

次世代のデバイス開発に向けて

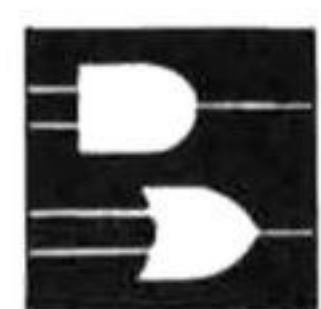
——小田研究室～電子物理工学科——



小田 俊理 助教授

現代は情報化社会であるといわれている。普段意識していなくても、私達はその恩恵を受けている。この情報化社会はトランジスタやICといった半導体デバイスの発達に支えられてきた。しかし、今後ますます増大するであろう情報量に対応する

ためには、より性能のすぐれたデバイスの開発が必要となる。今回は、新しい原理に基づいた次世代のデバイスの開発をめざして研究を行っておられる電子物理工学科の小田助教授の研究室を訪れ、お話を伺った。



現在の半導体デバイスの限界

新しい原理に基づくデバイス開発が必要になる背景には、従来の半導体デバイスの持つ本質的な限界がある。トランジスタが発明され、その理論が確立されてから40年余りになるが、その間に半導体デバイス技術は大きな進歩を遂げてきた。なかでもめざましいのが、現在でも3年で4倍になるといわれている高集積化の技術である。

集積度を上げるためには、トランジスタ・抵抗などの回路を構成する素子を同一面積内にできるだけ多く配置しなければならない。必然的に素子の大きさは小さなものとなる。その結果、単に多数の素子を配置できるだけでなく、電子の移動距離が短くなることにより高速な動作を行わせることが可能になる。また、回路全体の配線の長さも短くなるため、配線部分での電力消費が抑えられて、全体の消費電力も減少する。このように、高集積化によってデバイスの高性能化も図れるのである。現在は、1メガビットのDRAM(内

部記憶保持回路を持たない読み書き可能メモリ)の場合、1cm四方に最小寸法(素子設計の精度)1ミクロン程度の素子を200万～300万个集積することができるようになっている。また、西暦2000年には、最小寸法0.2ミクロン程度の素子を集積できるようになるであろうとさえいわれている。

しかし、このような高集積化にも限界がある。まず考えられることは素子の小型化に伴う加工や配線の困難といった技術的な制約である。しかし、これは技術革新によってこれまでも克服されてきており、本質的な限界ではない。より本質的な限界は、従来の理論に基づくトランジスタの小型化が不可能になることである。

トランジスタなどの半導体デバイスは、図1のような半導体のPN接合が動作の基本になっている。このとき、P型半導体とN型半導体の接合面付近には空乏層と呼ばれる電気抵抗の大きい領域ができる。空乏層

の厚さは半導体に添加する不純物の量などによって変化するが、現在利用されているものでは0.1~0.2ミクロン程度であるといわれている。これ以下の寸法になると空乏層だけの状態になり、トランジスタとしての機能は失われる。

そこで、不純物の量を調節して空乏層を薄くすることが考えられる。しかし、空乏層が薄くなると、電子が空乏層をすり抜けてしまうのである。これは、トンネル効果と呼ばれているものの一種なのだが、こうなると常に導通しているのと同じ状態で、デバイスとしての機能を果たさなくなる。

