

極低温におけるMOS電界効果 トランジスタの特性

MOS Field-Effect Transistors at Cryogenic Temperature.

宮川 尚憲*・安達 芳夫*・生駒 俊明*

Takakazu MIYAGAWA, Yoshio ADACHI and Toshiaki IKOMA

1. はじめに

半導体デバイスを、液体ヘリウムの極低温に冷やして使用する事は、数年前までは殆んど考えられない事であった。しかし、近年、例えば、ジョセフソン接合の如く、極低温で極めて良好な特性を有しているデバイスの研究が行なわれており、計算機の一部を冷却して使用する事も話題になり出している。また超伝導マグネット等も実用化されており、極低温における半導体デバイスの特性を知る事は、少しづつ意義のあることになりつつある。一方、MOSFETでは、界面にかかる電界が強く、キャリアが 50 \AA 以下のチャンネルに閉じ込められている為、量子論的効果が期待できると言われている。この効果は移動度が大きくなる極低温で顕著となり、nチャンネルでは負性抵抗の現れる事が報告されている。¹⁾

われわれは、pチャンネルのMOSFETの極低温の特性を測定した。用いた殆んどの試料で、明らかにドレイン電流とドレイン電圧の係に負特性が見られたが、特性は測定に要する時間で大きく変化し、必ずしも決定的な結論に至っていない。そこで測定時間を明確にして特性を論ずる為、パルスでの測定と直流特性の測定を行なった。特に直流特性では、 $V-I$ 特性が時間と共に、かなりゆっくり(秒のオーダー)変化する為、モータ駆動によるポテンショメータによって電源電圧を一定速度で変化させた。本報では主として典型的実験結果をパルス特性、直流特性について報告し、いくつかの可能な説明を試みる。

2. 実験方法

2-1) 試料

試料はpチャンネルのMOSFETで、市販の製品である。試料の各パラメータを表1に示す。

試料Aは6個のまた試料Bは2個のMOSFETが、同一基板上に作られた試料Cは単体である。

2-2) 測定方法

i) パルスによる測定

パルス幅100 nsecから500 nsecの電圧パルス $V(t)$ をドレイン及びソース電極の間に加え、サンプリングオシロスコープ(TEKTRONIX TYPE 661)で測定

表1 MOSFETのパラメータ

	A	B	C
チャンネル長L	12 μm	10 μm	10 μm
チャンネル幅W	1,000 μm	3,200 μm	1,500 μm
酸化膜厚 T_{ox}	1,600 \AA	2,000 \AA	1,300 \AA
基板比抵抗	1~2 $\Omega \cdot \text{cm}$	5~7 $\Omega \cdot \text{cm}$	3~4 $\Omega \cdot \text{cm}$

した。ソースと基板は短絡して測定した。また直列抵抗(50 Ω)にかかる電圧を測定して、ドレイン電流 $I_D(t)$ を決定した。電圧 $V(t)$ 及び $I_D(t)$ は、同じサンプリングタイム t_s で測定し、パルスの高さの変化による電圧-電流特性をサンプリングオシロスコープから直接X-Yレコーダに記録させた。ここでの電圧 $V(t_s)$ は、ドレイン電圧 $V_D(t_s)$ ではなくて、 $V(t_s) = V_D(t_s) + 50\Omega \times I_D(t_s)$ である。この測定方法を図1に示す。

ii) 直流測定

ドレイン・ソース間に直流電圧を加え、直列抵抗10 Ω に加わる電圧よりドレイン電流 I_D を決定しX-Yレコーダに記録させた。ドレイン・ソース間の電圧を一定の割合で変化させる為、DCモータ及びシンクロナモータにより、ポテンショメータを動かし、ドレイン電圧を変化させて測定した(図2)。

3. 実験結果

以下に実験結果をまとめて示す。

3-1) パルスによる測定

3-1-1) 77Kの特性

電流・電圧波形 試料Aの77Kにおける電流電圧波形を図3に示す。ゲート電圧 V_G は-8.82Vで、ドレイン電圧は(a)-11V, (b)-7.5V, (c)-5V, (d)-2.5Vである。電圧波形は、(b)に対応するものを示した。図から明らかな様に、ドレイン抵抗は時間と共に増大しており、この傾向は印加電圧が大きい程大きい。パルスの繰返しは50cpsである。

