

量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究 Study of single electron quantum dot floating on liquid helium surface for development of qubit

池上弘樹

Hiroki Ikegami

理化学研究所・中央研究所

RIKEN

概要: 液体ヘリウム液面にトラップされた電子を量子ビットとして利用するという提案がある。ヘリウム表面には不純物が全く存在しないこと、電子はヘリウム表面上の真空中に浮かんでいることにより、デコヒーレンス時間が非常に長くなることが予想されている。この量子ビットの実現には、ヘリウム薄膜上トラップされた単一電子を $1\mu\text{m}$ 程度の狭い領域に閉じ込める技術を確立すること、および閉じ込められた電子の性質の解明が不可欠であり、本研究の目的である。本研究では、幅 $15\mu\text{m}$ および $5\mu\text{m}$ の一次元伝導チャネルを実現し、ヘリウム薄膜上に電子を安定にトラップする技術の確立、および伝導度を精度良く測定できる電極の開発を行なった。特に $5\mu\text{m}$ チャネルにおいては、幅方向が有限サイズである影響がウイグナー結晶への転移に現れるということを明らかにした。これらをもとに、単一電子の閉じ込めは技術的に可能であるという結論を得た。

【研究のねらい】 量子コンピューターの実現に向けた研究が近年活発に行われている。その基本素子である量子ビットとして多くの提案がなされているが、その中でもとりわけユニークなものとして、液体ヘリウムの表面にトラップされた電子を利用するというものがある[1, 2]。電子を液体ヘリウム表面に近づけると、ヘリウム中にできる電子の鏡像電荷のため、電子は液面からの距離に反比例した引力ポテンシャルを感じ、ヘリウム表面にトラップされる。そのため液面に垂直方向の運動は量子化され束縛準位 (Rydberg states) ができる。その基底状態 ($|0\rangle$) と第一励起状態 ($|1\rangle$) を量子ビットとして利用するというものである。準位間の遷移はマイクロ波の照射により行われる。また操作しやすいように、ヘリウム薄膜下 (膜厚 $1\mu\text{m}$ 程度) に作

られた電極により、電子は $1\mu\text{m}$ 程度の面内領域に閉じ込められている必要がある。

この系の最大の特徴は、電子は孤立しデコヒーレンス時間は非常に長くなると予想されているという事である。これは、液体ヘリウム表面は不純物が全く存在しない清浄表面であること、また電子はヘリウム表面上の真空中に浮かんでいるということに因る。また、ヘリウム上の2次元電子系はクリーンで単純

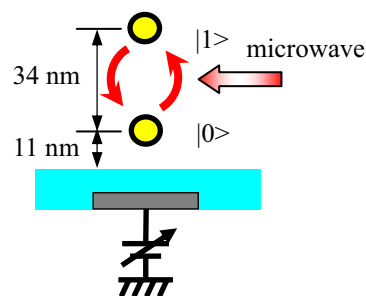


図1 ヘリウム表面上の電子を利用した量子ビットの模式図

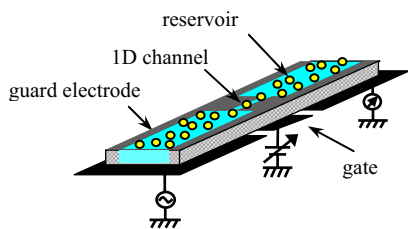


図2 1次元チャンネル伝導度測定用電極の模式図

なシステムであるため実験と理論の一致が非常に良く、その性質は良く理解されている。そのため、実験的に取り扱いづらい対象ではあるものの、量子コンピューターの黎明期である今日では、量子物理の基礎研究を行う上で、あるいは量子コンピューターの実験的問題点を洗い出す上で恰好の研究対象である。

しかしながら、ヘリウム上の電子を用いた量子ビットは実現されていない。その実現には、ヘリウム薄膜上の電子を $1\ \mu\text{m}$ 以下の面内領域に閉じ込める技術の確立、単一電子の量子状態を検出する技術の確立、マイクロ波により電子の量子状態をコントロールする技術の確立など克服すべき課題がある。しかしこれらの課題は、最先端の技術もって一歩ずつ確実に歩んでゆけば克服可能なものであり、十分に追求する価値のあるシステムである。

