

§1: 序 半導体表面反転層を用いる素子の動作を理解する上で、MOSFET のチャネル中の電子状態とりわけ表面量子化効果の定量的把握は重要である。本報告ではシリコン(110)面上の n チャネル FET に注目し、面内異方性を持つ伝導率と量子化効果の関連を明らかにするとともに、ホール効果・磁気抵抗効果をあわせて考察する。

§2: Si(110) 面上の異方性伝導理論:

表面量子化の理論に従えば、シリコン伝導帯の 6 個の谷は図 2 に示すように 2 組に分かれて量子化される。線型ポテンシャル近似で求めた固有値は、 $E_g = 10^5 \text{V/cm}$ に於て、 53meV , 94meV , 127meV (lower group) 及び 63meV , 111meV , 150meV (upper group) になる。ゲート電界 E_g が十分に大きい所ではこれ等の値の差が更に大きくなる (E_g の 3/2 乗に比例) ので、電子の大部分は図 2 の "lower" band に存在することになる。この結果抵抗率テンソルには次の形の面内異方性が現われる。²⁾

$$\rho_{xx} = (m_{1L} \cos^2\theta + m_{2L} \sin^2\theta) (C_1 + C_2 B^2) \quad (1)$$

$$\rho_{yx} = C_3 B - (C_1 + C_2 B^2) (m_{1L} - m_{2L}) \cos\theta \sin\theta \quad (2)$$

ここで C_1, C_2, C_3 は定数、 B は磁束密度、

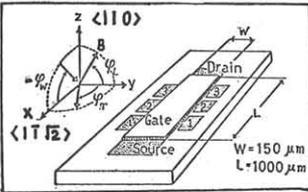


Fig. 1 Sample Geometry

m_{1L}, m_{2L} は lower band の有効質量、 θ は溝内の主軸と (x, y) 座標のなす角である。(図 2 参照)

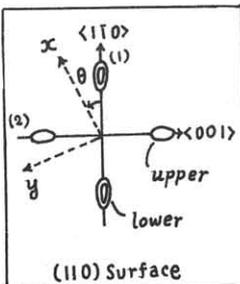


Fig. 2 2-D Band Structure

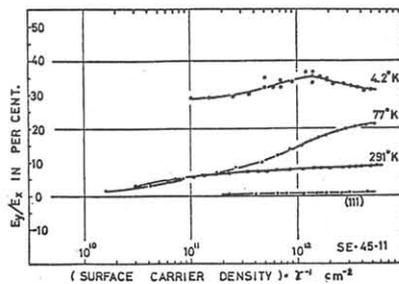


Fig. 3 E_y/E_x versus Surface Carrier Density. (110) and (111) Surface

目的異なる多数の試料を用いて ρ_{xx} を測り、異方性を論じた。2-3 の報告はあるが³⁾、ここでは ρ_{yx} に注目する。図 1 のように $\theta = -45^\circ$ に置くと試料を作ると、式(2)の第 2 項が残り、 ρ_{yx} にはホール効果の項 ($C_3 B$) の他に、磁場の 0 次項・2 次の項が現われる。(Quadratic Hall Effect)。この時式(1),(2)から (ρ_{yx}/ρ_{xx}) を求めると $B=0$ として $(m_{1L} - m_{2L}) / (m_{1L} + m_{2L})$ となり、異方性バンドの形状のみに注する定数となる。Stern 等¹⁾ の与えた m_{1L}, m_{2L} の値を用いると $(\rho_{yx}/\rho_{xx}) = 0.51$ となることになる。

他方、"upper band" にも電子が存在すると仮定して、いわゆる 2 バンド・モデルで同じ計算をすると次式を得る。

$$(E_y/E_x) = (\rho_{yx}/\rho_{xx}) = 0.51 \left\{ \frac{1 - 0.07 \frac{[\sigma_L]}{[\sigma_U]}}{1 + 0.58 \frac{[\sigma_L]}{[\sigma_U]}} \right\} \quad (3)$$

ここで $[\sigma_L], [\sigma_U]$ は lower, upper band の伝導率の寄与 σ_L, σ_U に比例する量であり、次式で定義される。

$$[\sigma_L] = \int_{E_{g0}}^{\infty} \sigma_L \cdot E \cdot N_L(E) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial E}\right) dE \quad (4)$$

但し σ_L は lower band の緩和時間、 $N_L(E)$ は階段状の状態密度函数、 E_{g0} は最低サブバンドの固有値である。

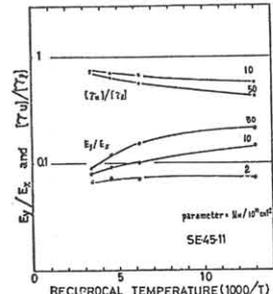


Fig. 4 E_y/E_x and $[\sigma_L]/[\sigma_U]$ versus $(1000/T)$

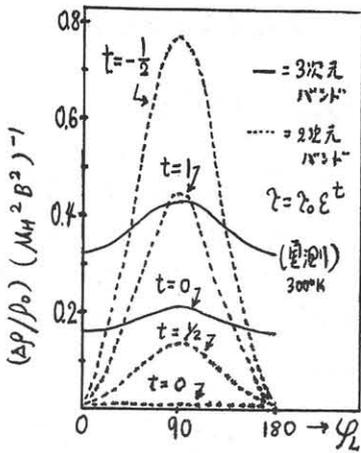


Fig. 4 Calculated Dependence of $(\Delta p/p_0)(M_h^2 B^2)^{-1}$ on ϕ_L .

