



Title	走査型トンネル顕微鏡を使って半導体微細加工を観察する
Author(s)	福留, 秀暢; 長谷川, 繁彦; 中島, 尚男
Citation	大阪大学低温センターだより. 1999, 106, p. 14-18
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/8650
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

走査型トンネル顕微鏡を使って 半導体微細構造を観察する

産業科学研究所 福 留 秀 暢 (内線8412)
 長谷川 繁 彦
 中 島 尚 男

E-mail:hasegawa@sanken.osaka-u.ac.jp

二十一世紀は既に目前に迫り、一足先に2000年問題が他人事のように巷で語られる二十世紀末、私は一台のコンピュータを使ってこの文章を創り出している。ちょっとした文章を書くのに紙と鉛筆を必要とせず、更には不明な漢字を調べるのに字書すら必要としないのだから便利な世の中になったものである。そう感じられるのは私が文章を書くのに紙と鉛筆が必要な時代を生きていたからであって、いずれ、紙なんてものが昔はあったのですね、とまるでパピルスや羊皮に抱くような感想を言う人が現れるのだろうか。紙を使って生きてきた人達は、そうはならないさ、と答えるだろうが果たしてそうだろうか。この100年余りの間に行われた工業技術の進歩は実に筆舌に尽くし難い程目覚ましいものであった。人類が生きる世界の急激な変化をおそらく産業革命を経験した人々は19世紀の末にも感じていた筈であろう。しかし、それ以上に今世紀急速な科学文明の発展が置き去りにされた精神文明を嘲笑うかのように走り続けている。私に紙が無い世界が想像できないのと同じように、産業革命が齎した最初の果実に充足感を満たされていた人達に現在の世界、例えば、小型の携帯電話を使用して遠く離れた友人と会話を楽しんだり、個人のコンピュータを用いて世界中の情報を即座に入手したりすることが、一部の特権的な階級の人だけでなく老若男女誰にでも可能な世界など想像するのは極めて困難だったことであろう。今世紀初頭、電話は既に登場しているが大型で有線の機械を使っていたのだから今の携帯電話みたいなものを使う世界など夢物語りにしか過ぎず、ましてやコンピュータなど登場すらしていないのだからそのコンピュータを持ち運びできる世界など空想家の類いにすら想い描くのは困難だったであろう。しかし、科学技術の進歩は電話やコンピュータを生み出すにとどまらず、新しい技術との組み合わせと部品の軽量化、小型化、高性能化により携帯できるものにしてしまったのだから驚きである。あなたがインターネットでもしようかなと新しいコンピュータを購入されたなら是非ケースを開けてその中身を御覧いただきたい。そこには10年前のコンピュータに使用されていたものよりも遙かに小さくて高性能なCPUが搭載されている筈である。大きさは数分の一になったのに性能は数十倍よくなったのだから、後10年もすれば米粒くらいのCPUが登場したとしても驚くべきことではないのかもしれない。実際、超大規模集積回路の更なる高集積化を実現するための研究が広く行われている。それでは、この超大規模集積回路の未来が順風満帆かというとてもそんなに単純ではなく、明るい未来を覆い隠す暗雲が進路上に立ちこめているようである。それは、超大規模集積回路を構成する半導体微細構造の作製技術が

日進歩急速に発達してきたのに対し、その作製精度や物理的特性の評価・測定技術に於ける性能の向上が遅れを取っているという現状によっている。どういことか。より微細な半導体微細構造を作製するにはしたが、果たして意図した構造とどれくらい誤差があるのか調べたいと思っても微細構造を見ることができないからわからない、というのだから困ったものである。取りあえず素子として動作しているから上手に作製できたのではないのでしょうか、では余りにも寂しいものがあると思いませんか。そういう訳で、今やナノメータースケールに微細化されていく超大規模集積回路の作製にはより高分解能の評価技術の確立が急務となっているのである。そこで今回お話しする我々が研究している半導体微細構造を視覚化する技術の登場となる訳である。従来使用されてきた評価手法も原理的には10nm程度の分解能は実現できる筈なのだが、その実現はどうもなかなか困難なようである。今後予想される半導体微細構造のサイズが分解能ぎりぎりとなってくると私などはどうにも心配になってきてしまう。その点我々が研究している半導体微細構造を視覚化する技術は原子分解能を持つことで知られている走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いているのでナノ・スケールの構造の観察はそれ程シビアなものでもないようだ。何せ意外なほどあっさりとナノ・スケールのシリコン微細構造をSTMで観察することができてしまったのだから。