本研究の目的は、量子ビット実現に不可欠な、ヘリウム液面上の単一電子を $1\ \mu\text{m}$ 以下の狭い領域に閉じ込める（量子ドット）技術を確認すること、および閉じ込められた電子の性質を解明することである。

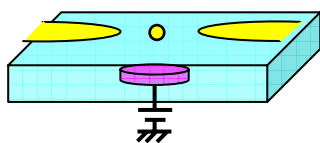


図3 単一電子の閉じ込め

【研究方法】 本研究では第一目標として、一方向のみ閉じ込めた一次元伝導チャンネル（図2）のみを実現し、その伝導特性の解明をおこなう。一次元伝導チャンネルを実現することは、狭い領域に電子を閉じ込めるための基礎技術の確立として重要である。まずはチャンネル幅が広い電極を作製することにより、液体ヘリウム上に電子を安定に蓄えるテクニックを身につけ、その後、チャンネル幅を細くしていくという方針で研究を進める。また、閉じ込められた電子は興味深い性質を示す可能性があり、その性質を解明しつつ研究を進める。このことは、電子が予想通り閉じ込められていること、測定に問題が無いことの検証にもなる。

その後、第二目標として、一次元伝導チャンネルの途中で量子ドットを埋め込んだシステム（図3）を構築することを目指す。量子ドットを介した伝導度を測定することにより、量子ドット中の電子の特性の解明をする。これらの情報をもとに、より現実的な量子ビットのデザインや、量子状態の読み出し方法などを新たに提案することが第三の目標である。

【研究成果】

1. 1次元チャンネル伝導度測定用電極の開発

本研究では、まず1次元チャンネルに閉じ込められた電子の伝導度の測定技術の確立を目指した。図2の模式図にあるように、電極は2層構造になっており、下側電極は伝導度測定用、上側電極は電子を面内に閉じ込めるためのものである。電極には溝が掘ってあり、そこに毛管凝縮した液体ヘリウム上に電子を蓄える。2層間の絶縁体には、本研究の初めの段階では、加工が比較的容易なフォトレジストを使用した。しかしフォトレジストを用いた電極は、室温と低温の間の熱サイクルに

弱く、電極の安定度、データの再現性において問題があった。また電極によっては、電子が液体ヘリウム上からゆっくり逃げていくものもあった。そこで絶縁体を SiO_2 に変えて電極を作製することにした。 SiO_2 を用いるとプロセスは複雑になるが、 SiO_2 の熱収縮率は金属に近いので熱サイクルに対して安定であると予想される。ここでは、 SiO_2 を用いた電極で得られた結果のみを示す。

図4に SiO_2 を絶縁層として作製したチャンネル幅 $15\mu\text{m}$ の電極を示す。電極は2層構造になっており、下側電極は伝導度測定用、上側電極は電子を面内に閉じ込めるためのものであり、アルミニウムでできている。電極には幅 $15\mu\text{m}$ の溝が掘ってあり、そこに毛管凝縮した液体ヘリウム上に電子は蓄えられる。 SiO_2 膜はプラズマ CVD で作製した。溝構造

部分の作製には Reactive Ion etching(RIE) を用いた。RIE では SiO_2 のみ選択的にエッチングされ、アルミニウムはエッチングされない。そのため、上側電極 (アルミニウム) が無い所だけ SiO_2 が除去され溝構造が出来る。

図4 (b)の中心部分が1次元チャンネルである。図4 (b)でチャンネルの両側にあるチャンネルに垂直な10本程度の溝は、下側電極と電子系との結合を強くするための、いわばアンテナの役割を果たす。下側電極の中心部分にはゲート電極が作られている。ゲート電極にかけるバイアスでゲート電極上の電子密度をコントロールすることが可能であり、またこれによりチャンネルを流れる電流の大きさを制御することが出来る。