研究速報

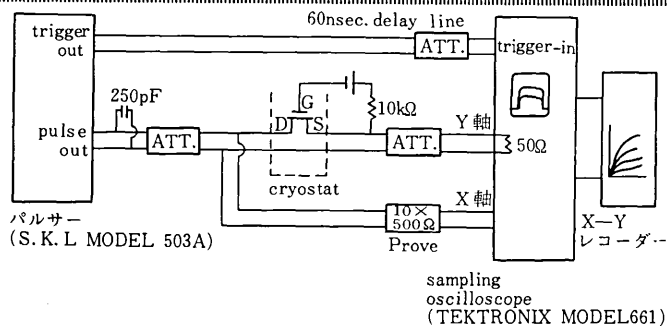


図1 パルスによる電圧、電流特性の測定法

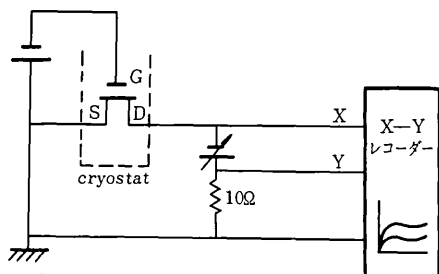


図2 直流測定

電圧・電流特性 パルス印加後45nsecの点で求めた電圧-電流特性を図4に示す(試料A). 常温に比べて、ドレイン飽和抵抗が減少し、良い飽和特性を示していない。

3-1-2) 4.2Kの特性

電流・電圧波形 試料Aの4.2Kにおける電流波形を図5に示す。図5-(a)は、100 nsec, 繰返し50 cpsの場合を示す。この波形は繰返し周波数が50~125cpsの範囲では変化しない。(b)は幅540 nsec, 繰返し125cpsの場合である。パルス幅の増大とともに抵抗値がやや増大している。試料Bについて電流、電圧波形を示すと図6の様になる。この場合は抵抗値が減少している。ドレイン電圧が増加すると図7に示した様に電流波形が特異な様相を呈する。これは共振回路による振動波形とは考えられない。

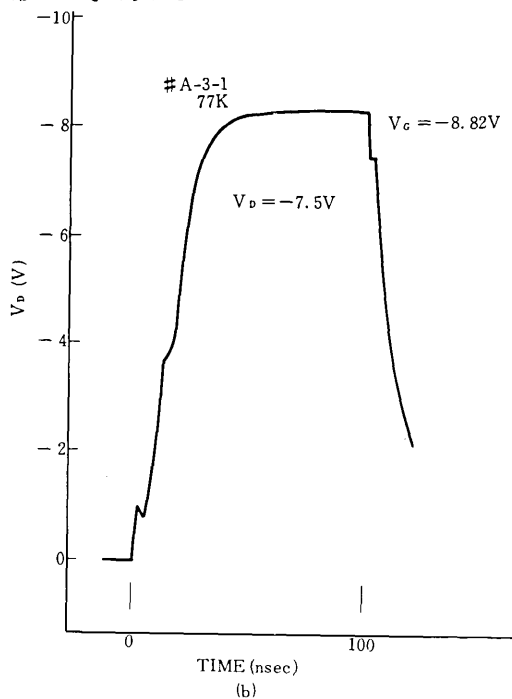
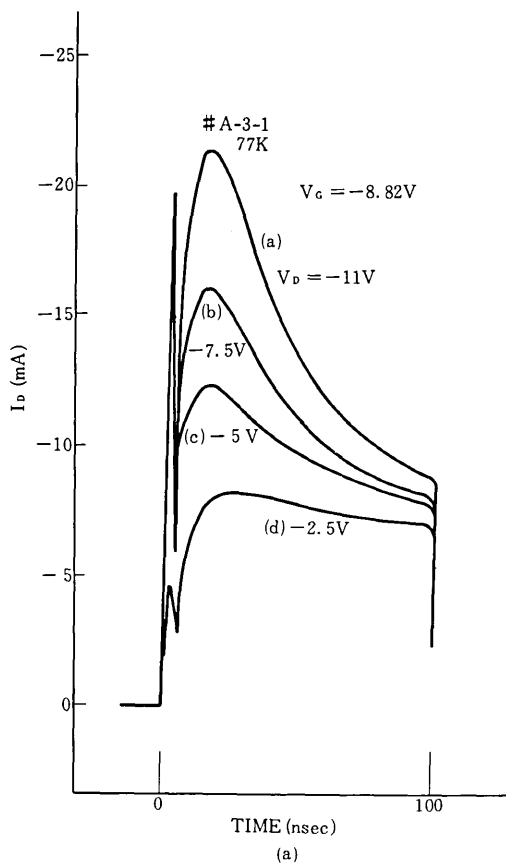


