

強磁場下の Si-MOS 反転層における

$\sigma_{xx} = 0$ 状態の性質 (実験) — Wigner 結晶 ?

学習院大理 川 路 紳 治

若 林 淳 一

“If the electrons had no kinetic energy, they would settle in configurations which correspond to the absolute minima of the potential energy. These are closed-packed lattice configurations,”

E. Wigner “On the Interaction of Electrons in Metals” Phys. Rev. 46 (1934) 1002.

自由電子のいわゆる Wigner 格子または Wigner 結晶の可能性が予言されてから 40 有余年を経ているが、その実験による確証はまだない。その理由は、電子間のクーロン相互作用エネルギーに比べて自由電子の零点エネルギーが十分小さい系が得られなかったことにある。

Wigner の条件をみたすためには、電子濃度が十分に薄くなければならないので、金属の自由電子にはその可能性はない。半導体の伝導電子濃度はドナー濃度を制御することによって小さく出来るけれども、運動エネルギーを小さくするために温度を下げると当然のことながら、電子はドナーに局在してしまう。

シリコン MOS 反転層では、伝導電子はドナーによらずに、 SiO_2 膜 ($1,000 \sim 10,000 \text{ \AA}$) を介して加える表面電場によって誘導されたものであるから、本質的には金属的電子であり、しかもその濃度は任意に小さくできる。これは素晴らしい系である、と思われた。しかしこの系にも冷たい壁がある。 Si-SiO_2 界面には $10^{10}/\text{cm}^2$ のオーダーの荷電中心があるので、零点エネルギーを下げるために電子濃度を小さくできるといっても“自由電子”の状態で $10^{10}/\text{cm}^2$ 以下にすることはできない。同様の系として液体ヘリウムの表面にトラップされた電子がある。液体ヘリウムの表面はきれいなので、 Si-SiO_2

強磁場下の Si-MOS 反転層における $\sigma_{xx} = 0$ 状態の性質 (実験) - Wigner 結晶?

界面のようなトラブルをこの系は持っていない。人々がこの系を Wigner 結晶を実現するための最有力候補であると考えたのは当然である。

ところが、私達は Si-MOS 反転層の強磁場電気伝導で、Wigner 結晶ではなかろうかと考えられる現象を見た。1.4 K の温度で、反転層面に垂直に加えた 150 kOe. までの磁場の中で、ゲート電圧 V_G , 即ち伝導電子濃度, の関数として Shubnikov-de Haas 振動を測定して、電流電極間の電場 F_{SD} (ソース・ドレイン電圧) を小さくすると伝導率 σ_{xx} の谷の中に $\sigma_{xx} = 0$ の状態が現れ, F_{SD} の減少とともに $\sigma_{xx} = 0$ の伝導電子濃度領域が広がることを発見したのである。反転層のせまいポテンシャルの中で表面に垂直の方向の運動の自由度を失った準 2 次元伝導電子が、強磁場下でその 2 次元運動をも量子化されると、運動エネルギーは死んでしまうから Wigner の条件は満たされ易くなる。強磁場下の準 2 次元伝導電子の $\sigma_{xx} = 0$ の状態こそ、伝導電子数より少ない数の荷電中心のポテンシャルによりピン止めされた Wigner 結晶ではないだろうか?

これから実験事実を示して読者の判定を待ちたい。なお、この実験は現在なお継続中であり、ここで述べるのは中間報告であって最終結果ではない。

図 1 は 150 kOe. の磁場の中で σ_{xx} を測定した例である。用いた Si 表面は (100) 面であるので、基底 2 次元サブバンドは $\langle 100 \rangle$ および $\langle \bar{1}00 \rangle$ 方向に極小を持つ 2