結局、現在のトランジスタの理論に基づくデバイスでは、これ以上性

能を向上させることは難しい。そのため、新しい原理に基づくデバイスの開発が必要になる。小田研究室では、このようなデバイスに関するさまざまな研究が行われている。

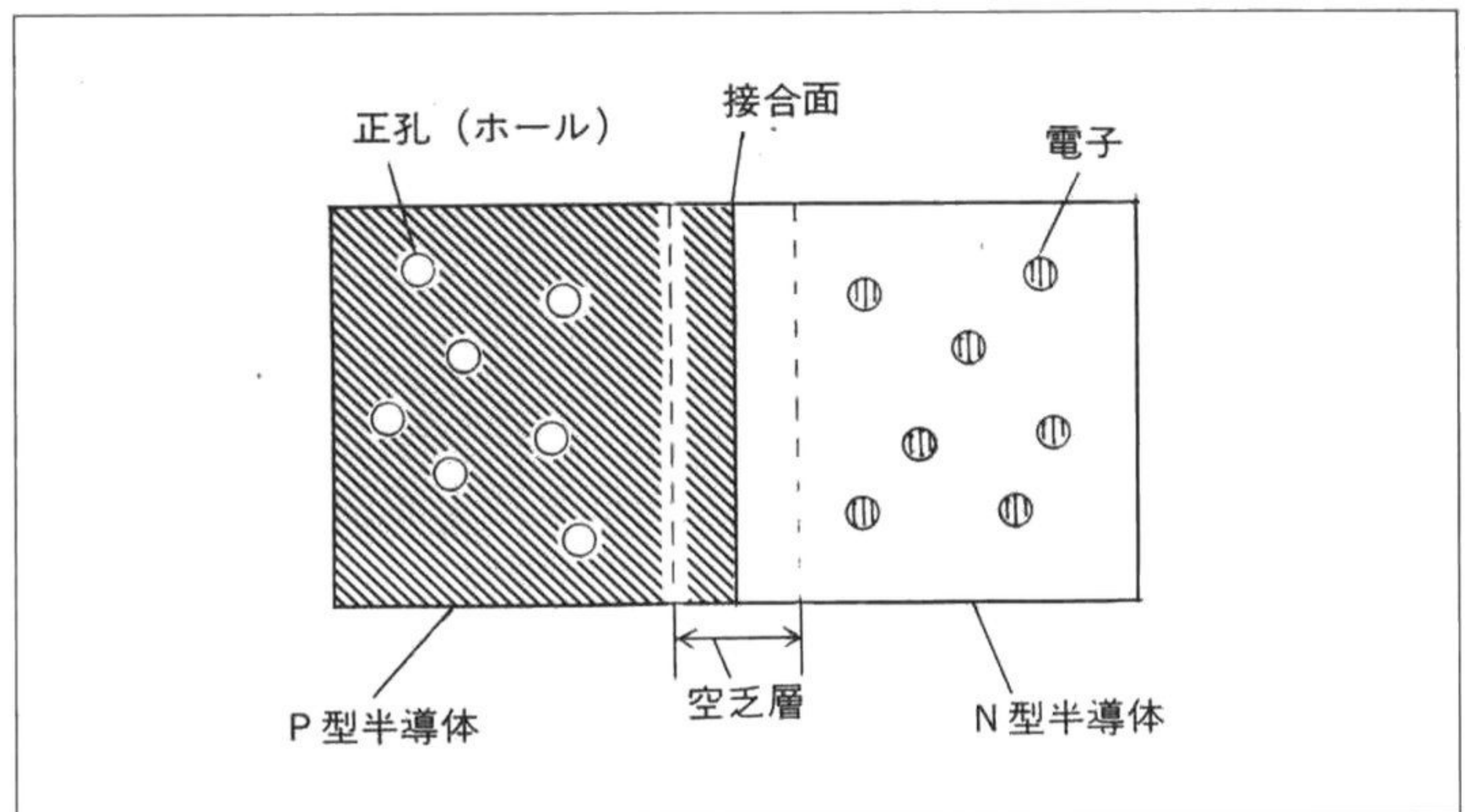


図1 半導体のPN接合と空乏層

量子細線による量子効果デバイス

小田研究室の研究テーマの1つに量子効果デバイスがある。電子には粒子としての性質と波としての性質がある。電子の波動性によって起こる現象を量子効果という。トンネル効果は量子効果の1つである。素子を小型にしていくと、電子の波動性が強くなるため、量子効果の影響を受けることになる。この量子効果を積極的に利用していこうというのが量子効果デバイスである。小田研究室では、量子効果デバイスを実現するための構造の1つとして、量子細線に注目している。

半導体を電子のド・ブロイ波長以下のごく細い線状に加工したものを量子細線という。通常の結晶中では電子は連続的なエネルギー状態をとることが可能である（図2-a）。ところが、量子細線中では、量子効果のためにエネルギー分布が離散的になる（図2-b）。そのため、電流と電圧の関係が非線形的になるなど、通常

