

Title	Si/SiO ₂ 界面ラフネスの統計的性質とフラクタル性
Author(s)	吉信, 達夫
Citation	大阪大学低温センターだより. 1995, 89, p. 11-14
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3780
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

Si/SiO₂界面ラフネスの統計的性質とフラクタル性

産業科学研究所 吉信達夫 (吹田8404)

1. はじめに

LSIの高集積化とともに素子のサイズが縮小すると、素子構造中の界面や表面のラフネスがデバイス特性に与える影響が相対的に増大してくることが予想される。たとえば、Si MOSFETにおけるSi/SiO₂界面ラフネスが反転層のキャリア移動度に与える影響については、界面ラフネス散乱 (surface roughness scattering) として多くの理論的・実験的研究が行われてきた¹⁾。このような現象を解析するには、まずSi/SiO₂界面ラフネスの統計的性質を知る必要があり、これは実験によって求める必要がある。

原子間力顕微鏡 (AFM) は、原子レベルの高分解能測定から100 μm超の広視野測定まで広範なダイナミックレンジを有することから、ラフネスの評価に非常に適した方法の一つであると言える。

本報告では、Si/SiO₂界面のラフネスについて、その統計的性質とフラクタル性という観点から解析を行った結果について述べる^{2,3)}。

2. 実験

測定に用いた試料は、p型Si(100)を900℃でドライ酸化およびN₂中アニールしたもので、酸化膜厚は約16nmである。試料は測定の直前に希HFで酸化膜を除去し、得られたSi表面についてAFM測定を行った。測定視野は、100×100nm²から50×50μm²までのさまざまな領域について行った。

3. 自己相関関数*とパワースペクトル密度*

ラフネスの統計的性質は、自己相関関数によって記述することができる。従来、界面ラフネス散乱に関する理論計算ではガウス型の自己相関関数

$$ACF_G(r) = \Delta^2 \exp(-r^2/L_c^2)$$

を仮定するのが普通であった。しかし最近ではむしろ指数型の自己相関関数

$$ACF_E(r) = \Delta^2 \exp(-r/L_c)$$

を仮定した方が実験結果と良い一致が得られるとの報告もある⁴⁾。

そこで実際に測定したAFM像から自己相関関数の計算を行なった。視野の大きさを変えて自己相関関数を計算したところ、図1に示すように各々見かけの相関長が異なる結果が得られ、フィッティングによって関数型やパラメータを決定することは困難であった。これは、視野が小さい場合にラフネスの長波長成分がカットオフされてしまうためであり、

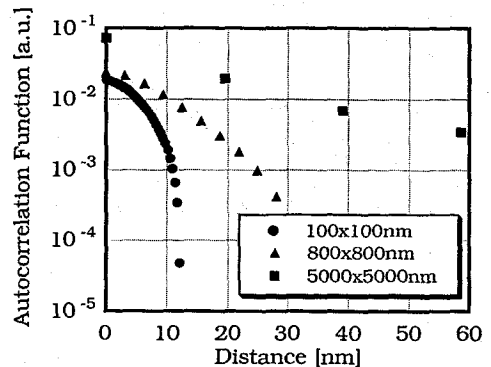


図1 Si/SiO₂界面ラフネスの自己相関関数

AFMのような高倍率の測定では、視野の大きさによってラフネスの見え方が異なることになる。

視野の大きさ（スケール）によって見え方が異なるような形状は、次節で述べるような自己アフェイン（self-affine）フラクタル*として自然に記述され、また、その方がカイネティック・ラフニングのスケーリング理論*との関連で興味深いのであるが、ここではまず、自己相関関数の関数型について調べる。

そのために、自己相関関数のフーリエ変換である、パワースペクトル密度を計算した。測定視野の大きさに応じて異なる空間周波数領域がカバーされ、それらをつなぎ合わせることによって図2(a)が得られた。これを、ガウス型・指数型の自己相関関数をフーリエ変換して得られる図2(b)と比較すると、実際のSi/SiO₂界面ラフネスは指数型に近いことがわかる。