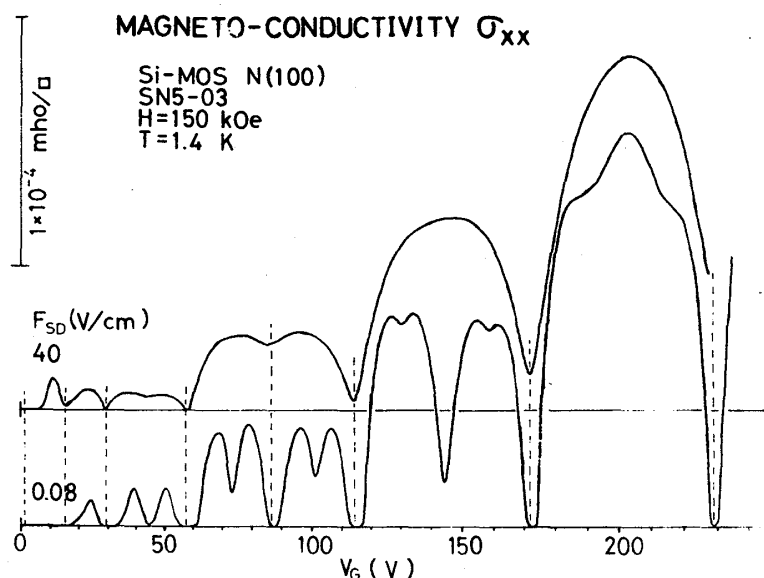


図 1

個の等エネルギー面に対応して2重に縮重している。反転層のポテンシャル内で谷の縮重が分離し、さらに磁場による Zeeman 分離があるので、同じ Landau 指数を持つ伝導電子の σ_{xx} には4個の山が観測されることになる。ところが、Landau 準位指数を $N=0, 1, 2, \dots$ として、 $F_{SD} = 0.08 \text{ V/cm}$ の σ_{xx} には $N=0$ の最初のピークが消えている。このピークは、 $F_{SD} = 40 \text{ V/cm}$ の σ_{xx} には現われている。 $N=1$ について見ると、 $F_{SD} = 0.08 \text{ V/cm}$ では4個の山がすべて観測される。しかし、 $N=0$ の σ_{xx} の最後の山と $N=1$ の σ_{xx} の最初の山の間の谷では、 $\sigma_{xx} = 0$ の V_G の領域がある。この谷の巾は F_{SD} が大きくなると小さくなる。

金属ゲート電極とシリコン表面の間の静電容量を用い、 $\sigma_{xx} = 0$ に対する V_G の領域に相当する伝導電子濃度を求め、non-metallic な電子の意味で、 N_{immobile} と名付ける。 N_{immobile} は H, N, F_{SD}, T の関数である。小さな F_{SD} に対して 1.4K で測定された結果から、いくつかの N の σ_{xx} の最初の山の左側の N_{immobile} を磁場に対してプロットすると、図2のようになる。ここに示す N_{immobile} は上限値を与えている。図2の結果は、大まかに見て、

$$N_{\text{immobile}} \cong \alpha \cdot \frac{eH/ch}{2N+1}, \quad \alpha \leq 1 \quad (1)$$

と表わされる。

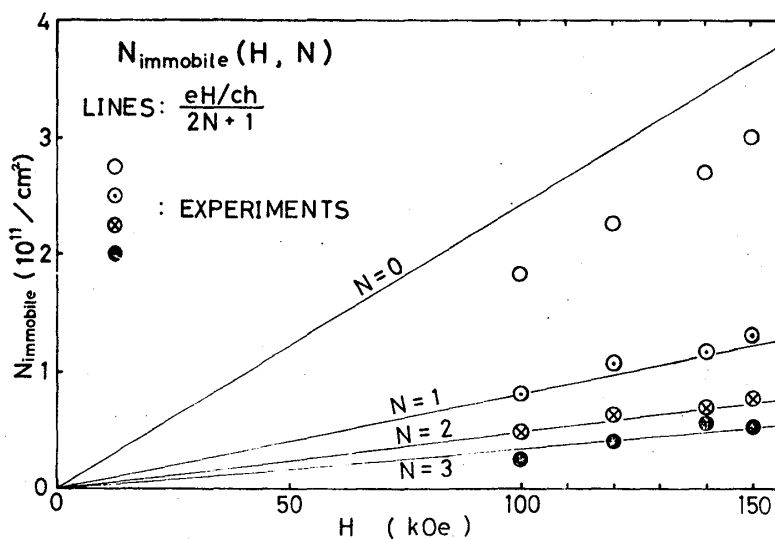


図 2

強磁場下の Si-MOS 反転層における $\sigma_{xx} = 0$ 状態の性質 (実験) - Wigner 結晶?

