

## 研究課題別評価書

### 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) 技術を確立すること、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で

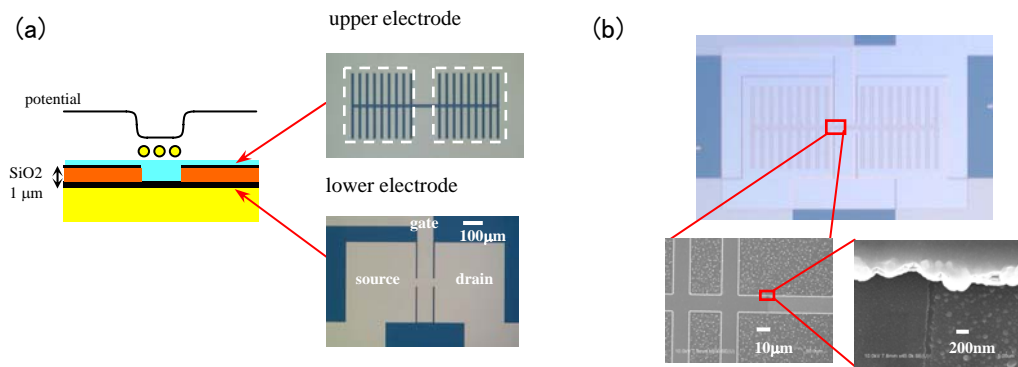


図1 (a)電極構造。(b)チャネル幅 15 $\mu\text{m}$  の電極の写真。

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できている。幅 15  $\mu\text{m}$ の溝が掘っており、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 次元チャネルである。チャネルの両側にあるチャネルに垂直な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。ゲート電極にかか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。なお本研究では、幅 15  $\mu\text{m}$ と 5  $\mu\text{m}$ のチャ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 次元チャネルの伝導度

幅 15  $\mu\text{m}$ のチャ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出来る。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  $\mu\text{m}$ のチャネル

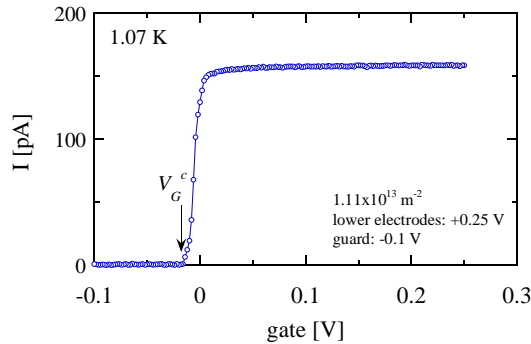


図2 15  $\mu\text{m}$  チャンネルを流れる電流のゲート電圧による制御。

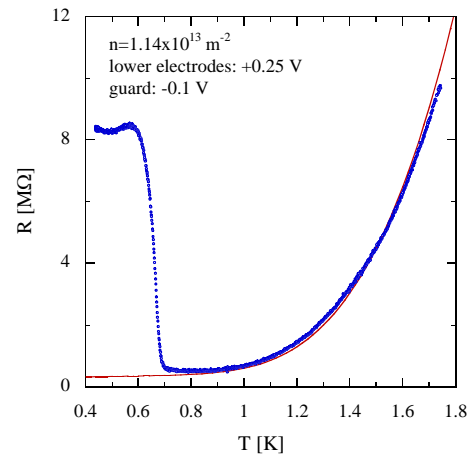


図3 15  $\mu\text{m}$  チャンネルにおける抵抗の温度依存性。赤線は理論曲線。

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、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

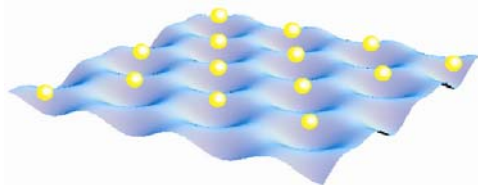


図4 ウィグナー結晶。電子は局在するのでヘリウムの表面には周期的な凹凸(dimple lattice)が出来る。

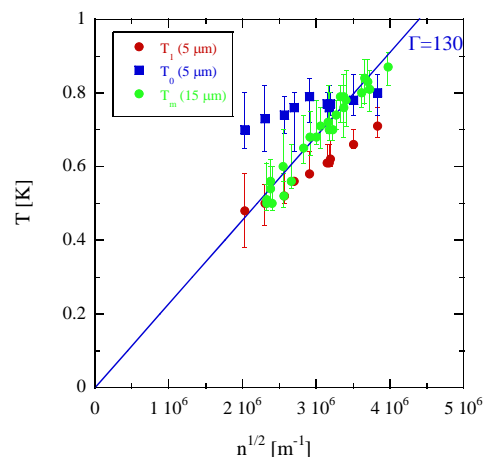


図5 15  $\mu\text{m}$  チャンネルにおけるウィグナー結晶( $T_m$ )の密度依存(緑●)、および 5  $\mu\text{m}$  チャンネルにおける $T_0$ (赤●)、 $T_l$ (青■)の密度依存。