図3 77Kにおける電流波形(a) (繰返し周波数は50cps) 電圧波形(b) (繰返し周波数は50cps)

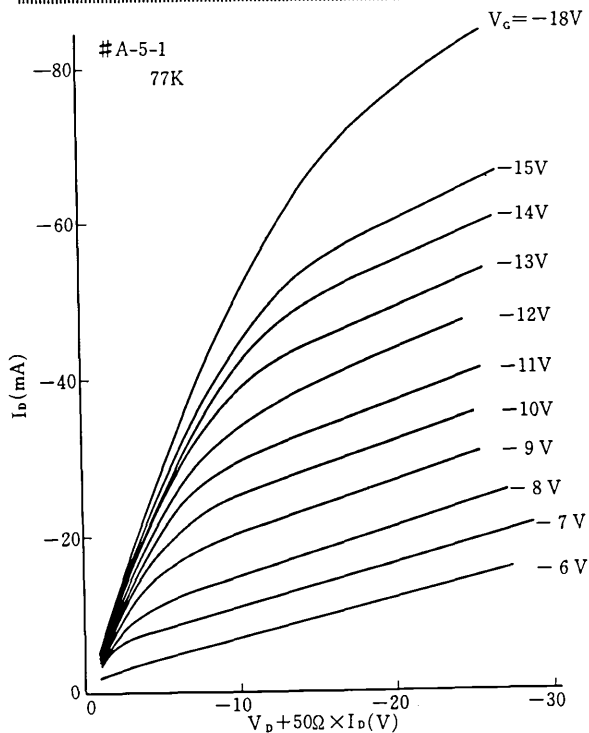


図4 77Kにおける電圧—電流特性 (パルス幅100nsec, 繰返し周波数125 cps サンプリグタイム45nsec)

