

知ってますか??



雑学講座

# 吸着効果トランジスタ

作・光藤 裕之 岡山理科大学 名誉教授  
〒703-8217 岡山市土田1009-3 TEL/086-279-6011

## 1 ユニポーラ トランジスタ

表題の“吸着効果トランジスタ (Adsorption-Effect Transistor=AET)”は聞き慣れない用語である。果たしてそんなトランジスタがあるのか？ しかも焼結体でも実現され数百度に加熱されて動作し、ガスセンサとして使われる。1970年代に私が命名したのであるが、その由来を述べる。話はトランジスタ草創期にさかのぼる。

まず W. Shockley の A Unipolar “Field-Effect” Transistor<sup>1)</sup> の Summary から引用する。

The theory for a new form of transistor is presented. This transistor is of the “field-effect” type in which the conductivity of a layer of semiconductor is modulated by a transverse electric field.

Since the amplifying action involves currents carried predominantly by one kind of carrier, the name “unipolar” is proposed to distinguish these transistors from point-contact and junction types, which are “bipolar” in this sense.

Regarded as an analog for a vacuum-tube triode, the unipolar field-effect transistor may have a  $m\mu$  of 10 or more, high output resistance, and a frequency response higher than bipolar transistors of comparable dimensions.

これに続く第1節の表題は、Unipolar Transistor and Field-Effect Modulation である。n-p-n あるいは p-n-p 型の bipolar トランジスタと異なり、ユニポーラ トランジスタは n か p いずれか一方のタイプのキャリアで働く。その電流が電場効果で変えられる。AET もユニポーラであるが、adsorption-effect modulation を受ける。

W. Shockley の着眼は次のようである<sup>2)</sup>。結晶整流器の電圧—電流曲線は 2 極真空管のそれに似た非線形特性をもつ。3 極真空管の制御格子に相当するものを結晶整流器に与えることができれば、増幅作用を期待できる。真空管の電流担体は電子であってユニポーラである。

## 2 3 極真空管の格子制御と FET

図1に単純化した3極真空管を示す。

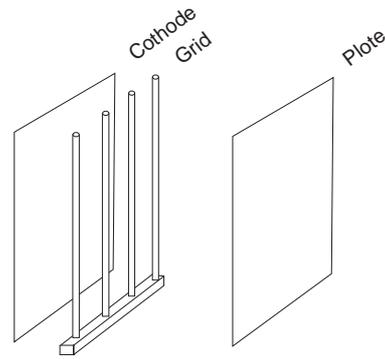


図1 陰・陽極を平板、制御格子を棒で表した単純化した3極真空管。

平面の陰極と陽極の間に棒状格子が置かれている。図2は、電子に対する静電ポテンシャルを上向きにとって表した弾性膜モデルである<sup>3)</sup>。

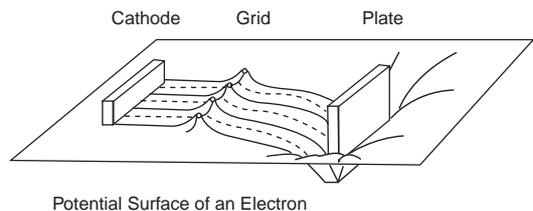


図2 電子に対するポテンシャル分布を表現する弾性膜模型。負電荷のポテンシャルを上向きにとってある。

陰極を発して格子の隙間の峠を越えた電子が陽極に流れ込む。格子棒の間隔が、広いとポテンシャルの峠は低くリモートカットオフ特性、狭いとポテンシャルはピンチオフし易くシャープカットオフ特性になる。

いま、2本の格子棒の間を通過して陰極から陽極に達す

# 雑学講座

る半導体薄板を考えるならば、格子棒の電位によって制御されるポテンシャル峠が半導体内部につくられる。このとき、峠の制御電極は板であっても良いが、半導体と制御電極間は電気絶縁されるべきである。