図3は実際のAFM像と、シミュレーションによって生成したガウス型・指数型ラフネスの実空間像

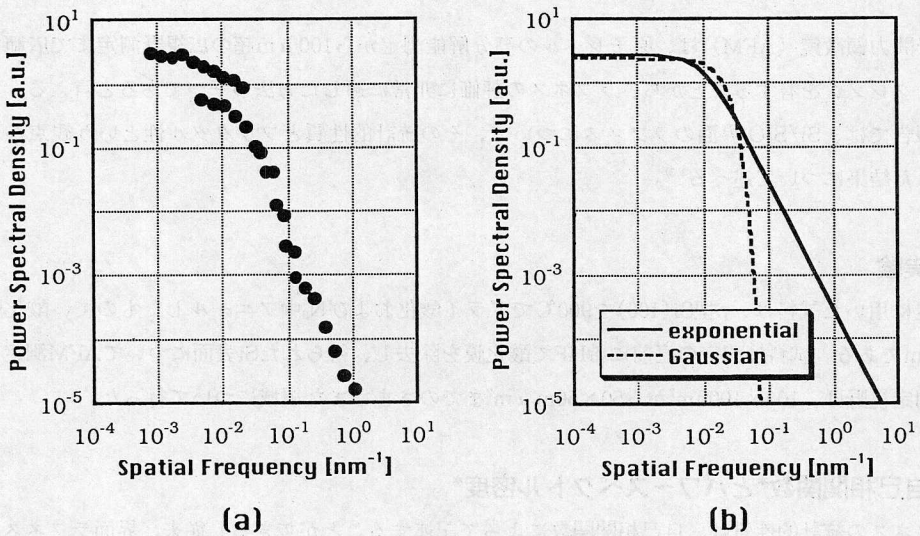


図2 Si/SiO₂界面ラフネスのパワースペクトル密度。
(a)実測、(b)ガウス型および指数型相関の場合

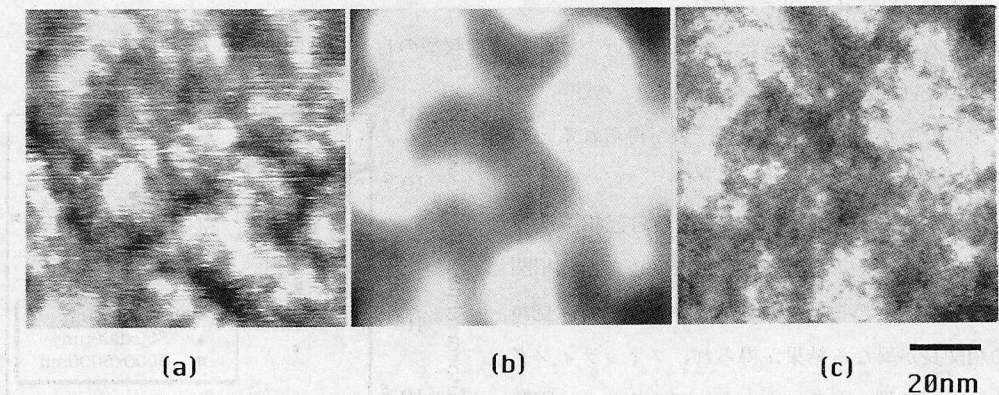


図3 (a)Si/SiO₂界面のAFM像と、(b)ガウス型および(c)指数型の相関を仮定してシミュレーションにより生成したトポグラフ

* この印の付いている語は、後に「用語説明」があります。

を比較したものである。ガウス型のラフネスは高周波成分が少なく、なめらかな形状であるのに対して、実際のSi/SiO₂界面ラフネスは高周波成分をより多く含み、指数型に近いことが、これらのトポグラフからもわかる。

自己相関関数の関数型が界面ラフネス散乱に与える影響については、今後、理論計算と実験との詳細な比較が望まれるところである。

4. 界面の幅のスケーリングとフラクタル性

界面ラフネスのフラクタル性を調べるには、界面の幅 $W(L)$ を用いると都合がよい。 $W(L)$ は視野 $L \times L$ において観測されるrmsラフネスとして定義される。界面の幅が

$$W(L) \sim L^\alpha \quad (0 < \alpha < 1)$$

のように変化するとき、この界面は自己アフィン・フラクタルである。実際にはラフネスの大きさは有限であるから、 L が大きい領域では $W(L)$ は一定値を示し、これが通常の意味でのrmsラフネスに対応する。スケーリング指数 α はラフネス指数と呼ばれ、フラクタル次元 D との間には $D = 3 - \alpha$ という関係がある⁹⁾。

