

# 研究報告書

## 研究課題名

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

(研究領域:「量子と情報」)

研究者氏名: 池上 弘樹

(研究期間: 2004年10月1日～2008年3月31日)

## 研究報告書

### 1. 研究課題名

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

### 2. 氏名

池上弘樹

### 3. 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。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。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、最先端の技術で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。具体的には、第一目標として、一方向のみ閉じ込めた1次元伝導チャネルを実現し、その伝導特性の解明をおこなう。1次元伝導チャ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。まずはチャネル幅が広い電極を作製することにより、電子をヘリウム薄膜上に安定に蓄えるテクニックを身につけ、その後、チャネル幅を細くしていくという方針で研究を進める。その後、第二目標として、1次元伝導チャネルの途中に量子ドットを埋め込んだシステム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を解明する。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。

### 4. 研究成果①

#### 1. 1次元チャ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。ヘリウム上の電子には直接配線を付けることが出来ないため、伝導度を測定するためには電極を特殊な構造にする必要がある。本研究では、図1(a)のような2層構造の電極を用いた。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ヘリウム薄膜上に電子を蓄える。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  $\text{SiO}_2$  に変えて電極を作製した。 $\text{SiO}_2$  の熱収縮率は金属に近いいため熱サイクルに対して安定

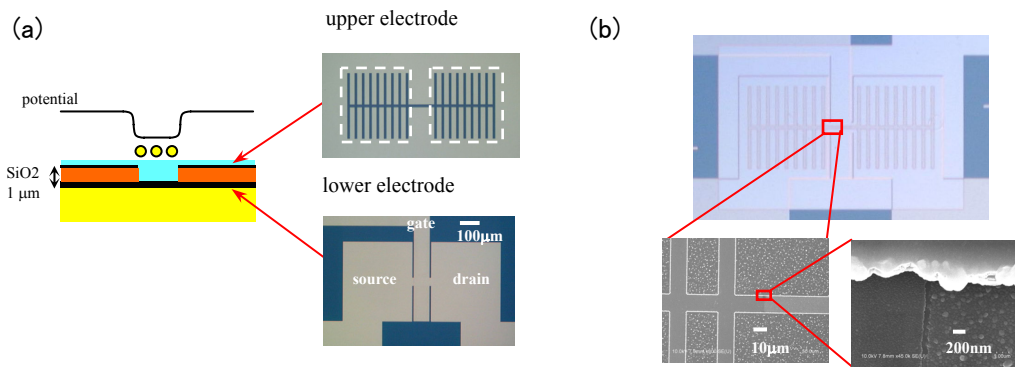


図1 (a)電極構造。(b)チャンネル幅 15 $\mu\text{m}$  の電極の写真。

であると予想されるが、 $\text{SiO}_2$ を用いると電極作製のプロセスは複雑になる。

図1(b)に $\text{SiO}_2$ を絶縁層として作製したチャンネル幅 15  $\mu\text{m}$  の電極の写真を示す。電極は2層構造になっており、下側電極、上側電極ともにアルミニウムできている。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。 $\text{SiO}_2$ 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 $\text{SiO}_2$ 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 $\text{SiO}_2$ が除去され溝構造が出来る。図1(b)から分かるように、チャンネル幅のゆらぎは200nm程度であり、均一と考えてよい。

図1(b)の中心部分が 1 次元チャンネルである。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電圧を調節することにより、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ガステン・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溜めることが出来る。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。測定した全ての電極において、測定を行なっている間(~数日間)で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。なお本研究では、幅 15  $\mu\text{m}$  と 5  $\mu\text{m}$  のチャンネルを作製し測定した。以下に、幅 15  $\mu\text{m}$  と 5  $\mu\text{m}$  のチャンネルで得られた電子の伝導度の結果を説明する。

## 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による制御の様子を図2に示す。まず電子をトラップするために、初期状態ではゲート、ソース、ドレインには+0.25V の電圧が印加されている。この状態から、ゲート電圧のみを小さくしていくと、ゲート上から電子がいなくなる。そのため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( $V_G^C$ )の大きさから、電子密度( $n$ )を決定することが出来る。