とは異なった現象が起こることが予想される。しかし、量子細線についてはまだ未知の部分が多いため、現在は量子細線を作成して、そこで起こる現象を調べている段階だそうである。

量子細線を作成するためには、ナノメートル単位の非常に精密な加工を行わなければならない。小田研究

室では、超高速エレクトロニクス研究棟の電子ビーム露光描画装置を利用してこのような精密な加工を行っている。

ICの基板にパターンを描くために、普通は光が利用される。光の代わりに電子ビームを利用してパターンを描いていくのが電子ビーム露光描画装置である。電子ビームは、焦

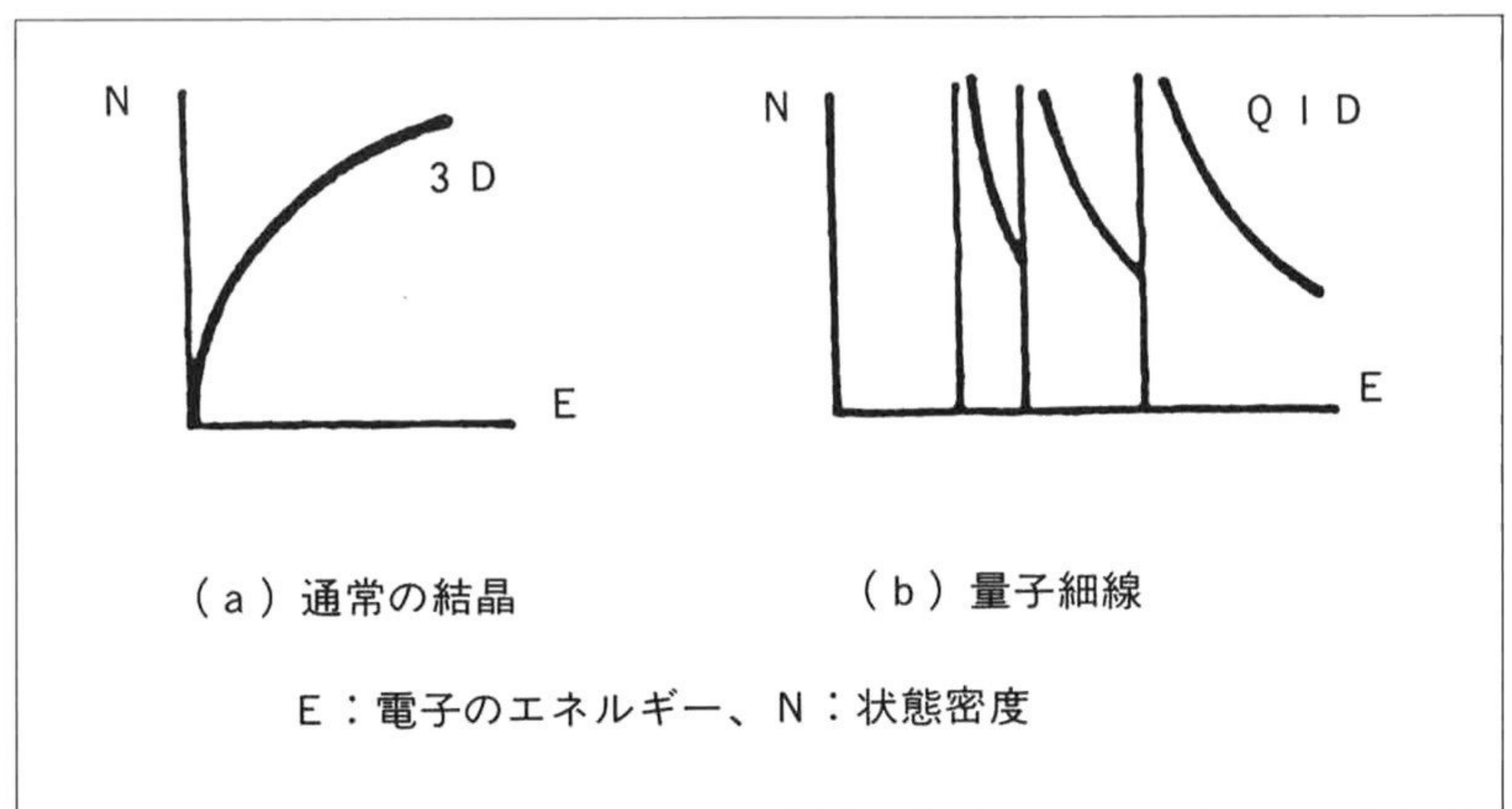


図2

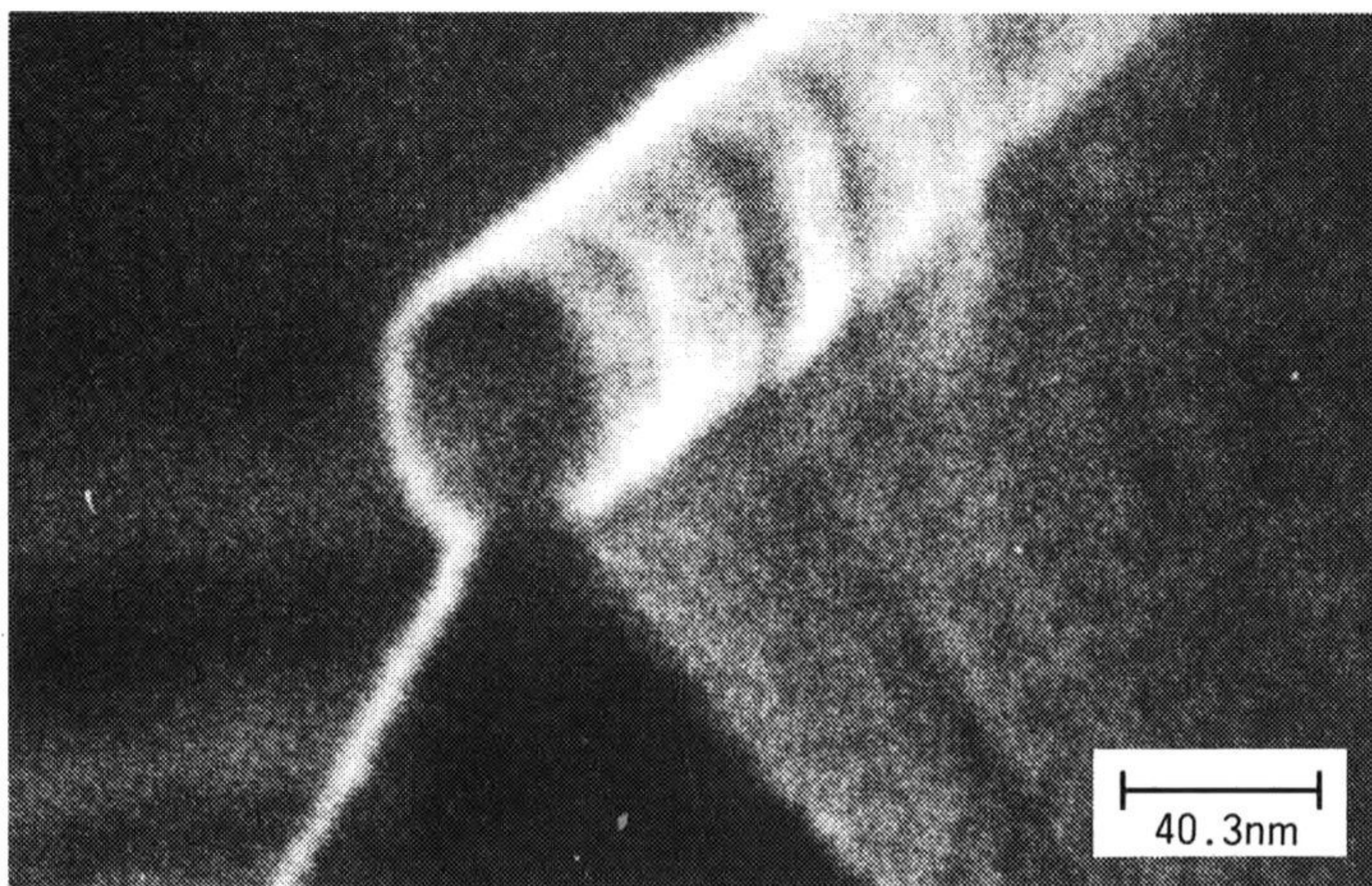


図3 作成された極微細線

点を非常に細く絞り込むことができる。電子ビーム露光描画装置は、この細く絞り込んだ電子ビームをコンピュータで制御してやることで、基板上に光を使うよりはるかに精密なパターンを作成していく。この装置を利用して実際に作成された極微細線を図3に示す。