例えば、一枚の n 型半導体薄板を電気絶縁膜を介して 2 枚の金属板で挟んだ平行平板コンデンサを考える。その左右対称の左半分を図 3 (a) に示す。

これを図示のように充電する（半導体から金属側に電子を汲み出す）ならば、金属板上の負電荷と半導体上

の正電荷が向き合う。電子本意で考えて、矢印を負電荷から正電荷に向けて電気力線を描いた。電気力線密度（電場の強さ）の座標積分は図 3 (b) のように電子に関するポテンシャル曲線を与える。このポテンシャルは電子空乏層 (Debye 長さの厚さ) を表面につくるので、伝導電子密度の対数は図 3 (c) のような分布になる。中央面付近に残る中性層の伝導電子密度は最大で、板の長さ方向の導電路 (チャネル) となる。

図 3 (a) の電圧  $V$  を増すと空乏層が厚くなるので、中性層は薄くなり、さらには消滅してチャネルを閉じてしまう (ピンチオフ)。こうして “Modulation of Conducting Channel by Electric Fields”<sup>1)</sup> によるユニポーラ トランジスタ作用が実現するはずである。FET 作用は単結晶でなくても可能である。

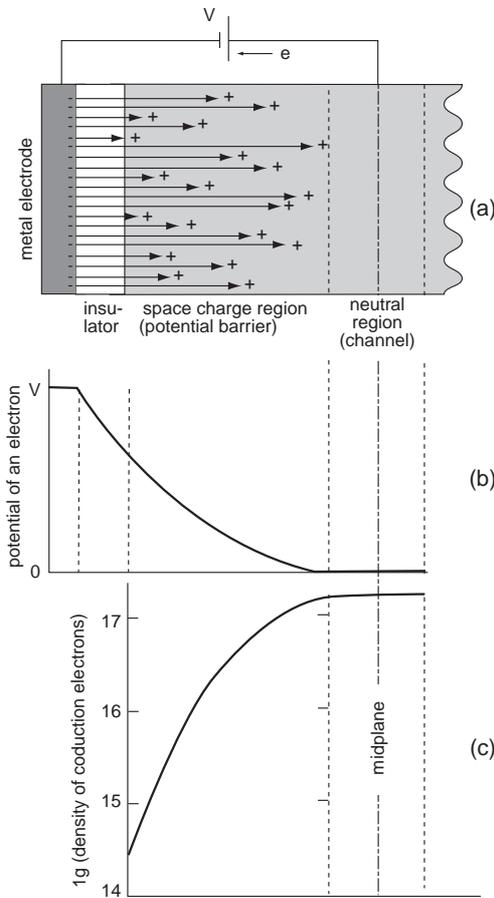


図 3 (a):Metal (左端)–Oxide 絶縁層–Semiconductor 薄板 (n 型, 左半分のみ表示) の断面図。紙面に垂直方向に長く、紙面内の左右方向に薄い。金属板と半導体板がつくるコンデンサは金属が負に充電されている。電気力線を負電荷から正電荷に向けて引いた。(b): 電子に対するポテンシャル分布。絶縁層内では直線、半導体境界層内では放物線。(c): 対数表示した電導電子密度分布。

## 3 表面準位

W. Shockley & G. L. Pearson “Modulation of Conductance of Thin Films of Semi-Conductors by Surface Charges”<sup>4)</sup> によれば次のようである。75 $\mu$ m 厚さの熔融石英板の片面に半導体、他面に金を蒸着してコンデンサをつくり、半導体膜の両端に金を蒸着する。半導体には n 型 Ge, Cu<sub>2</sub>O および n 型 Si を試みている。例えば p-Ge 蒸着膜についての実験結果では、表面下の境界層に誘導されて電導度変化に寄与した電荷は全誘導電荷の計算値の 10%程度に過ぎなかった。残りの誘導電荷は、半導体表面上の表面準位 (surface states) に落ち込んで動けないのである。

