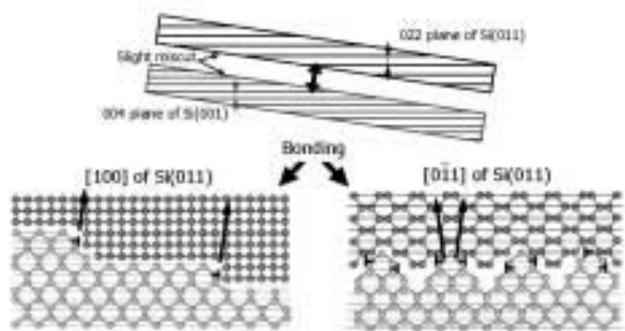


図7. DSBプロセスおよび接合界面における原子配列の模式図。ミスカット角は誇張して描いている。

影響を与えることが明らかになった。今後は、こうした DSB 基板に特徴的な結晶性と、キャリアの伝導挙動の相関を明らかにし、ポストスケリング世代の Si-CMOS 用基板材料としての資質を検証していく予定である。

謝辞

本研究は、大阪大学大学院基礎工学研究科の学生である大原悠司および上田貴哉の両名が主に行なったものである。また、直接接合基板の作製にあたっては、コバレントマテリアル(株)の豊田英二氏、磯貝宏道氏および泉妻宏治氏に、XRMD 実験に際しては、名古屋大学大学院工学研究科の中塚理氏および財満鎮明氏、高輝度光科学研究センターの坂田修身氏および木村滋氏、TEM 観察に際しては、大阪大学超高压電子顕微鏡センターの坂田孝夫氏および森博太郎氏にご指導いただきました。ここに謝意を表します。

なお、Spring-8 における実験は、課題 No. 2007B1005 のもとに、また、本研究の一部は科学研究費補助金特定領域研究 (No. 18063012) の援助のもとに行なわれた。

参考文献

- [1] http://www.itrs.net/Links/2008ITRS/Update/2008Tables_FOCUS_A.xls
- [2] C-Y. Sung, H. Yin, H. Y. Ng, K. L. Saenger, V. Chan, S. W. Crowder, J. Li, J. A. Ott, R. Bendernagel, J. J. Kempisty, V. Ku, H. K. Lee, Z. Luo, A. Madan, R. T. Mo, P. Y. Nguyen, G. Pfeiffer, M. Paccioppo, N. Rovedo, D. Sadana, J. P. de Souza, R. Zhang, Z. Ren, and C. H. Wann, in *Tech. Dig.*

Int.

Electron Devices Meet. 2005, p. 235.

- [3] E. Toyoda, A. Sakai, O. Nakatsuka, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, M. Ogawa, and S. Zaima, in *Abstracts of Int. Conf. Silicon Epitaxy and Heterostructures 2007*, p. 337.
- [4] S. Mochizuki, A. Sakai, N. Taoka, O. Nakatsuka, S. Takeda, S. Kimura, M. Ogawa, and S. Zaima, *Thin Solid Films* **508**, 128 (2006).
- [5] S. Takeda, S. Kimura, O. Sakata, and A. Sakai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L1054 (2006).
- [6] Y. Ohara, T. Ueda, A. Sakai, O. Nakatsuka, M. Ogawa, S. Zaima, E. Toyoda, H. Isogai, T. Senda, K. Izunome, H. Tajiri, O. Sakata, and S. Kimura, in *Abstract Book of 4th International Sige Technology and Device Meeting, 2008*, p. 153.
- [7] T. Ueda, Y. Ohara, E. Toyoda, K. Izunome, and A. Sakai, *Abstracts of the IUMRS International Conference in Asia 2008*, ZP-6.