さて、我々の研究は前述の通り走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いて行っているのだが、幾らSTMが一般に認知された技術となり、Oxfordの英英辞典に掲載されているとしても、STMって何ですか、という人がいるのは至極当然のことであるので簡単にでも説明しない訳にはいかないだろう。詳しいことが知りたい人は参考文献をひとつだけ紹介しておくのでそちらでお勉強していただくとして[1]、ここでは深い説明は行わないことにする。

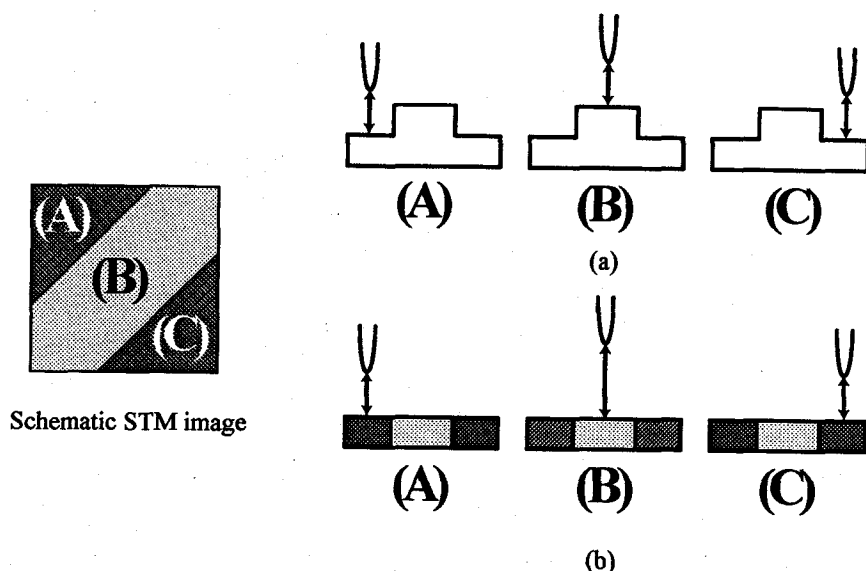


図1 何に起因してSTM像が得られるのか。(a)均質な試料の場合には表面の凹凸による。(b)均質でない試料の場合にはトンネル電流を一定にするために探針が上下することによる。

STMは電子のトンネル現象を利用して表面の凸凹、正確には電子状態の空間的变化を観察する技術

である。探針と試料の間にある電圧を印加し、両者を十分に近づけると接触する前に電流が流れる。これをトンネル電流と呼ぶ。このトンネル電流は試料-探針距離に大変敏感なので、トンネル電流を一定に保つようにして探針を走査すると、均質な試料の表面では探針が表面の凹凸を再現する軌跡を描くことになる(図1(a))。従ってSTMを用いて、表面のステップ、ピットやアイランドなどを原子スケールで観察することができるのである。ところが、探針の描く軌跡が常に表面の凹凸を反映しているかというともそうでもないのである。STMを用いて原子スケールで表面を観察して得られた像は表面での電子状態の空間的な変化を反映していることが知られている。例えば、GaAs(110)表面のように占有状態と非占有状態の観察で得られる凸凹像が変化するのが、これはもちろん表面の凹凸ではなくそれぞれの状態密度の空間的な変化の違いによっているのである。つまり、試料が均質でない場合にはトンネル電流を一定にするために試料-探針距離が場所によって変化するということである(図1(b))。そして、この電子状態の空間的な変化は原子スケールである必要は当然なくナノ・スケールのpn接合でもよい筈である。