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ィ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 $T_I$ (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 $T \sim 130$  から高温側にずれていき、また $T_0$ と $T_I$ 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、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( $T=T_I$ )、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 $T_I$ 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  $\mu\text{m}$  とまだ少し大きいのが、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。

### 5. 自己評価

本研究の第一目標は1次元チャンネルを実現しその伝導特性を解明すること、第二目標は1次元伝導チャンネルの途中に量子ドットを埋め込んだシステムを構築し、量子ドット中の電子の性質を解明することであった。ここで1次元チャンネルの幅として1 $\sim$ 2  $\mu\text{m}$ を想定していた。3年間の研究期間では、幅 5  $\mu\text{m}$  のチャンネルまでを実現しその伝導特性を解明したが、第一目標である 1  $\mu\text{m}$  のチャンネルまでには至らなかった。これは、当初の研究計画が欲張りすぎたという面に加え、チャンネル開発の方法としてチャンネル幅が大きいものから作り、データを確認しながら順次、幅を細くしていくというやり方を取ったためでもある。これは技術開発を確実に進めたいからであった。最初から

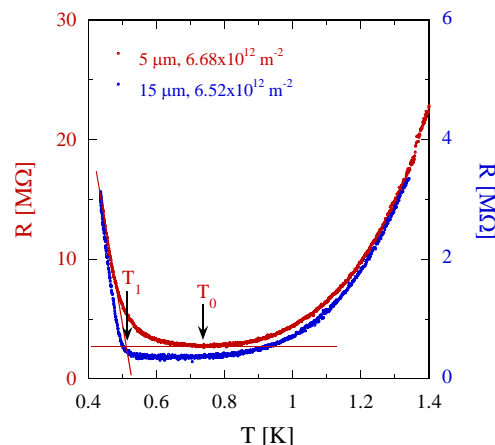


図6 チャンネル幅 5  $\mu\text{m}$ (赤)における抵抗の温度依存。比較のために幅 15  $\mu\text{m}$ の結果(青)も示す。 $T_0$ は抵抗が極小になる温度、 $T_I$ は抵抗が急激に大きくなる目安の温度。

1  $\mu\text{m}$  程度の幅のチャンネルを開発するという方法をとることによりもっと早く開発出来た可能性もあるが、試行錯誤が必要な技術開発の段階ではあまり得策では無い。3年間で幅 5  $\mu\text{m}$  のチャンネルまで確実に作製・測定出来るようになったことにより、技術基盤を固めることが出来た。このことは、近い将来、1  $\mu\text{m}$  程度のチャンネルや量子ドットを実現出来るという確信につながった。

幅が大きいチャンネルを研究する過程で、チャンネル中の電子のウィグナー結晶転移が有限システムでの KT 転移であることに気が付いた。これは、ヘリウム液面電子系においてメゾスコピックなシステムが示す現象の研究として先鞭をつけた研究であると位置付けられる。今後、チャンネル幅を系統的に変えて測定していくことにより、有限システムでの KT 転移に関する理解が深まるであろう。本研究による技術基盤を用いることにより、量子情報の研究にとどまらずメゾスコピック系での現象の研究も可能になり、メゾスコピック系、低次元系などヘリウム液面電子系においての研究に広がりが見られると予想される。不純物の影響を受けないきれいな系であるという特徴を生かして、将来、新たな領域を作る気持ちで研究を展開していきたいと考えている。

## 6. 研究総括の見解

幅 5  $\mu\text{m}$  の 1 次元チャンネルの伝導度 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、ヘリウム薄膜上に閉じ込められた電子の性質を解明した。閉じ込めサイズが 5  $\mu\text{m}$  とまだ少し大きい、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、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理解でき、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。

量子ビットの観点以外に、この電子の閉じこめ系の興味深い物理的性質の研究を続けていく確かな橋頭堡を築いた。

## 7. 主な論文等

### 【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

#### ①論文

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受賞

なし

#### ④著書

なし

#### ⑤学会発表

池上弘樹、秋元彦太、河野公俊  
タイトル 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.

H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono  
Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel  
International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2007).

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.

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.

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).

⑥招待講演

なし

【B その他の主な成果】

①論文

なし

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

なし

⑥招待講演

なし