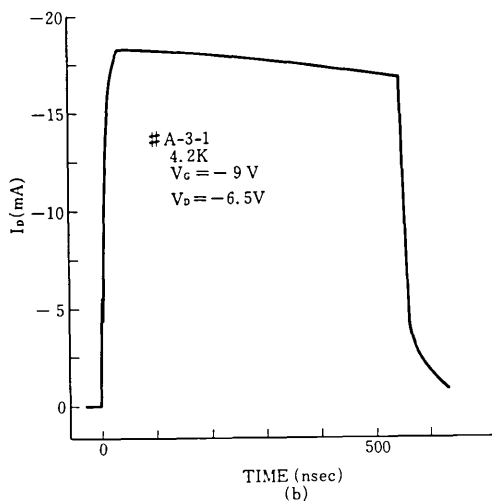


図5 4.2Kにおける電流波形, (b)パルス幅540nsec 繰返し周波数125cps

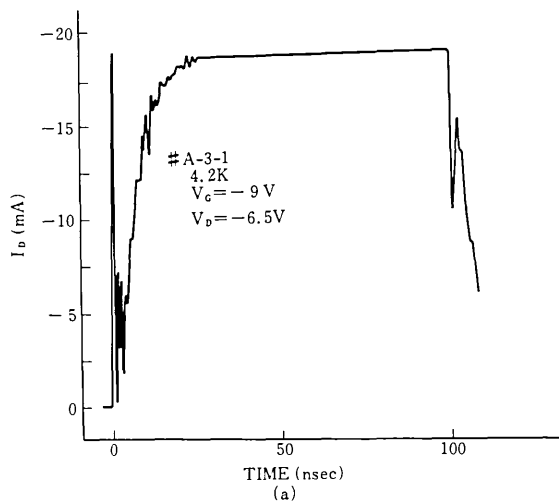


図5 4.2Kにおける電流波形, (a)パルス幅100nsec 繰返し周波数50cps

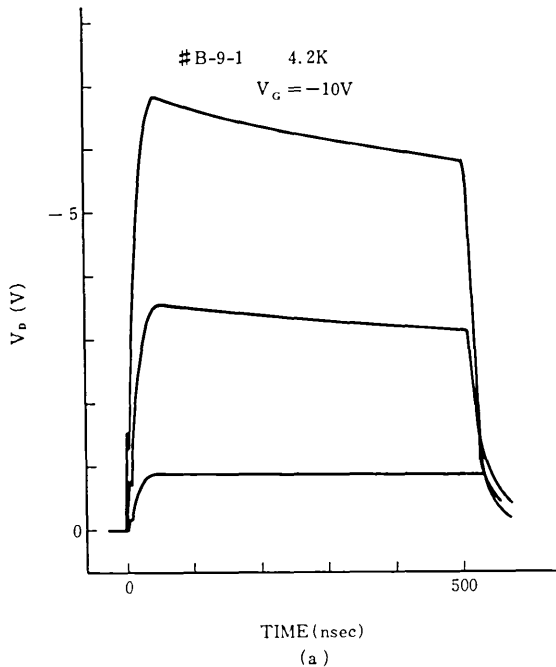


図6 4.2Kにおける電圧波形(a) (繰返し周波数125cps)

電圧・電流特性 試料Aについて、パルス幅100nsec, パルス印加後45 nsecの点で求めたV—I曲線を図8に示す。五極管特性を示さず三極管特性に近い。試料Bについて、V—I特性を図9に示す。実線はパルス幅100nsec, 繰返し50 cpsでパルス印加後45 nsecの点で求めた曲線、破線はパルス幅500nsec 繰返し

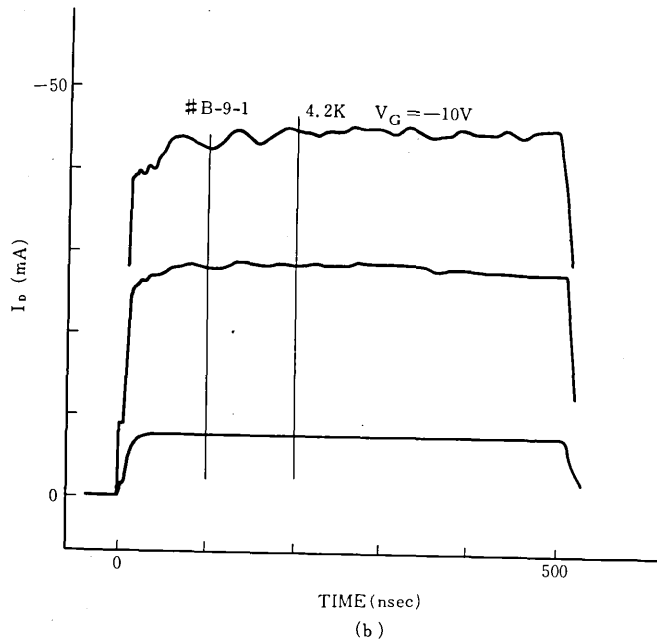


図6 4.2Kにおける電流波形, (b) (繰返し周波数125cps)