実際、GaAs(110)表面でpn接合をSTMを用いて観察できることが知られているのだが[2,3]、シリコンの場合は多少の困難が伴うことになる。シリコンの清浄表面にはエネルギーバンドギャップ中にある表面準位が存在するのである。この表面準位にフェルミ準位がピン止めされるのでバルク内でp型とn型という異なる伝導型であっても表面では区別がつかなくなってしまうのである。そこでシリコンの場合には、表面を水素終端することで表面準位をエネルギーバンドギャップ中から除くという処理が必要になるのである。我々はこの処理をHCl:HF=19:1混合液を用いた化学エッチング処理で行っている[4]。具体的には、2分間混合液に浸すことで5nmの酸化硅素膜を除去し表面を水素終端するのである。これでいよいよナノ・スケールのシリコンpn接合をSTMを用いて観察する準備が整った訳である。

次に測定に用いた試料について簡単に説明しようと思う。この研究に用いた試料は現在作製されている半導体微細素子のひとつ、ショートチャンネルMOS素子の下地に近い構造になっているのである。まず5nmの酸化膜で覆われたp型Si(001)基板を用意し表面全面の不純物密度をBF₃を注入して高めた。その後、電子ビームで直接描画した帯状のレジストマスクで覆われた試料にAsイオンを注入することで150nm幅のpn接合を作製した。そして、熱処理を800℃で30分行い注入不純物をキャリアとして活性化しているのであるが、p型とn型領域でキャリア密度はそれぞれおよそ 10^{17}cm^{-3} と 10^{20}cm^{-3} 程度になると考えられる。従って、空乏層はp型領域にのみ広がるもののp型領域の全面を覆うことにはならないのである。つまり試料表面はn型領域、p型領域と空乏化したp型領域の3つの領域から成ると考えられるのである。このような試料を前述の化学処理の後STMで観察したのである。

図2に示すのは様々な測定バイアス電圧でのシリコン・ナノpn接合のSTM像である。測定条件は全て走査範囲が270nm×270nm、トンネル電流が0.2nAで一定であり、測定バイアス電圧のみが変化されている。STM像はそれぞれ測定バイアス電圧の値が正の場合には非占有状態を、負の場合には占有状態を観察した結果である。すべてのSTM像はほぼ同じ場所で測定されたものである。

御覧いただければ一目瞭然であるが、測定バイアス電圧を変化させると得られるSTM像が劇的に変わることがわかる。この強い測定バイアス電圧依存性はSTMで観察された結果が試料表面の凸凹ではなく電気的特性の空間的な変化を反映したものである確かな証拠のひとつである。従って、トンネル電流を

一定に保つためにSTM像の暗い領域では明るい領域よりも探針が試料に近付いている、或いは、暗い領域は明るい領域よりもトンネル電流が流れにくい領域であると言える。そして、測定バイアス電圧依存性から大別して3つの異なる電気的特性をもつ領域があることが見てとれる。前述の試料構造から、模式図に示した領域A、B、Cがそれぞれn型領域、p型領域と空乏化したp型領域であると考えられる。また、領域AとBがn型領域とp型領域として測定バイアス電圧依存性に於ける両者の明暗反転を説明できることが示されている[5]。そして、より興味深いのは領域C則ち空乏領域が測定バイアス電圧を変化すると伸縮する様子が見て取れることである。この空乏層の伸縮は測定バイアス電圧の真空ギャップと半導体へ印加比がp型とn型領域で異なることに起因したものである。このように、STMを用いることでナノ・スケールのシリコンpn接合を視覚化し、明確にp型とn型及び空乏層を区別することができるのである。