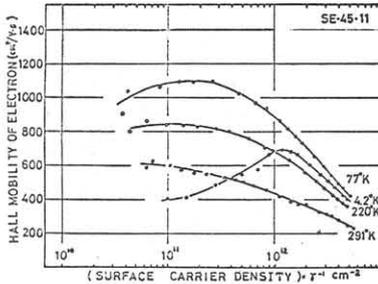


Fig. 5 Electron Mobility vs. Surface Carrier Density

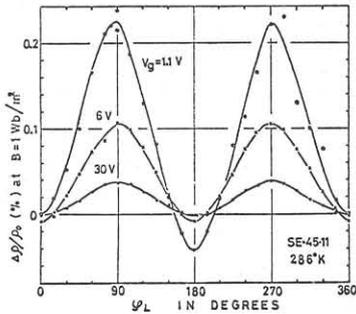


Fig. 6 $\Delta p/p_0$ (%) at $B=10kG$ vs. Angle ϕ_L (286°K)

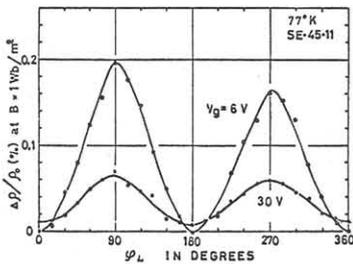


Fig. 7 $\Delta p/p_0$ (%) at $B=10kG$ vs. Angle ϕ_L (77°K)

§3 実験結果

(3-A) E_y/E_x : 比抵抗 $10\Omega\text{-cm}$ の p 型 Si 上に製作した n チャネル MOSFET (図1) を用いて測定した E_y/E_x は図3に示す。室温では 0 から 10%, 77°K では 0 から 20% まで、キャリア密度と共に増加する。又 42°K では 30~35% 程度であり、量子化の極限值 51% に到達している。測定された E_y/E_x を説明するは式(3)において $[2u]/[2e] \neq 0$ とする。EFS upper band からの寄与と入れれば良い。この考えで $[2u]/[2e]$ を決めると図3のようになる。分布であり 2 のエネルギー帯の小きい時には $[2u]/[2e] \propto \exp(-\Delta E/kT)$ となり、サブバンド間のエネルギー差が認められる。これを許すと定量的には ΔE が理論

値よりかなり小さくなるのがわかる。

(3-B) ホール効果及び磁気抵抗効果:

図5に移動度もキャリア密度の函数として示す。(42°Kのみ除外、残りは M_{Hall})。低い密度領域での M の減少は κ - ρ 散乱¹⁾に、高密度領域での減少は格子散乱⁴⁾表面散乱剛体内筒散乱²⁾のいずれかによると考えられる。図6.7は室温及び 77°K での磁気抵抗の磁場方向 ϕ_L (図1参照) 依存性である。磁場が Si 表面に平行自ず異なる磁気抵抗が存在する。これは (100) 面⁵⁾, (111) 面²⁾での観測と同様であるが、室温でもこの効果があるのは (110) 面に特有のことである。福村等の波動函数数形モデルに在りて、室温での量子化の重要性の証拠としよう。 $(\Delta p/p_0)(M_h^2 B^2)^{-1}$ at $\phi_L=90^\circ$ をキャリア密度の函数として図8に示す。図4に示した理論値 (実線は 3 次元ガスの場合、破線は lower band のみを考慮した 2 次元ガスの場合) の形状と比較すると 2 次元ガスの振舞いが (110) 面では強いことがわかる。 $(\Delta p/p_0)$ の大きさを論じるには、(3-A) で述べたように、2-BAND MODEL を用いなければならない。

§4 結論:

E_y/E_x の測定から、表面量子化による伝導率の異方性を定量化し、upper band の寄与を定量的に求めることができた。こうした異方性は、ゲート電圧において制御可能であるので、変調機能を利用した創成子への可能性を各々持っていると言えよう。試料を提供した

た東北理工大 吉田阿郎・西田中の諸氏に謝意を表す。

REFERENCES

- 1) F. Stern 等, Phys. Rev. 163 (1967) 816
- 2) H. Sakaki 等, to be published in JJAP
- 3) T. Sato 等, J. J. A. P. 8 (1969) 588
N. S. J. Murphy 等, S. S. Electron. 12 (1969) 44
- 4) S. Kawaji, J. Phys. Soc. J. 27 (1969) 906
- 5) S. Tansal 等, Phys. Rev. 173 (1970) 1326

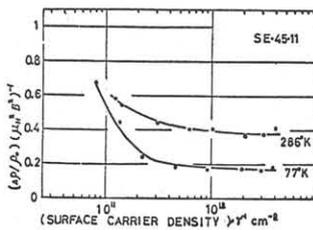


Fig. 8 $(\Delta p/p_0)(M_h^2 B^2)^{-1}$ versus Surface Carrier Density