次に、幅 15  $\mu\text{m}$  チャンネル中の電子の抵抗の温度依存性を図3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 以下ではリブロン(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ブ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を図3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の場合にも2倍程度ずれることが知られており、幅 15  $\mu\text{m}$  のチャネ

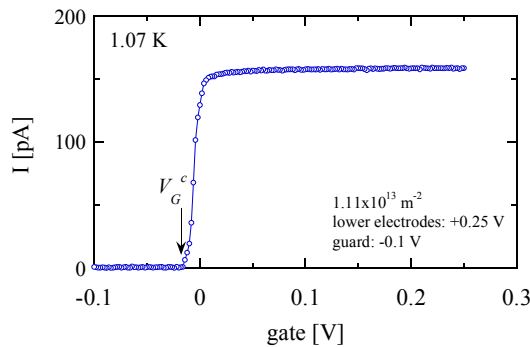


図2 15  $\mu\text{m}$  チャンネルを流れる電流のゲート電圧による制御。

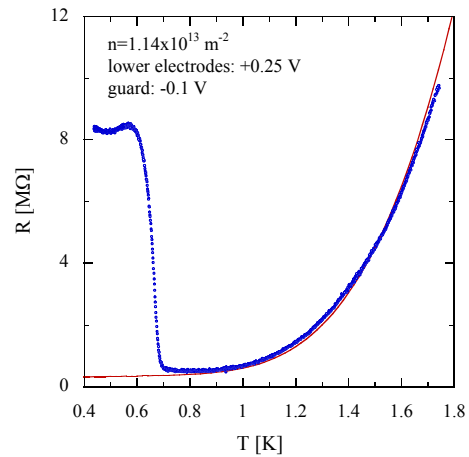


図3 15  $\mu\text{m}$  チャンネルにおける抵抗の温度依存性。赤線は理論曲線。

ル中においても、電子の散乱はバルクヘリウム上の電子と同じメカニズムであることが分かる。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 $\Gamma$ (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( $\Gamma=U/K$ ,  $U=e^2(\pi m)^{1/2}/4\pi\epsilon_0$ はクーロン相互作用、 $K=k_B T$ は運動エネルギー)。図3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、dimple latticeと呼ばれる電子の格子の周期に対応した周期的な凹凸が出来る(図4)。ウィグナー結晶を水平に動かすと電子は dimple lattice を引きずって動くため、電子の有効質量は大きくなり抵抗は増大する。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、15  $\mu\text{m}$  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。5  $\mu\text{m}$  チャンネルの結果の所で述べるが、これは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。

ウィグナー結晶転移温度( $T_m$ )の密度依存性を図5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

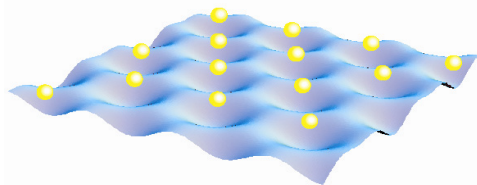


図4 ウィグナー結晶。電子は局在するのでヘリウムの表面には周期的な凹凸(dimple lattice)が出来る。

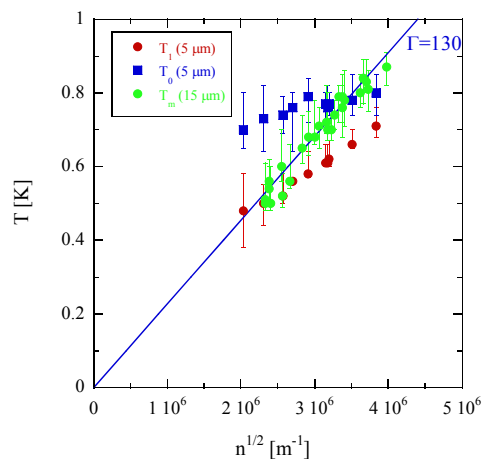


図5 15  $\mu\text{m}$  チャンネルにおけるウィグナー結晶( $T_m$ )の密度依存(緑●)、および5  $\mu\text{m}$  チャンネルにおける $T_0$ (赤●)、 $T_l$ (青■)の密度依存。