電子は電極より 3mm 上に取り付けられているタングステン・フィラメントを瞬間的に加熱することにより放出され、下側電極に正のバイアスを印加することによりヘリウム上にためることが出来る。上側電極には負のバイアスが印加されており、電子はチャンネル中に閉じ込められる。測定した電極全てにおいて、測定を行なっている間 (~数日間) には、電子は逃げていくことは無かった。また、室温と低温の往復を何度か繰り返した後でも問題なく測定でき、熱サイクルに対し安定であることが実証できた。本研究では、幅 $15\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$ のチャンネルを作製し測定した。

2. 幅 $15\mu\text{m}$ の1次元チャンネルの伝導度

幅 $15\mu\text{m}$ のチャンネル中を流れる電流のゲート電圧依存を図5に示す。ゲート電圧を負の方向に振っていくと、ゲート上から電子がいなくなり電流はあるゲート電圧で遮断される。すなわち、電界効果トランジスタと同様に流れる電流の大きさを制御することができる。また、遮断ゲート電圧 (V_G^0) の大きさ

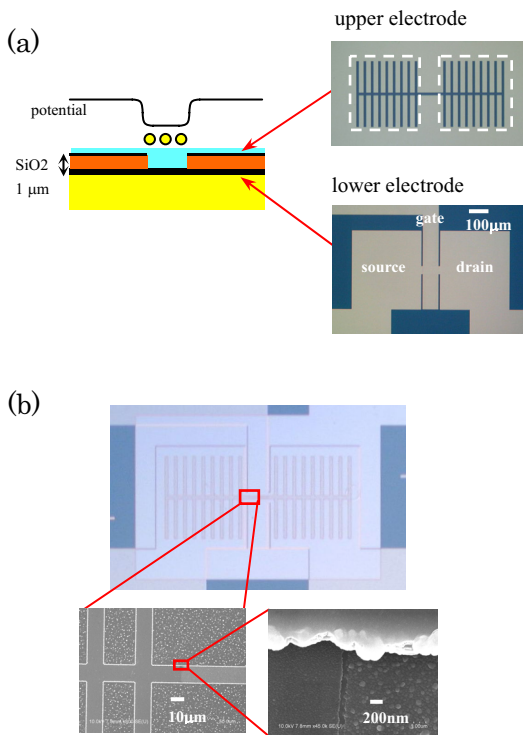


図4 (a)電極構造。(b)チャンネル幅 $15\mu\text{m}$ の電極の写真。

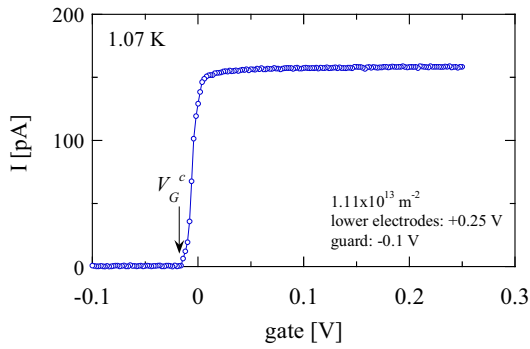


図5 15 μm チャンネルを流れる電流のゲート電圧による制御。

から、電子密度 (n) を決定することが出来る。

次に、幅 15 μm チャンネル中の電子の抵抗の温度依存性を図6に示す ($n=1.14 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$)。温度を下げていくと電気抵抗は減少し、約 0.75K 以下で急激に上昇することが観測された。

バルクヘリウム上の電子では、電子の移動度は 1K 以上ではヘリウムガスとの散乱、1K 以下ではリプロン (ヘリウム表面波) でリミットされることが知られている。これらの散乱体の密度は温度の低下とともに減少するため、低温では抵抗は小さくなる。これらヘリウムガスおよびリプロンとの散乱を取り入れたバルクヘリウム上の電子の抵抗の理論曲線 [3]を図6に示す。理論曲線は2倍程度のファクターを掛けることにより高温部分の実験データを完全に再現することができる。