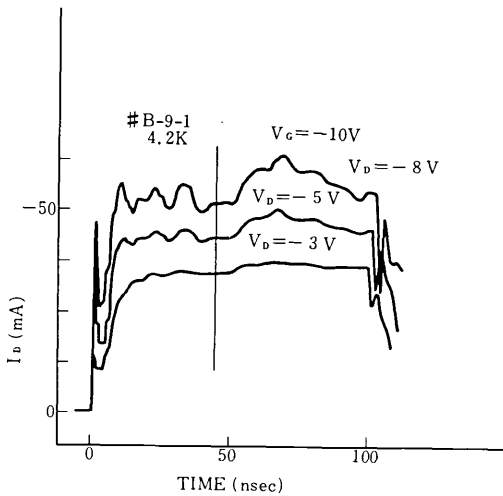


図7 4.2Kにおける電流波形 (繰返し周波数125cps)

125 cpsで、パルス印加後45 nsec の点で求めたものである。両者には若干のずれがあるが、ほぼ一致していると言えよう。V_Gが大(負)の時は飽和の悪い五極管特性を示しているが、V_Gが小さくなると三極管特性に近くなる。幅500 nsec、繰返し125cpsのパルス電圧を印加し、印加後100 nsec後(実線)、200 nsec後(破線)で求めたV-I特性を図10に示す。図9とは明らかに異なっている。図10において、すべての曲線で

は、V_D~-5Vと~-16Vの辺りで、曲線の折曲り(kink)がある。この傾向は、パルス印加後100 nsec以上経過した点でV-I特性を求めると、パルス幅、繰返しによらず常に見られる。

3-2) 直流による測定

4.2Kでゆっくりと印加電圧(直流)を変化させ、V-I特性を調べた。V-I特性は測定時間、すなわち印加電圧の掃引速度で著しく変化する。図11、図12、図13に試料Aについて掃引速度を変えて測定した結果を示す。図11、12、13はそれぞれ、0.428 V/sec、0.125 V/sec、0.025 V/secである。図14に一点一点をプロットした定常状態のV-I特性を示す。図11ではV_Gが小さい場合には、電流はV_Dがある値以上で立上がり、一度飽和した後、キャリア増倍によると思われる上昇を示す。電圧降下時は通常の三極管特性に近い経路をたどる。図12ではヒステリシスが見られるが、明らかに負性抵抗が現われている。V_G=-7.5Vでは負性抵抗領域が2ヶ所生じている。掃引速度が遅くなると(図13) V_G=-5Vで見られる様に、小さい電圧で負性抵抗が生じている。定常状態ではこの負性抵抗は消えるが、V_G=-6.5Vでわずかに負性抵抗が見られている。

直流特性とパルス特性の違いは、電流値の大きさが異なる事及び前者は五極管特性に近いのに対し後者は三極管特性を示すことである。

試料Bについて、同様な測定例を図15に示す。掃引

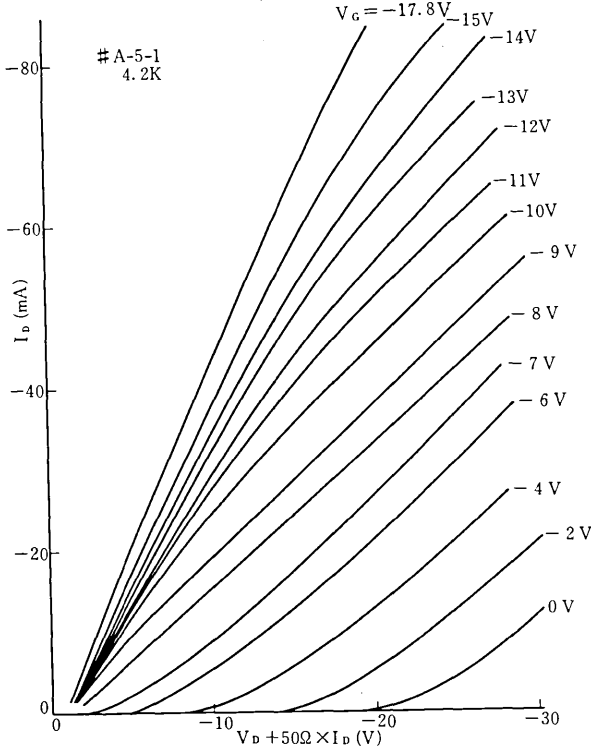


図8 4.2 Kにおける電圧—電流特性 (パルス幅100 nsec, 繰返し周波数125 cps, サンプルングタイム45 nsec)

