

6-2 負質量効果と MOS 反転層内キャリアのエネルギー分散: 新しい固体発振素子の可能性

東芝総合研究所

前田 甫

半導体内のキャリアの負の有効質量を持つ状態を利用して、高周波まで広くバンド幅の広い発振器や増幅器をつくるという考えは、かなり以前 Krömer¹⁾ によって提案された。負質量には InSb などの電子のように1つ以上の質量の主軸値が負になる型 (non-parabolicity) と Ge や Si の正孔のようにエネルギーバンドに凹みを持つ型 (warping) とがある。キャリアを負質量領域へ集める作用としては、数年前、強電界下の正孔の波数空間内分布が、強い光学的フォノン散乱のため電界方向へ伸び、かつ、シフトするということ (streaming 現象) が p-Ge において見出され²⁾、また理論計算によっても此の分布の異常が再現された³⁾。従って例えばエネルギーバンドに凹みのある<100>方向に強電界をかけ正孔を stream させれば負抵抗の観測が期待されるにもかかわらず、今までにこのような観測には成功していない。わがわがの p-Ge に対するシミュレーションによると⁴⁾、理想的な状態でも、少くとも 7°K 以下でないと負易動度は得られず、この原因は波数空間で<100>を軸とする円錐状負質量領域が比較的小さく、その垂直方向への正孔分布の広がりのため、正質量領域の寄与が優越するのと判断される。

一方、金属-酸化物-半導体 (MOS) 電界効果トランジスタにおける反転層内キャリアの運動は、強いゲート電界の下ではその方向では量子化されること知られ⁵⁾⁶⁾この立場で近似的に求めた2次元エネルギー分散は Si の p 4チャンネル内キャリアの易動度異方性を定性的によく説明できる⁷⁾⁸⁾量子化理論によると、量子化したキャリアの状態には、バルクキャリアの、ゲート電界方向の波数の大きい状態が大きく混合していることが示される。

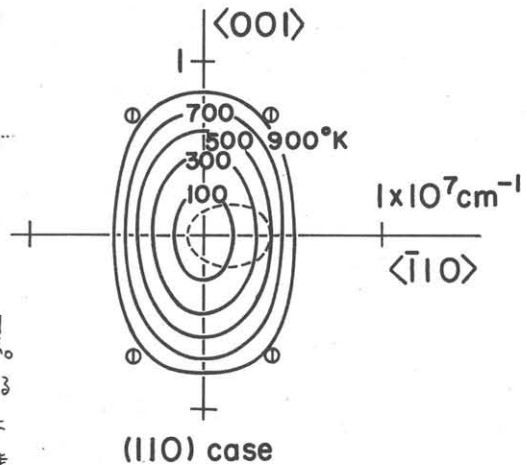
ここでは上述の状態混合の結果、反転層内キャリアに対する2次元波数空間では負質量領域が広がることも期待して、Ge, Si の p 型層について2次元エネルギー分散を求めた結果について報告する。計算は一つの有望な場合である (110) 界面につき、ゲート電界 $F_g = 10^4 \sim 10^6$ V/cm の範囲について行なった。半導体バルクキャリアのエネルギー分散を $E(\vec{k})$ とすると、反転層内キャリアに対する Schrödinger 方程式は $\{E(\vec{k}) + V(z)\}\Psi(\vec{r}) = E\Psi(\vec{r})$, $z \parallel$ ゲート電界 $\parallel <110>$ であるが、価電子帯の $E(\vec{k})$ は複雑であるので幾つかの近似を採用した。(i) ポテンシャル $V(z)$ として急勾配をもつ三角型のもを、幅 w 、高さ無限大の1次元井戸型で置きかえると、今問題にする場合には

$$\begin{aligned} E_n(k_x, k_y) &= E_{zn} + \{E(k_x, k_y, K_n) - E_{zn}\}, \\ E_{zn} &= \text{Min. } E(k_x, k_y, K_n) = E(0, 0, K_n), \quad K_n = \frac{n\pi}{w}, \quad n=0, 1, \dots \end{aligned}$$

で、以下では最低サブバンド $n=0$ のみを取扱う。 K_n と F_g とは、 E_{zn} を、質量 m_z^* の粒子の電界 F_g 下の固有エネルギーおよび1次元井戸型ポテンシャル下の固有エネルギーと等しいと置いて対応づける:

$$E_{zn} = \hbar^2 K_n^2 / 2m_z^* = \gamma_n (\hbar e F_g)^{2/3} / (2m_z^*)^{1/3}, \quad \gamma_n = \text{Airy 関数の零点。}$$

(ii) 価電子帯では $E(\vec{k})$ は3行3列のマトリクスであるが、 $E_{zn} \propto m_z^{*-1/3}$ 、かつ上記近似では各正孔独立になるので、高いエネルギーでない限り light hole 状態の混入の影響は小さいと考えて、 $E(\vec{k})$ としては

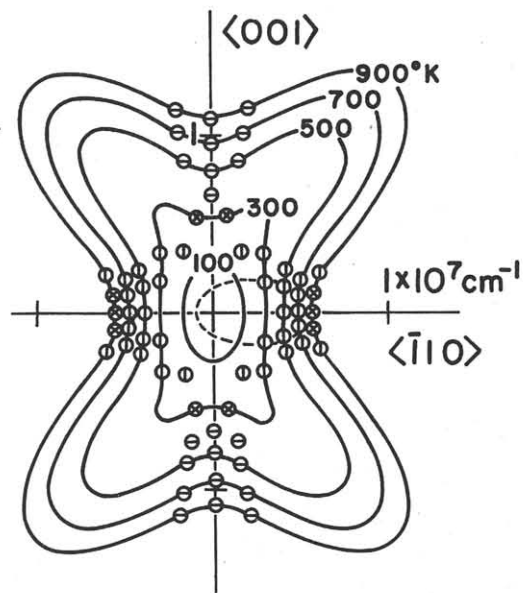


heavy hole の分散のみを採用する。 $E(\vec{k})$ は k - p 摂動の固有方程式⁹⁾を解いて求めた。使用したパラメータは Stickler⁵⁾の逆質量パラメータと Zwerdling¹¹⁾の spin orbit splitting である。