バルクヘリウム上の電子は低温では、電子間の強いクーロン斥力のため電子自身が結晶を組んだウィグナー結晶(図7)に転移する。転移温度は電子密度で決まり、クーロン相互作用と運動エネルギーの比 Γ (プラズマ・パラメーター) が約 130 になった時に起こることが知られている ($\Gamma=U/K$ 、クーロン相互作用 $U=e^2\sqrt{\pi}\sqrt{n}/4\pi\epsilon_0$ 、運動エネルギー $K=k_B T$)

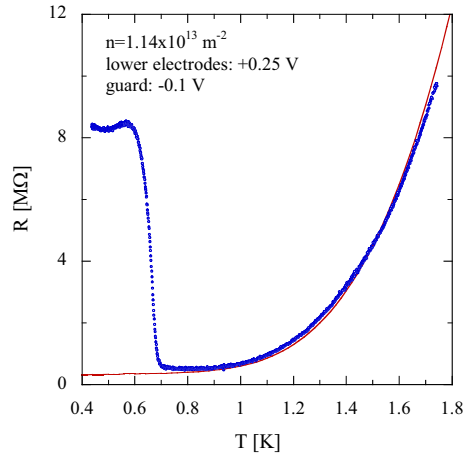


図6 15 μm チャンネルにおける抵抗の温度依存性。赤線は理論曲線[3]。

[4]。図6の0.75K付近の抵抗の上昇は $\Gamma \sim 130$ と対応しており、ウィグナー結晶への転移であると考えられる。ウィグナー結晶相では電子は局在するため、ヘリウム表面を局所的に押す。そのためヘリウム表面には、電子の格子の周期に対応した周期的な凹凸 (dimple lattice) が出来る (図7)。ウィグナー結晶を水平に動かすと電子は dimple lattice を引きずって動き、電子の有効質量は大きくなるため抵抗は増大する。バルクヘリウム上では転移の際に抵抗の不連続なジャンプが見られるが[5]、15 μm チャンネル中では転移はシャープではあるが不連続なジャンプは見られない。チャンネル幅方向の有限サイズの影響が出てきたためと考えられる。

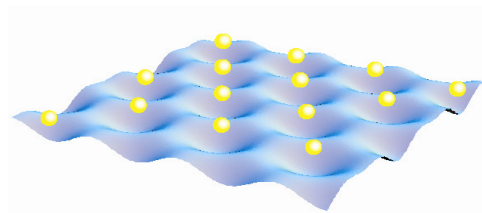


図7 ウィグナー結晶。電子は局在するのでヘリウムの表面には周期的な凹凸 (dimple lattice) が出来る。

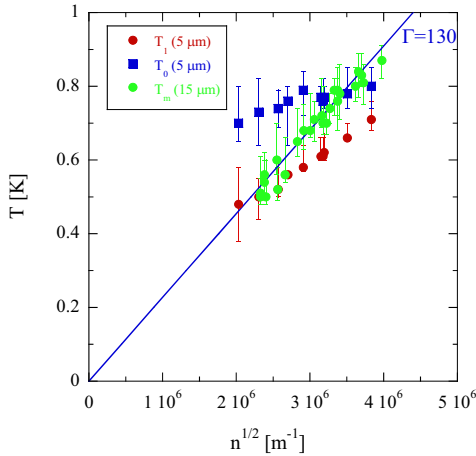


図8 15 μm チャンネルにおけるウィグナー結晶 (T_m) の密度依存、および 5 μm チャンネルにおける T_0 、 T_1 の密度依存。

ウィグナー結晶転移温度(T_m)の密度依存性を図8 (緑色の●) に示す。どの密度においてもウィグナー結晶転移はバルクヘリウム上の電子と同様に $\Gamma\sim 130$ で起こる。すなわちチャンネル幅方向が有限サイズであることの転移温度に対する影響は小さいことがわかる。

測定を行なった密度領域ではチャンネルの間に電子が30~50個存在し、チャンネル幅の影響が現れるためには、チャンネル幅はまだ大きすぎると考えられる。しかしながら、抵抗の高温部分の温度依存性がバルクヘリウム上の電子に対する理論でよく再現できること(図6)、およびウィグナー結晶転移温度がバルクヘリウム上の電子のものと一致すること(図8)から、開発された電極による抵抗測定は信頼できるものであり、さらに細いチャンネルに対しても信頼できるデータが得られるであろうと結論できる。