高温超伝導体薄膜とデバイス応用

小田研究室では、高温超伝導デバイスに関する研究も行われている。最近まで超伝導現象は、絶対零度に近い極低温でしか起こらないと考えられてきた。このような極低温を実現するには冷却用に高価な液体ヘリウムを使わなければならない。そのため、超伝導現象はごく限られた分野でしか応用されていなかった。ところが、数年前に液体窒素温度以上で超伝導性を示す物質が発見され、高温超伝導に関する研究が盛んに行われるようになった。液体窒素は安価で容易に得ることができるため、超伝導の応用への可能性は広がることになる。

この物質は、イットリウム・バリウム・銅・酸素の化合物で、図4に示すように複雑な構造をしている。現在このような超伝導体は多結晶体の形で得られる。しかし、デバイスとして応用できるようにするためには、超伝導体の単結晶薄膜を基板上に成長させなければならない。ところが先にも述べた通り、超伝導体の結晶は複雑な構造をしているため、大面積の単結晶薄膜を均一に成長さ

せることは非常に難しいのである。

小田研究室では、原子層エピタキシーと呼ばれる方法を用いて超伝導薄膜を成長させる研究が行われている。これは、1原子層ずつ結晶を成長させていく方法で、原料の供給をコントロールすることにより、複雑な構造の超伝導体の薄膜をうまく成長させようというものである。まだ完全な超伝導薄膜は得られていないが、少しずつ成果は出てきているそうである。

また、これと並行して超伝導体を蒸着して得られる薄膜を用いて、デバイスとして加工する研究も行われている。超伝導デバイスとしては、ジョゼフソン接合を用いたものが代表的である。ジョゼフソン接合とは図5のように、超伝導体の間に薄い絶縁体などをはさみ込むことにより電流の流れにくい部分を作ったものである。この部分に電流を流すと、電流が弱いときは接合部に電圧は現れず、電流が強くなると接合部に電圧が現れるようになる。この現象を利用して、デバイスとしての動作を行わせることができる。小田研究室