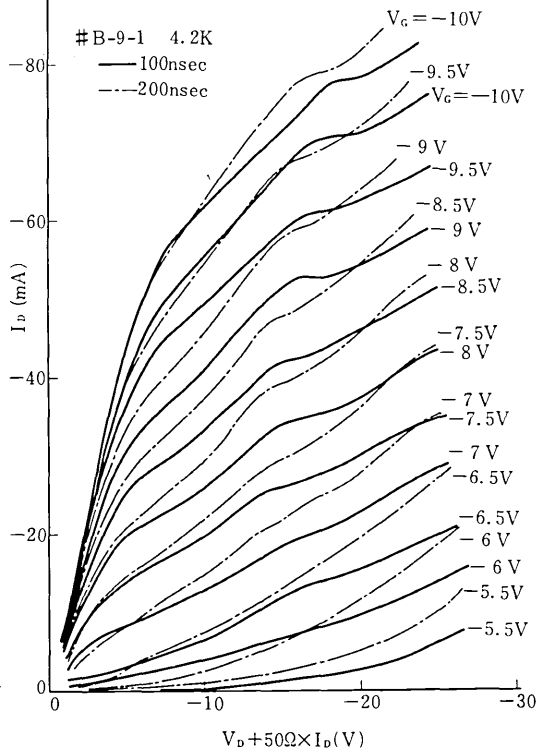


図10 4.2 Kにおける電圧—電流特性(パルス幅500 nsec 繰返し周波数125 cps サンプルングタイム100 nsec (実線) 200 nsec (破線))

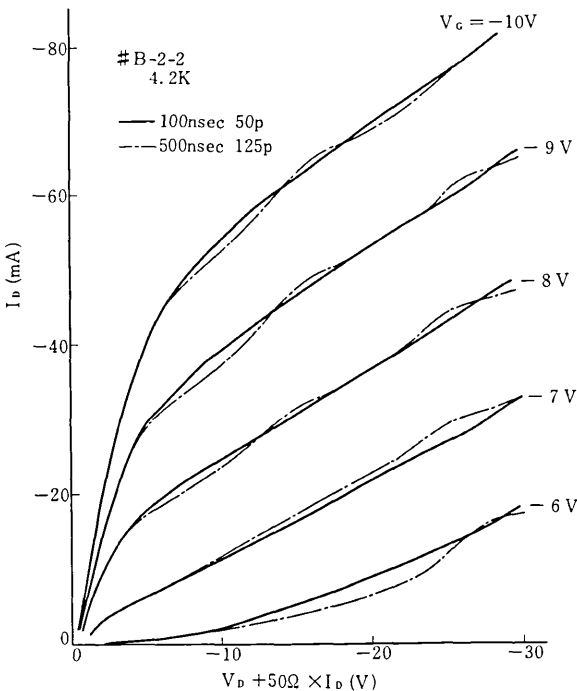


図9 4.2 Kにおける電圧—電流特性 (パルス幅100 nsec, 繰返し周波数50 cps (実線) と 500 nsec, 125 cps (破線) サンプルングタイム45 nsec)

速度は0.2 V/sec (実線)と0.75 V/sec (破線)である。特異な振舞をするが、前述した傾向をもっている事が分る。

試料Cについて、手動で電圧印加した場合のV—I特性を図16に示す。この場合、ある電圧から急激に電流の立上がりが見られる。

4. 考 察

極低温におけるMOSFETの特性を考える場合には、次のことを考慮する必要がある。

- 1) ジュール熱による温度上昇
- 2) carrier freeze-out効果
- 3) 表面量子効果に基づく、キャリア遷移効果

nチャネルMOSFETに見られる負性抵抗は、Sakakiらによって(1)の温度上昇の為であるとされている。⁽²⁾又Komatsubaraらは、(3)の表面量子効果に基づく電子遷移効果であるとしている。⁽¹⁾(2)の効果を検討に入れた理論は未だない。