3. 幅 5 μm の 1 次元チャンネルの伝導度

図9に幅 5 μm チャンネル中の電子の抵抗の温度依存性を示す。図には 15 μm チャンネル中の抵抗(電子密度に近いもの)も比較のために示してある。高温部分の温度依存は 15 μm

チャンネル同様、ヘリウムガスおよびリプソンの散乱で説明できる。

一方低温では、幅 5 μm チャンネルの抵抗はバルクのウィグナー結晶転移温度よりも高温からゆっくり上昇しはじめ、バルクのウィグナー結晶転移温度付近から急激に大きくなる。抵抗が極小になる温度を T_0 、急激に大きくなる温度を T_1 (急激に大きくなり始める温度の目安として、低温部分の抵抗の温度依存を外挿して極小を通る水平線と交わる温度を採用) として、これらの電子密度依存を図8に示す。密度が小さくなるにしたがって、 T_0 は $\Gamma\sim 130$ から高温側にずれていき、また T_0 と T_1 の差は大きくなる。

T_0 、 T_1 をプラズマ・パラメーターに変換しチャンネル間にある電子の個数 ($n^{1/2}W$) に対しプロットしたものを図10に示す。5 μm チャンネルでは、チャンネル間の電子数が小さくなると、 T_0 、 T_1 のプラズマ・パラメーターはともに減少し、また2つの差は開いていくことがわかる。一方、高密度側は、 $\Gamma\sim 150$ あたりに収束しそうである。本来はバルクの値 $\Gamma\sim 130$ に収束すべきであり、実際に 15 μm チャンネルでは $\Gamma\sim 130$ である。5 μm チャンネルに関して

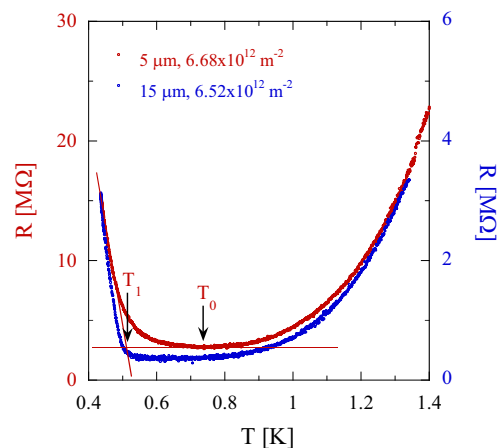


図9 チャンネル幅 5 μm (赤) における抵抗の温度依存性。比較のために幅 15 μm の結果 (青) も示す。

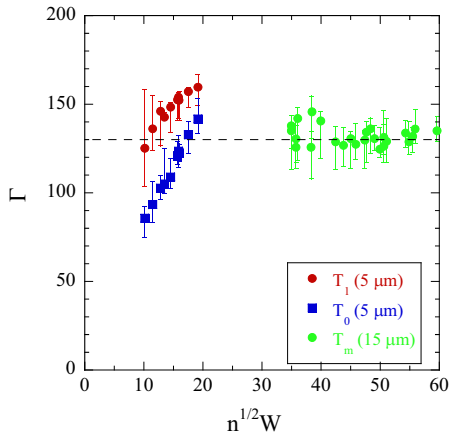


図10 プラズマ・パラメーターの密度依存。横軸はチャンネル間にある電子のおおよその個数を表す。

は電子密度の見積りに問題がある可能性があり、今後詰めていく必要がある。

以上の5 μm チャンネルの実験結果は以下のように解釈できる。ウィグナー結晶への転移は、dislocation 対の束縛による Kosterlitz-Thouless 転移で理解されている。転移温度より高温で短距離の相関ができて、温度が下がるにしたがって相関長はのびる。相関長が無限大になった時にバルク上ではウィグナー結晶転移する。チャンネル中では相関長がチャンネル幅程度になった時 ($T=T_0$)、チャンネル幅程度の領域で秩序ができ抵抗はゆっくり上昇しはじめ、相関長がチャンネルの長さ程度 (ほぼバルク) になった時 ($T=T_1$)、完全な結晶になり抵抗が急激に上昇すると考えられる。このシナリオでは、格子間隔 $n^{-1/2}$ (\sim dislocation の大きさ) とチャンネル幅 W の比 $n^{1/2}W$ が重要なパラメーターであり、 $n^{1/2}W$ が小さくなるに従い T_0 が上昇する (対応するプラズマ・パラメーターが減少する) ことが予想されるが、これは図10の結果と一致する。