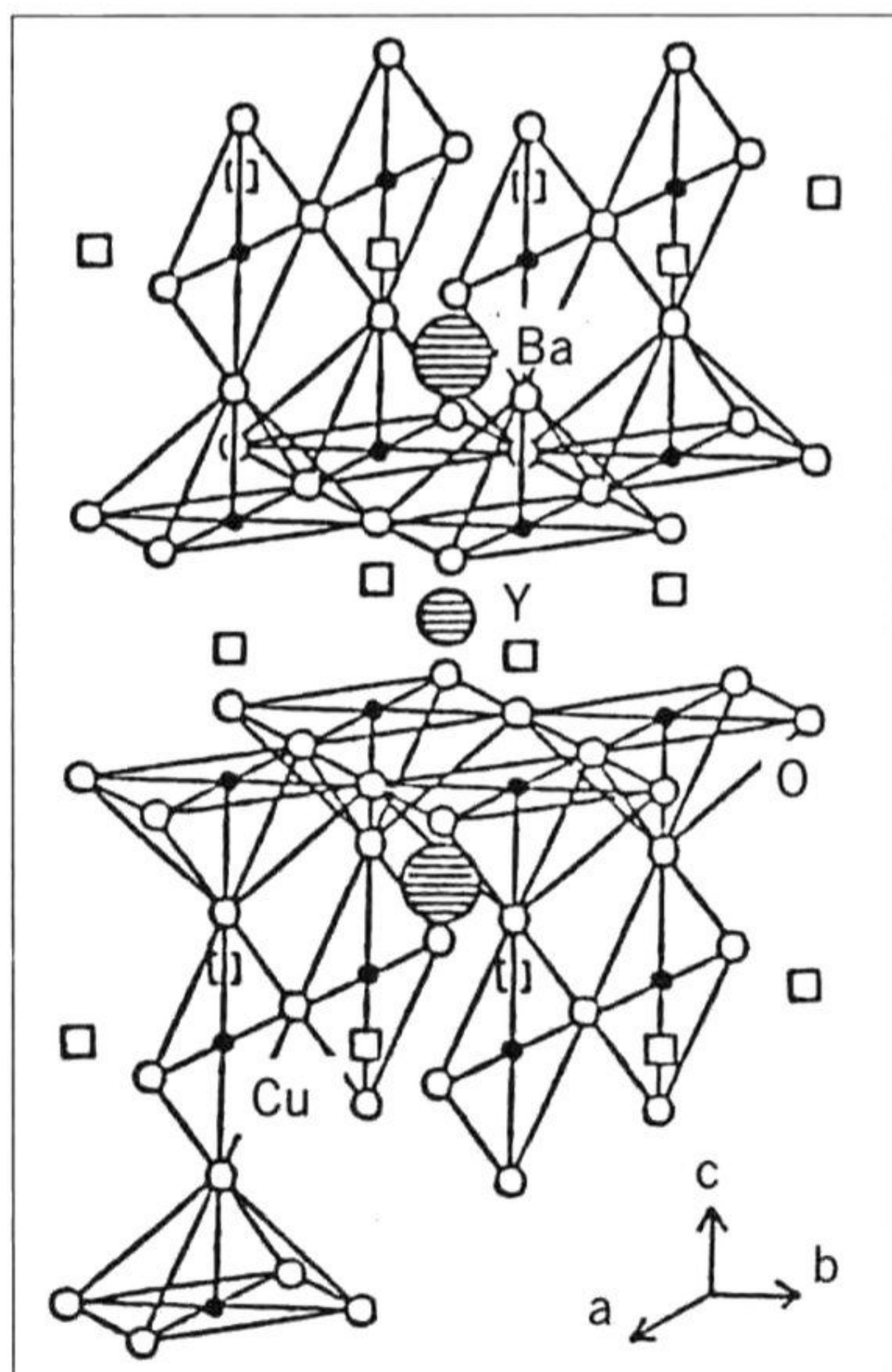


図4 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超伝導体の結晶構造

では、極微細加工でこのような構造を作成し、超伝導デバイスを実現するための研究を行っている。また、最近では、超伝導体と絶縁体を層状に積み重ねて、その相互作用を利用したデバイスの研究も始められたそうである。