結果は、 F_g が大きいと Si では予期していたように、そして Ge では予期しなかった m_z^* が小さくて E_{zn} が大きくなるために、 $\langle 110 \rangle$ swelling 効果¹²⁾を生じ等エネルギー曲線(等エネルギー線)が楕円的になり、正質量領域が増す。ここでは典型的な3つのケースを図示する。Si の $F_g \sim 4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ の場合は、近似の条件を細く検討するとよく満たされているが、上述の理由で負質量に関しては否定的である。Si の $F_g \sim 6 \cdot 10^4 \text{ V/cm}$ の場合は近似条件は際どいから、負質量効果については魅力的であり、Ge の $F_g \sim 1 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ の場合は魅力的で、かつ近似条件もよく満たされている。図で等エネルギー線の数字はサブバンドの底からのエネルギー($^\circ\text{K}$)を示し、 $\odot$ $\ominus$ $\otimes$ の記号は負質量も与える領域も示している：

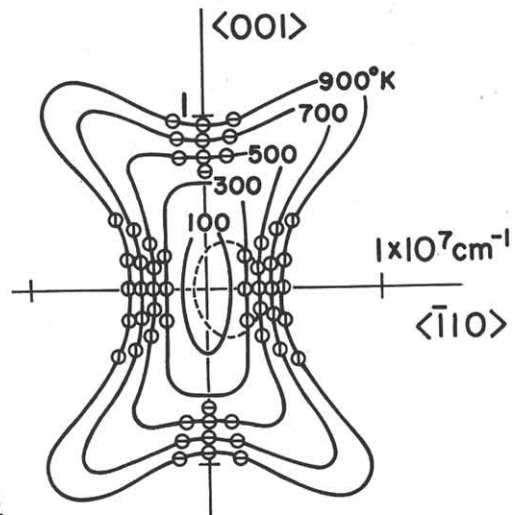
$\odot$: $m_{yy} < 0, m_{xx} > 0$; $\ominus$: $m_{xx} < 0, m_{yy} > 0$; $\otimes$: $m_{xx} < 0, m_{yy} < 0$; $x \parallel \langle 110 \rangle, y \parallel \langle 001 \rangle$ 。

結果を総括すると、3次元の場合と違い図の面積はそのま状態数を表すから、負質量領域は広がっている。Ge の方が m_z^* が小さく $\langle 110 \rangle$ swelling 効果も小さいため、電界が高くても正質量領域が小さく、近似度もよい。素子構成としては $\langle 110 \rangle$ ウェハ面にゲート酸化層を設け、 $\langle 110 \rangle$ 方向に dc "streaming" 電極 $\langle 001 \rangle$ 方向に負抵抗電極、または $\langle 001 \rangle$ 方向に dc "streaming" 電極、 $\langle 110 \rangle$ 方向に負抵抗電極を置くことが考えられる。また同じゲート配置で、 $\langle 110 \rangle$ もしくは $\langle 001 \rangle$ 方向に dc "streaming" 電極を設け、それと同じ極から ac 出力を得る "non-parabolicity" 型も可能であろう。反転層での散乱に対する知見が少いので "streaming" 効果の評価が難しいが、図では分布の広がり一つの目安として、 $\langle 110 \rangle$ 方向へ光学的フォノンエネルギー (Ge: 430°K , Si: 750°K) 相当、垂直方向へ 77°K 相当の領域が、点線で示してある。これから負質量の実現性を議論できる。細かい素子構成および他の界面方向の設計についても議論したい。以上では主に p 型層について述べたが、伝導帯で期待される "non-parabolicity" 型についても、バルクでは高エネルギー¹⁾状態へ加速するのに大電力が必要であるという欠点は、やはり MOS 構造の利用によって解決できると思われる。



(110) case

Si, $F_g \sim 6 \cdot 10^4 \text{ V/cm}$



(110) case

Ge, $F_g \sim 1.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$

- ① H. Krömer: Proc. IRE 47(5)397. ② F. Stern et al: Phys. Rev. 163(2)816.
 ③ W.E. Pinson et al: Phys. Rev. 136(4)A1449. ④ T. Sato et al: J. Appl. Phys. 8 (6)588.
 A.C. Bayham et al: Int. Conf. SC Phys. Paris, 1971, 8) 前田: 物理科学会報 5, p.65.
 ⑤ T. Kurosawa: P. Int. Conf. SC Phys. Kyoto, 1973, 9) E.O. Kane: J. Phys. Chem. Solids 11(5) 82.
 H.F. Budd: ibid. p.420. ⑥ J.J. Stickler et al: Phys. Rev. 127(2)1077.
 ⑦ T. Kurosawa + H. Maeda: in preparation. ⑧ S. Zwerdling et al: Phys. Rev. Lett. 11(6)173.
 ⑨ D. Colman et al: J. Appl. Phys. 29(6)1923. ⑩ H. Miyazawa et al: Phys. Rev. 131(3)2442.