この報告は、J. Bardeen & W. H. Brattain による最初の点接触トランジスタ報告と同時に Physical Review 誌に載っている。その直後からバイポーラトランジスタの理論と技術が急発展した。FET の半導体–絶縁体–ゲート電極構造における絶縁層に逆バイアスされた p-n 接合を利用すれば、誘導電荷の捕獲障害になる準位のない半導体–絶縁体界面が得られる。かくて、W. Shockley は接合型 FET を誕生させた<sup>1)</sup>。その後、Si の表面酸化による SiO<sub>2</sub> 絶縁層は、捕獲障害準位のない界面を提供するという幸運に恵まれて、MOS (金属・酸化物・半導体) 層状構造が実現し、MOS 型 FET も誕生した。同じ SiO<sub>2</sub> であっても、Si の酸化膜と熔融石英は異なる界面準位をつくる。

結晶格子の周期構造が断ち切られる界面に局在する電子状態の研究は、Tamm 準位 (1932 年)、Shockley

準位 (1939 年) として発展してきたが, 1947 年の J. Bardeen による半導体界面準位の仕事<sup>5)</sup> はトランジスタ発明の契機となった。

W. Shockley は, FET における電場が誘導した電荷を落とししめて動けなくする表面準位の働きを Bardeen 理論<sup>5)</sup>に基づいて取り扱っている<sup>2)</sup>。これは電場誘導と界面準位捕獲が共存する複雑な状態である。図 3 は, 界面準位に煩わされない理想的な FET を表している。ここで, この対極にある単純な状態を思い描いてみよう。図 4 は, 電荷の電場誘導がなく, 表面準位のみが働いているときの境界層の状態を示す。

表面のアクセプタ準位に電子が落ち込んでいる n 型

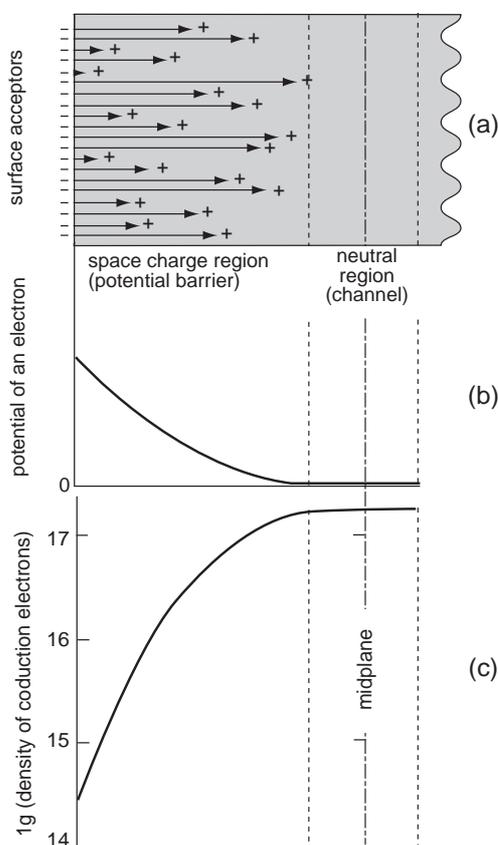


図 4 (a): 自由表面のアクセプタが電導電子を捕らえて負帯電し内部の正の空間電荷分布が電子空乏層をつくっている n 型半導体薄板。これは自然に生じた熱平衡状態である。半導体の形状は図 3 と同じ。(b): 電子に対するポテンシャル分布。(c): 対数表示した電導電子密度分布。

半導体薄板には内部ドナーイオンがつくる正の空間電荷によって電子空乏境界層 (厚さ = Debye 長さ) がつくられる。電気力線分布 (図 4 (a)), 電子ポテンシャル分布 (図 4 (b)) および電導電子密度分布 (図 4 (c); 対数表示) は, 図 3 と異なる。表面アクセプタに捕らえられた電子密度が増せば, チャンネルは狭められピンチオフにいたる。

はじめピンチオフしていた薄板の表面にドナー準位が付け加わって正イオン化すると, 表面の正味の負電荷密度が減り正の空間電荷層の奥行きは浅くなる。ピンチオフは解けて電導度は増大する。電導チャンネルで起こる変動は FET と異なる。