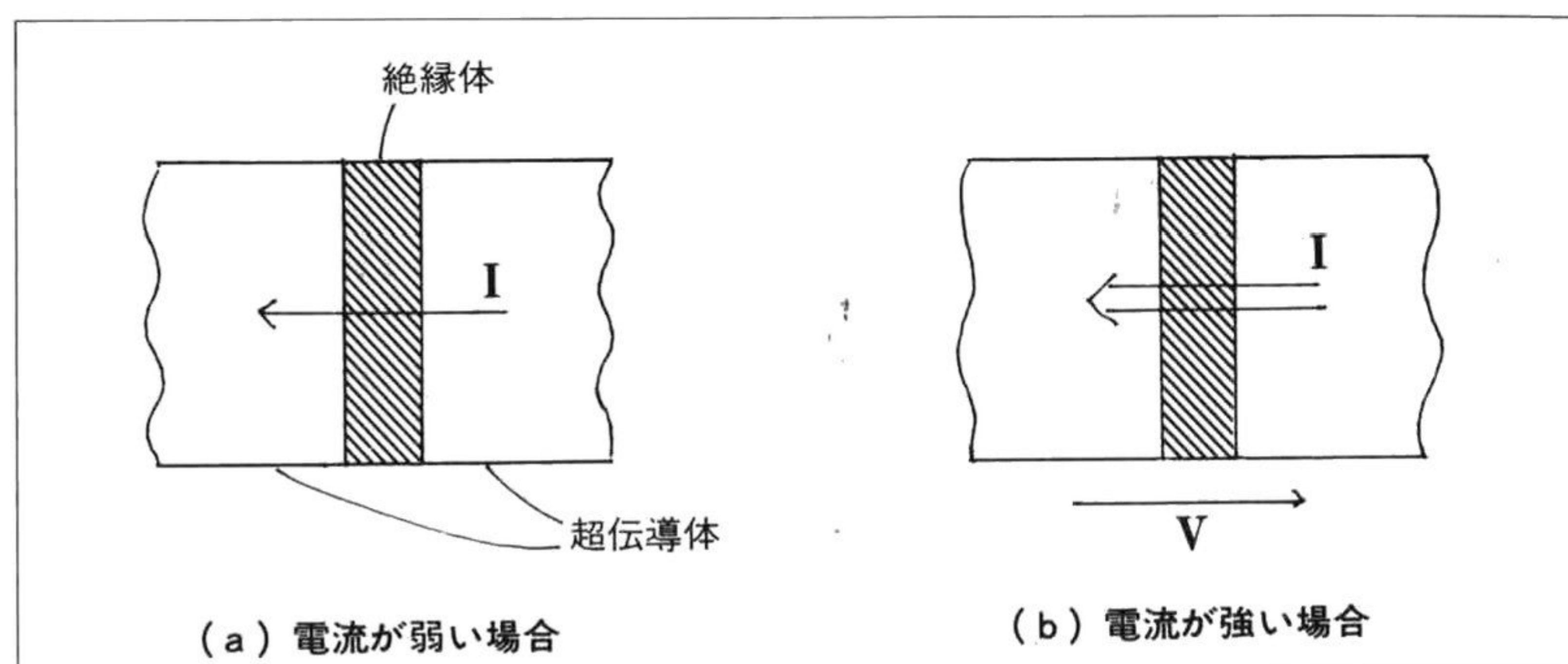


図5 ジョゼフソン接合の原理

B アモルファス/マイクロクリスタルSiの可能性

最近注目されている材料に、アモルファスSi（以下、a-Si）がある。a-Siは、単結晶Siのような規則正しい結晶構造を持たず（図6-a）、低温で大面積の薄膜を成長させることができる。このため、太陽電池や液晶ディスプレイ用のTFT（薄膜トランジスタ）に利用されている。またa-Siと単結晶Siの中間的な材料として、マイクロクリスタルSi（以下、 μ c-Si）という、a-Si上にSiの微小単結晶が点在した構造（図6-b）のものがある。 μ c-Siは単結晶Siとa-Siの両方の性質を合わせ持っていると考えられており、太陽電池や液晶ディスプレイ用TFTの性能を向上させたり、ULSI（現在のものよりさらに集積度を高めたLSI）の積層化などへの応用が考えられている。さらに、微小単結晶の大きさをコントロ

ールできれば、量子効果デバイスにも応用できるのではないかと期待されている。

a-SiはプラズマCVD法によって生成される。これは、 SiH_4 （シラン）の気体を放電によってプラズマ状態にし、a-Siの薄膜を成長させる方法である。放電させるためには、通常は10MHz程度の高周波が用いられるが、小田研究室では、それよりさらに高い144MHz程度の高周波を用いたVHFプラズマCVD法の研究が行われている。これにより、 μ c-Siを生成するのに非常に適した性能が得られるそうである。また、少しずつ薄膜を成長させながら加工を施していくデジタルCVDと呼ばれる方法の研究も行われているそうである。まだ課題は多いが、将来が楽しみな研究であるといえるだろう。