の電子に対する理論でよく再現できること(図3)、およびウイ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5)から、1次元チャンネルの伝導度の信頼できる測定方法を確立したと結論できる。

### 3. 幅 5 $\mu\text{m}$ の 1 次元チャンネルの伝導度

図6に幅 5  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  チャンネル中の抵抗(電子密度がほぼ同じもの)も比較のために示してある。高温部分の温度依存は 15  $\mu\text{m}$  チャンネル同様、ヘリウムガスおよびリブロンとの散乱で説明できる。一方低温では、幅 5  $\mu\text{m}$  チャンネルの抵抗はバルクヘリウム上のウイ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、バルクヘリウム上の転移温度付近から急激に大きくなる。これは、バルクヘリウム上の転移温度より高温ですでにウイグナー結晶になっていることを示唆する。

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。図6参照)として、これらの電子密度依存を図5に示す。密度が小さくなるにしたがって、 $T_0$ は $\sim 130$ 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。

このような 5  $\mu\text{m}$  チャンネルの抵抗の温度依存は以下のように解釈できる。バルクヘリウム上でのウイ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、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ヘリウム上ではウイ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  $n^{1/2}W$ (チャンネル幅方向の電子のおおよその個数)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  $T_0$ と  $T_1$ の差は大きくなることが予想される。これは図5の結果と一致する。

以上、15  $\mu\text{m}$  および 5  $\mu\text{m}$  チャンネルでの伝導度測定を通じて、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。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。

### 6. 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 $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$  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 $\mu\text{m}$  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。

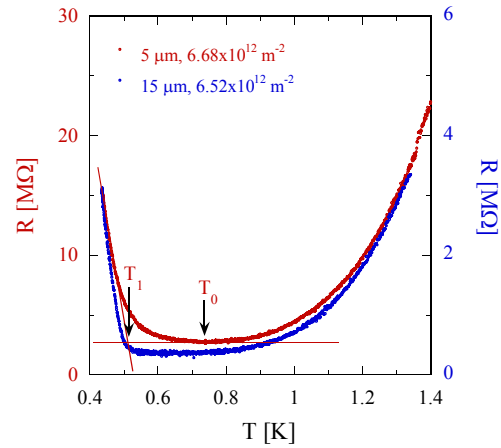


図6 チャンネル幅 5  $\mu\text{m}$ (赤)における抵抗の温度依存。比較のために幅 15  $\mu\text{m}$  の結果(青)も示す。 $T_0$ は抵抗が極小になる温度、 $T_1$ は抵抗が急激に大きくなる目安の温度。

最近、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。同様の測定を幅 1  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  チャンネルでは、幅方向の有限サイズの影響で、ウイ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  $\mu\text{m}$  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、チャンネル中のウイ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、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  $\mu\text{m}$  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次元系でのウイグナー結晶転移の有無、1次元ウイグナー結晶の示す伝導特性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。

## 7. 研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表 :1件

1. H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono, "Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel", Journal of Low Temperature Physics, vol. 150, p 224-229 (2008)

### (2)特許出願

なし

### (3)その他の成果

#### 学会発表 :7件

1. 川島洋徳、林祐介、池上弘樹、河野公俊  
2次元マイクロチャンネル上液面電子系の伝導度測定  
日本物理学会第61回年次大会, 28pXF-3.
2. 林祐介、川島洋徳、池上弘樹、河野公俊  
液体ヘリウムマイクロチャンネル上の2次元電子系の伝導度測定  
日本物理学会第61回年次大会, 28pXF-2.
3. 池上弘樹、秋元彦太、河野公俊  
1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子  
日本物理学会2007年春季大会, 19pRD-9.
4. H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono  
Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel  
International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2007).
5. 池上弘樹、秋元彦太、河野公俊  
1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子 II  
日本物理学会第62回年次大会, 22aXQ-2.
6. H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono  
Wigner Solid Transition of Electrons in a Micrometer-wide Channel  
International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) PA64.
7. 池上弘樹、秋元彦太、河野公俊  
1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子 III  
日本物理学会第63回年次大会, 26pWA-2 (2008).