#### 4 吸着平衡と吸着準位

分子の吸着が許される自由表面を考えよう。図 5 は吸着ポテンシャル曲線であり, 左端に固体表面がある。

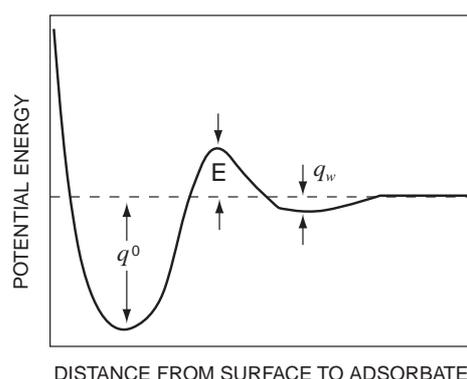


図 5 吸着ポテンシャルエネルギー曲線。左端が吸着床, 分子は右から近付く。 $q_w$ : van der Waals 相互作用,  $q^0$ : 共有結合,  $E$ : 共鳴解離エネルギー。

右から分子が固体表面に近付くと, まず van der Waals 力が働き, 分子のまま浅いポテンシャルの谷 (深さ  $q_w$ ) にゆるく束縛される (物理吸着)。この分子が共鳴解離して表面原子と共有結合して深い谷  $q^0$  に落ちる (化学吸着) にはポテンシャルの山  $E$  を越えねばならない。低温では山  $E$  を越す速度が遅いから吸着平衡に達するには長時間を要する。

一方, 吸着反応系の温度を上げれば  $q^0$  の谷から飛び出す (脱離) 速度が増す。図 6 は化学吸着量と温度の関係を示す概念図である。

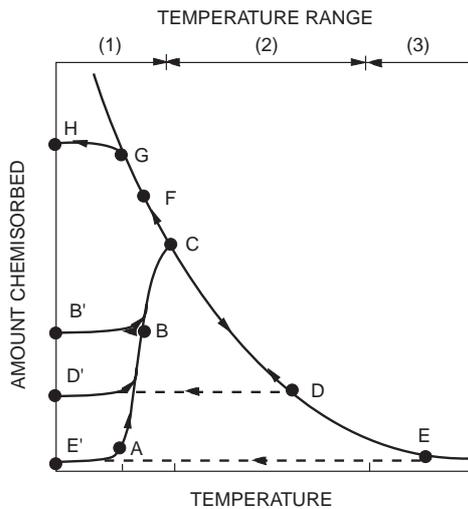


図 6 一定分圧下での化学吸着量と温度の関係．曲線 EDCFG 上は平衡吸着，その他は非平衡吸着．水平左向き矢印は急冷による吸着量の凍結を意味する．

吸着平衡は，吸着分子の気相中の分圧に依存するが，ここでは分圧一定とする．曲線 EDCFG は熱平衡吸着量の温度依存である．平衡吸着量は降温するにつれて増すが，平衡に達する緩和時間が長くなる．すなわち，山 E を越して谷  $q^0$  に落ちる速度は極めて遅く“現実的な時間スケール”では化学吸着量は増えない．G 点付近からは，破線に沿って上昇しないで，飽和して H 点に達する．

化学吸着量がほぼゼロの高温 E 点から急冷すると E' 点の状態に移る．これを昇温すると，A 点付近から徐々に吸着量が増しはじめ，B 点を経て平衡曲線上の C 点に達する．図 6 には，平衡 D 点からと非平衡 B 点からの急冷と，それぞれの平衡回復曲線も描いた．温度領域 (2) での温度サイクルは吸着量のヒステリシスループをもたらす．

一方，系を一定温度に保って，吸着ガス分圧を変えるとき，吸着・脱離平衡がリアルタイムに応答する温度領域は，通常，領域 (2) の上半分の 300~500 °C である．吸着効果トランジスタ (AET) は，この温度領域で作動させられ，ガスセンサとして機能する．このとき，耐熱・耐酸化性を要するので，酸化物半導体が使われる．