【今後の展開】 本研究では単一電子の閉じ込めの実現とその性質の解明を最終目標にして

取り組んできた。約3年間の研究期間では、この最終目標には到達できなかった。しかしながら、1 μm と同じオーダーのサイズまで電子を閉じ込め信頼できる抵抗測定を行なう事が出来たことにより、本研究で開発した技術を用いれば、近い将来に最終目標を達成できるという確信が得られた。また、幅5 μm チャンネルでのゲート電圧による電流の制御の測定 (図5の5 μm チャンネルに対応するもの) では、すでに1000個程度の電子の位置を電圧でコントロールしている。単一電子の位置制御も近い将来可能になるであろう。

最近、私が所属する研究室において、バルクヘリウム上の電子系にマイクロ波を照射し、垂直方向の励起準位へ励起させた状態で電子の抵抗を測定するという実験により、抵抗のマイクロ波強度依存性が緩和のメカニズムにより大きく異なってくるが見出された [6]。同様の測定を幅1 μm 程度のチャンネル中に閉じ込められた電子系に対して行なうことにより、閉じ込められた電子緩和のメカニズムや量子ビットにおけるデコヒーレンスの要因を明らかにできる可能性がある。

本研究で5 μm チャンネルでは、幅方向の有限サイズの影響で、ウィグナー結晶の短距離秩序によると思われる抵抗のゆっくりした上昇が観測された。同様の測定をチャンネル幅が5~15 μm の間で変えて測定を行い、系統的にデータを取ることで、このシナリオの妥当性のチェックやより定量的な議論が出来ると思われる。また、もっと低電子密度・低温では、チャンネル中のウィグナー結晶は異方的な構造を持つ可能性も指摘されており [7]、興味深い現象が観測される可能性がある。

さらに細い幅1 μm のチャンネルでは、電子は1列にしか並べず完全に1次元になる。1次元系が示す伝導特性、1次元系でのウィグナー結晶転移の有無など低次元物理の観点から

興味深い研究も、本研究で開発した技術を基礎にして研究していきたいと考えている。

【結言】 本研究では、液体ヘリウム上の電子を用いた量子ビット実現へ向けて、ヘリウム薄膜上の電子を閉じ込める技術の開発および閉じ込められた電子の性質の解明ということを目指して研究を行った。閉じ込めサイズが $5\mu\text{m}$ とまだ少し大きいですが、ヘリウム薄膜上の電子を確実に長時間安定にトラップすることができるようになった。また、 $5\mu\text{m}$ チャンネル中では閉じ込めの効果が現れ、その性質も定性的にはあるが理解できた。未だ道半ばではあるが、この先一歩ずつ進んで行けば必ず単一電子の閉じ込めを実現出来るという手ごたえを得た。

本研究の機会を与えて下さり、研究遂行に当りお力添えを頂いた細谷先生をはじめアド

バイザーの皆様、ならびに領域事務所の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) P. M. Platzman and M. I. Dykman, *Science*, **284**, 1967 (1999).
- 2) M. I. Dykman et al, *Phys. Rev. B* **67**, 155402 (2003).
- 3) M. Saitoh, *J. Phys. Soc. Jpn.* **42**, 201 (1977).
- 4) C. C. Grimes and G. Adams, *Phys. Rev. Lett.* **42**, 795 (1979).
- 5) R. Mehrotra et al, *Phys. Rev. B* **29**, 5239 (1984).
- 6) D. Konstantinov et al, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 235302 (2007).
- 7) K. Bajaj and R. Mehrotra, *Physica B*, **194–196**, 1235 (1994).