図4は、実際のAFM像をもとに計算した、Si/SiO₂界面ラフネスの $W(L)$ である。100nm以下のスケールにおいて $W(L) \sim L^{0.3-0.5}$ の空間的スケーリングを示し、自己アフィン・フラクタルの性質を持つことがわかる。

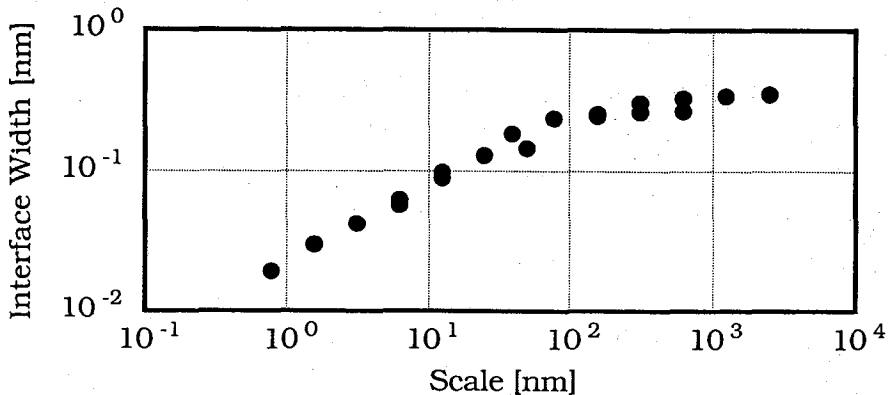


図4 Si/SiO₂界面ラフネスのスケール依存性

ラフネス指数 α の値には、そのラフネスが形成されたカイネティクスが反映されていると考えられる。いくつかの簡単な成長モデルに対しては、解析的またはシミュレーションによって α の値が求められているが、熱酸化プロセスに対するものは今のところない。今後、具体的な成長プロセスに対するスケーリング解析が進めば、ラフネスのフラクタル構造の起源について、定性的・定量的理解が深まるものと期待される。

参考文献

- [1] T. Ando: J. Phys. Soc. Jpn. 43 (1977) 1616.
- [2] T. Yoshinobu, A. Iwamoto and H. Iwasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L67.
- [3] T. Yoshinobu, A. Iwamoto and H. Iwasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) 383.
- [4] S. M. Goodnick, D. K. Ferry, C. W. Wilmsen, Z. Liliental, D. Fathy and O. L. Krivanek: Phys. Rev. B32 (1985) 8171.
- [5] J. Kertesz and T. Vicsek: Fractals in Science, eds. A. Bunde and S. Havlin (Springer-Verlag, Berlin, 1994) pp.89-117.

用語説明

自己相関関数

位置 r における平均面からの高さを $h(r)$ とすると、自己相関関数 $ACF(r)$ は $\langle h(r_0)h(r_0+r) \rangle$ で定義される。相関長 L_c は $ACF(L_c) = ACF(0)/e$ となる距離として定義できる。

パワースペクトル密度

パワースペクトル密度 $PSD(f)$ は、 $\{h(r)\}^2$ のフーリエ変換で定義されるが、これは自己相関関数 $ACF(r)$ のフーリエ変換に等しい。

自己アファイン・フラクタル

ある図形を拡大・縮小すると元の図形と同じ（または統計的性質が同じ）図形が得られるとき、この図形は自己相似フラクタルであるという。これに対して、表面や界面のラフネスは、低倍率ではなめらかに見え、高倍率ほどけわしく見えるので、自己相似的ではない。この場合、面内方向とそれに垂直な方向とで倍率の異なるような変換（affine変換）に対して不変性を示すので、このような図形は自己アファイン・フラクタルと呼ばれる。

カイネティック・ラフニングのスケーリング理論

膜成長にともなう表面ラフネスの空間的・時間的スケーリングは

$$W(L) \sim \begin{cases} L^\alpha & \text{for } L < t^{1/z} \\ t^\beta & \text{for } L > t^{1/z} \end{cases}$$

のような振る舞いを示し、3つのスケーリング指数 α 、 β 、 z によって特徴づけられる。