本実験で得られた結果は、測定時間によってその相相が非常に異り、決定的結論は下せないが、定性的に

研究速報

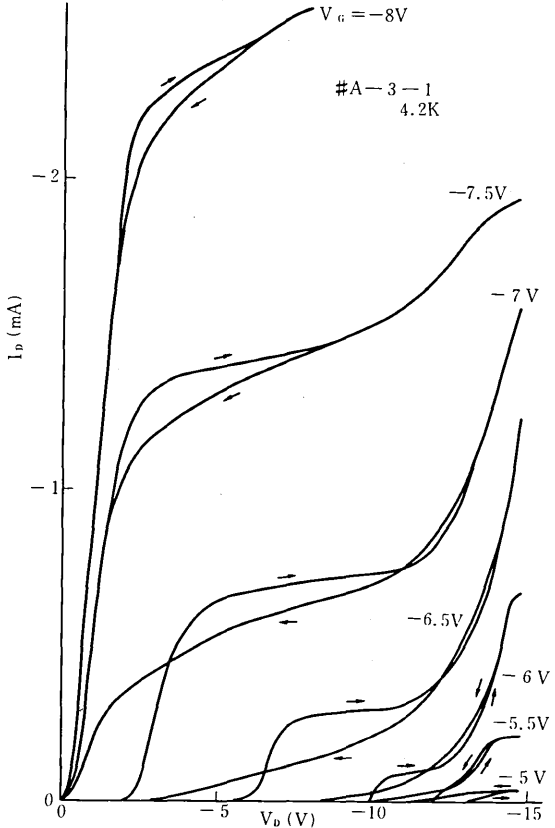


図11 4.2Kにおける電圧-電流特性 (バイアス掃引速度は0.428V/sec)

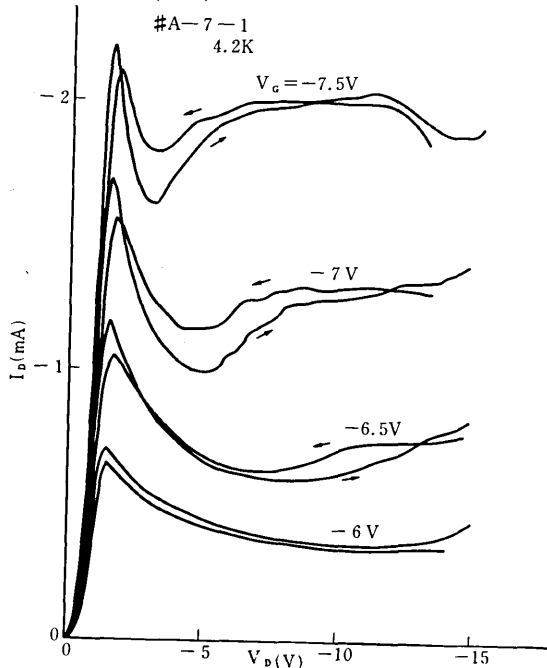


図12 4.2Kにおける電圧-電流特性 (バイアス掃引速度は0.125V/sec)

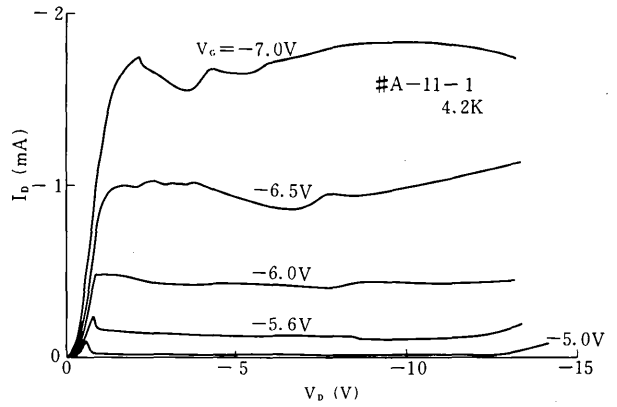


図13 4.2Kにおける電圧-電流特性 (バイアス掃引速度は0.025V/sec)