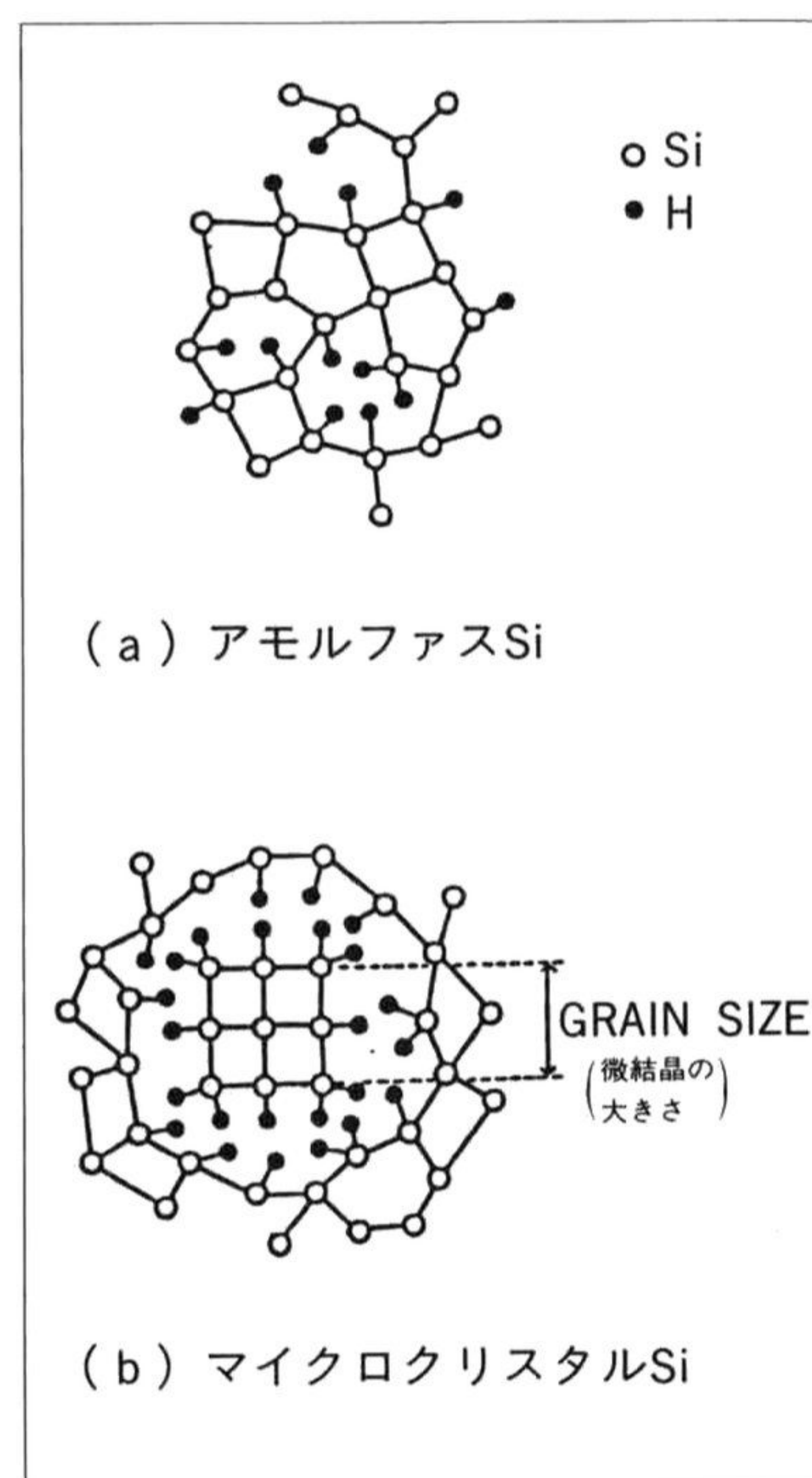


図6

「これからの研究は、1つの専門分野だけではなく、いろいろな分野間の交流が必要になってくると思います。だから、これから勉強をする皆さんは、専門分野ばかりでなく、少し頭を柔軟にして別の分野にも目を向けた方が幅も広がるし、新しい研究の道もひらけるのではないでしょ

うか。」取材の終わりに、小田助教授はこのような話しておられた。

最後に、お忙しいなかを取材にご協力いただいた小田助教授をはじめとする研究室の方々に心からお礼を申し上げます。

（佐々木）