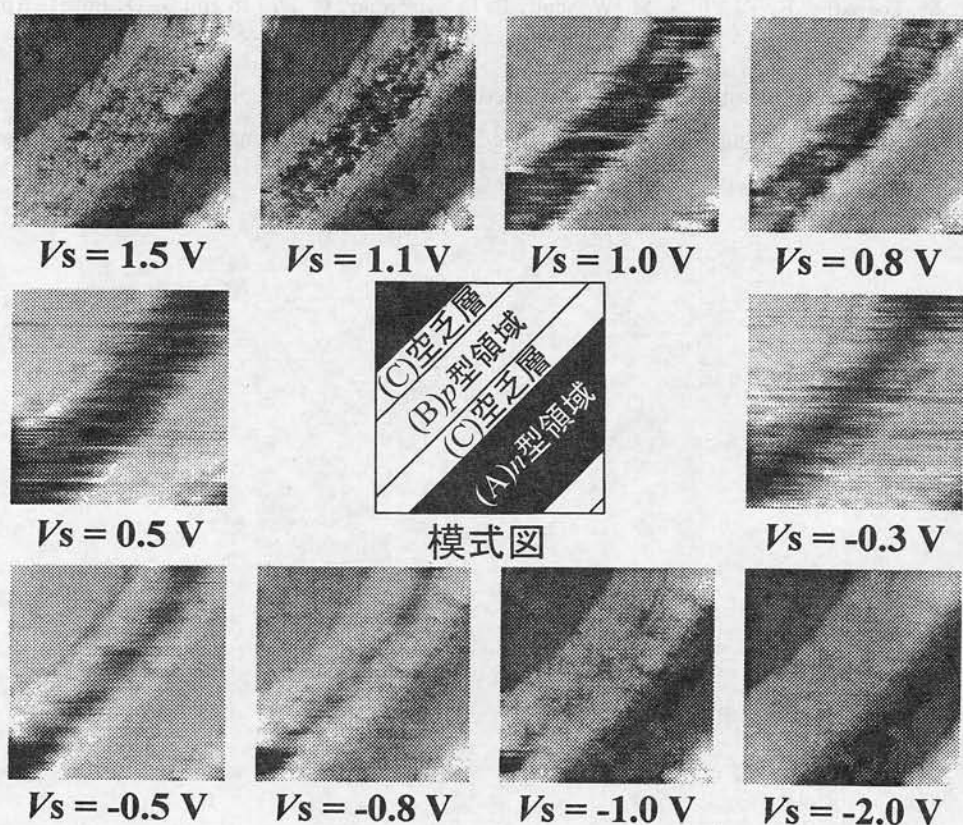


図2 Si(001)表面にイオン注入法により作製したナノ・スケールpn接合のSTM像。走査範囲：270 nm x 270nm。トンネル電流：0.2 nA。測定バイアス電圧(V_s)が変化するとSTM像も大きく変化する。

結論として、p型とn型及び空乏層をナノメートルのオーダーで区別することができるので、今後より微細化されていく半導体構造の空間的・電気的特性の評価技術として走査型トンネル顕微鏡(STM)を利用できると言える。STMには今回示した以外にも探針-試料間の電流電圧特性を調べることで試料の電気的特性を知ることができるなどの利点がある。実際、我々は既にイオン注入法で作製した

pn 接合のアニール時間依存性や pn 接合に外部電圧を印加したときの効果をSTMで観察し始めているので、STMが実際の半導体素子評価に使われる日がそう遠くない未来にやって来るのかもしれない。そうすると、ポケットサイズのスーパーコンピュータが登場したりするのだろうか。私としては、頭に浮かんだ文章がそのまま印字される機械が登場してくれたほうが今回のような場合楽なのであるが。未来を想像するのは容易だが創造するには多くの研究が必要なようである。

参考文献

- [1] J. A. Stroscio and W. J. Kaiser, Scanning Tunneling Microscopy, Methods of Experimental Physics volume 27 (Academic Press, Inc., San Diego, California, 1993).
- [2] P. Muralt, Appl. Phys. Lett. **49**, (1986) 1441.
- [3] R. M. Feenstra, E. T. Yu, J. M. Woodall, P. D. Kirchner, C. L. Lin and G. D. Pettit, Appl. Phys. Lett. **61**, (1992) 795.
- [4] Y. Morita and H. Tokumoto, Appl. Phys. Lett. **67** (1995) 2654.
- [5] H. Fukutome, S. Hasegawa, K. Takano, H. Nakashima, T. Aoyama and H. Arimoto, Appl. Surf. Sci. (1998) in press.