

表面反転層電子の移動度への凹凸の効果

東大理 松本幸雄

半導体表面反転層内の電子状態は、界面垂直方向の強い電界（ゲート電界）により、その方向の運動は量子化されて、表面平行方向の2次元的自由度のみを持つサブバンドから成り立つと考えられる。この系では電子は界面に極めて近い為、表面平行方向の運動に際して、界面付近の種々の散乱体の影響を強く受けると思われるが、その内、幾何学的な凹凸の及ぼす影響を簡単なモデルに依って考察し、実験との比較を行った。

まず界面を高さ一定のステップ状のポテンシャルの壁で表わされるし、凹凸のない界面 $Z = \Delta(x, y)$ であるとする。界面の凹凸の影響を取り入れるには、凹凸のある時とない時の界面を表わすポテンシャルの壁の差の分を、凹凸のない系のハミルトニアンへの摂動として考えれば良い筈だが壁が極めて高い場合には、そのままでは摂動と見なし難い。そこで、座標変換によって境界を都合の良い位置（我々の場合には平面 $z = 0$ ）に移し、その結果生ずるハミルトニアンの変化分を摂動とみなすという方法をとる。界面垂直方向（ z 方向）の電界（ゲート電界）を $v(z)$ とすると、変換の結果凹凸のない系のハミルトニアンに加えて、付加ポテンシャル $H' = v(z + \Delta(x, y)) - v(z)$ 及び運動量に依存する項が生ずる。反転層でサブバンドの底の間隔が広く、かつ凹凸の絶対値及び界面方向の変化が小さい条件のもとでは H' のみを考慮すればよい事が解る。この近似は反転層電子は凹凸によって界面垂直方向の波動函数の形状を変えられる事なく凹凸に添って滑らかに運動するという描像に対応する。凹凸 $\Delta(x, y)$ の一次までとるとすれば、結局2次元ポテンシャル $H' = F \cdot \Delta(x, y)$ （ F はゲート電界）を、サブバンドに対する凹凸の効果として考えればよい。 H' の特徴はゲート電界に比例する点であり、高ゲート電界の領域で有効な散乱機構になる点である。

具体的な凹凸の形状として、円筒状及び類似の形を仮定し、これによる束縛状態（くぼみは引力として働く）及び散乱を考察した。凹凸による束縛準位は荷電中心によるそれと異りゲート電界と共に急激に深くなる特徴を持つが、実際の反転層で役割を演じている節もあり検討中である¹⁾。また、散乱による緩和時間をボルン近似及び1サブバンド

表面反転層電子への移動度への凹凸の効果の近似で求め F (ゲート電界) 及び電子の運動量に対する依存性を明らかにした。更に現実の反転層では F と電子のフェルミ運動量との間には関係がある事を考慮すると、移動度のみかけの F 依存性は、① F の減少函数 (F の大きい所で散乱機構として有効) であり、② F に対するべきを F^{-n} と書くと $n \leq z$ で、(フェルミ運動量) と (凹凸の半径) の積の大きい程 F^{-2} からずれて緩やかになる事等がわかる。

低ゲート電界領域では凹凸の効果は現実の反転層では散乱機構として支配的でなくなり実験もこれを支持するが、この領域では他の機構、例えば界面付近に分布する荷電中心による散乱が有効になると思われる。荷電中心による散乱をトーマス・フェルミの遮へい効果を考慮した議論²⁾に従って求め、凹凸の散乱と組み合わせる事により、低温における Si(100) 面上の n 型反転層に対する小林、小松原³⁾の実験による移動度のゲート電界依存性を説明しようと試みた。その結果、ほぼゲート電界の全領域にわたって実験結果を定量的に再現する事ができた。しかし、荷電中心の効果の支配的な低ゲート電界側では実験に比して増加がやや緩やかな点が、定量的には不満であり、検討の余地がある。実験との比較からパラメタとしては凹凸の半径は 20\AA 程度、(凹凸の面密度) \times (凹凸の高さ、深さ)² は 10^{-3} 程度、また荷電中心の面密度は 10^{11}cm^{-2} 程度と推定される。

以上の通り、反転層に於て、低温、高ゲート電界の領域では、界面の凹凸による散乱が重要である事が推測される。

現在、質量に異方性のある面の場合、及びサブバンド間遷移の効果等を検討中である。

参考文献

- 1) 塚田 捷, 松本 幸雄 物理学会第 27 回年会予稿集 p. 39(1972)
- 2) F. Stern, W. E. Howard: Phys. Rev. 168 816(1967)
- 3) 小林嶺夫, 小松原毅一: 私信による。