化学吸着した状態は表面に局在した不純物準位をつくる．この表面準位にはアクセプタとして働くものとドナーとして働くものがある．通常，酸素等の酸化性ガ

ス分子は化学吸着してアクセプタ，水素等の還元性ガス分子はドナー準位をつくる．吸着水蒸気はドナー準位をつくる．大気中の酸素濃度は 20% で一定，水蒸気は 2~3% 以下で変動する．

## 5 吸着効果トランジスタ

n 型半導体では，吸着酸素アクセプタは電導電子を捕らえて負帯電し，イオン化した内部ドナーは正の空間電荷をつくる．Debye 長さの奥行き電子空乏層が作られる (図 4)．Debye 長さ程度以下の板厚の半導体のチャネルはピンチオフされている．これは，3 極真空管の制御格子電位あるいは n 型チャネルの接合型 FET およびデプレッション型 MOS-FET のゲート電位が深く沈められている状況に対応する．

環境空気にごく微量混じった還元性ガスが吸着してつくられた表面ドナー準位が電子を放出して正帯電し正味の表面負電荷密度が減ると，ピンチオフが緩和・消滅する．その状況での電導度変化は急峻である．はじめにピンチオフしていないでもチャネル幅は広がるが，電導度変化は平凡である．

この寸法臨界的な状況は，FET でも AET でも同じである．半導体の板厚は Debye 長さ程度でなければならない．つまり，Debye 長さはユニポーラ トランジスタの特性寸法である．ちなみにバイポーラ トランジスタの特性寸法は，エミッタからベースに注入された少数キャリアの拡散長さである．ベース厚さが拡散長さ以下であるとき注入キャリアは無事にコレクタに到達できる．

さて，以上の議論において，van der Waals 吸着以後の過程を段階別に述べてきた．分子の解離，化学吸着 (共有結合形成)，電子の捕獲 (負イオン化) または放出 (正イオン化) を別々の過程であるかのように取り扱った．これらはすべて電子過程であり量子力学的に共鳴して起こる．

図 5 の化学吸着ポテンシャルエネルギー  $q^0$  は中性吸着の場合である．負イオン化吸着では  $q^-$ ，正イオン化吸着では  $q^+$  になる．従って，吸着平衡は  $q^0$  に加えて  $q^-$  あるいは  $q^+$  に支配される．いずれも  $q^0$  より深いポテンシャルエネルギーの谷をつくる．

吸着平衡にある半導体電子状態の扱いは教科書通りである．内部と表面のすべての局在・非局在の準位の電子分布確率を Fermi-Dirac 則に従わせる．電荷の偏在に

よる静電ポテンシャル分布を Poisson 方程式に従わせる。これらについて、境界条件と電気的中性条件をみだす解を求めれば Fermi 準位が決まり、電導帯をはじめ各準位を占有する電子数が定まる。かくて平衡状態での電導度が計算される。未知の表面準位の位置と密度は、計算結果を実験値に対応させる追い込み努力により求められる。

概して、半導体は物理系、吸着・ガスセンサは化学系の課題として別々に議論される。それらを取り扱う教科書も別々である。吸着効果トランジスタは、いずれの学問領域から見ても辺境に位置する。

## [参考文献]

- 1) W. Shockley: A Unipolar "Field-effect" Transistor. *Proceedings of the I. R. E.* **40** (1952) 1365-1376.
- 2) W. Shockley: "Electrons and Holes in Semiconductors" D. van Nostrand, New York, chap.2; 1950.
- 3) K. R. Spangenberg: "Fundamentals of Electron Devices" McGraw-Hill Book Company, chap.10; 1957.
- 4) W. Shockley & G. L. Pearson: Modulation of Conductance of Thin Films of Semi-conductor by Surface Charges. *Phys. Rev.* **74** (1948) 232-233.
- 5) J. Bardeen: Surface states and rectification at metal semiconductor contact. *Phys. Rev.* **71** (1947) 717-727.