Landau 軌道の半径は, $\ell_N = [(2N+1) \hbar^2 / eH]^{1/2}$ であるから, ℓ_N を半径とする円の面積を S_N として, (1) 式は $N_{\text{immobile}} \times S_N \leq a/2$ の関係があることを示している。このことは, Landau 軌道が触れ合わない程度に電子濃度が薄ければ, Landau 軌道の中心座標は格子を組み, その電子結晶 (多結晶にちがいない) が荷電中心によりピン止めされて動かない状態が存在していることを意味するように考えられる。これが私達の Wigner 結晶? の出発点である。

97 KOe. の磁場で測定した N_{immobile} の温度変化を図 3 に示す。この図から, 97 KOe の磁場中の Si 表面反転層の Wigner 結晶? の融点は, $N=0$ の場合は約 5 K, $N=1$ では約 4 K であると考えてよい。最後に, $N=0$ の σ_{xx} の最初の山の左側 (低電子濃度側) にあたる伝導電子濃度 N_S を一定としたときの, σ_{xx} の磁場に対する変化を図 4 に示す。

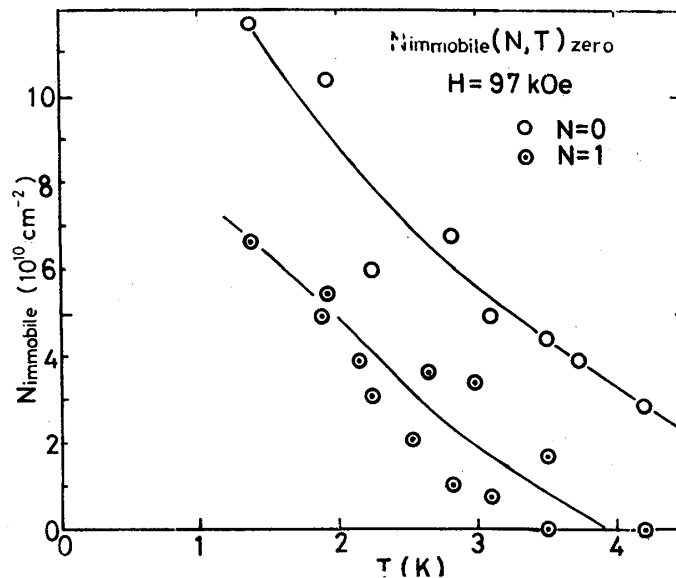


図 3

これで私達の間接報告を終える。“これだけでは判定できない”とお叱りを受けるにちがいない。龍頭蛇尾とはこの小論を形容するための詞であろうか。私達は, 固体電子論の龍である Wigner に免じてお許しいただきたいと願うのみである。

この実験は東大物性研究所で行なわれた。田沼先生ならびに寿栄松氏にお礼申し上げます。MOS 試料を提供して下さったソニーの佐藤，八木両氏に感謝する。また，植村先生，塚田氏および福山氏の討論にお礼申し上げます。

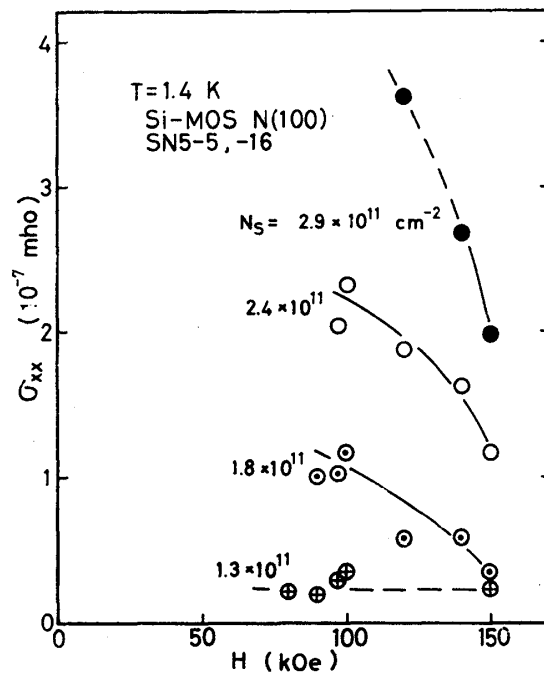


図 4

参 考 文 献

- 1) 福山秀敏：「物性」 15 (1974)
- 2) S. Kawaji and J. Wakabayashi: to be published in Surface Sci., Proceedings of Int. Conf. on Electronic Properties of Quasi-Two Dimensional System, Providence, 1975.