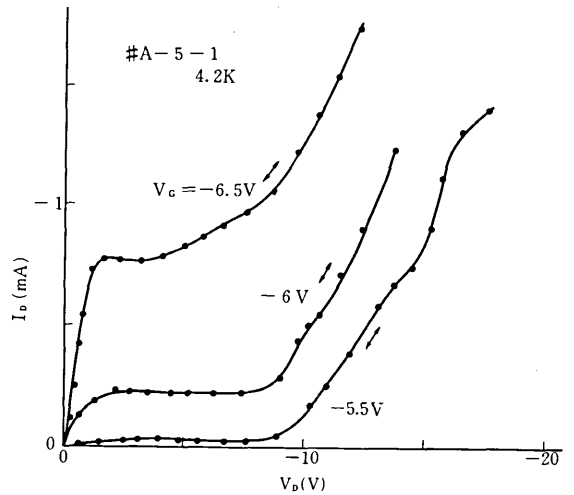


図14 4.2Kにおける電圧-電流特性 (一点一点をプロットして測定)

は次の様なことが言えると思われる。

① 短いパルスで測定したV-I特性はMOSFETのチャネル電流に特有の飽和特性を示さず、空間電荷制限電流に特有の三極管特性を示す。一方直流特性は、三極管特性よりもむしろ五極管特性に近くなる。

② パルス印加後100nsec以上時間が経過したV-I特性は、明らかに電流に折曲り点(kink)が生じる。この時の平均電界は $5 \times 10^3 \text{V/cm}$ と $1.5 \times 10^4 \text{V/cm}$ である(試料B)。

③ 直流特性では、負性抵抗を示す領域があり、電流は時間と共に変化する。電流変化の時定数は秒から分に近く、測定条件によってはヒステリシスを示す。

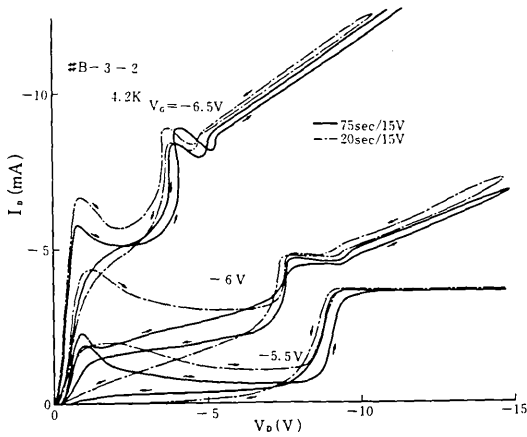


図15 4.2 Kにおける電圧—電流特性 (バイアス掃引速度 0.2V/sec (実線)と0.75V/sec (破線))

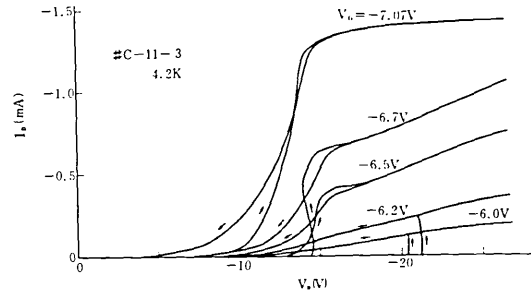


図16 4.2 Kにおける電圧—電流特性 (直流測定)

又ある条件下では、電圧—電流特性が振動的になる。

①の三極管特性は次の様に説明できる。すなわち4.2 Kでは殆んどの不純物はイオン化しておらず、基板の比抵抗が非常に高い。従ってドレイン電圧印加直後には、空乏層がソースまで拡がり、punch-throughの状態になる。この様な状態で流れるドレイン電流は、空間電荷制限電流となり、短いチャネル長をもつMOSFET⁽³⁾や、比抵抗の高い基板上のMOSFET⁽⁴⁾の場合と同様に、三極管特性となる。一方定常状態を考えると、field ionizationにより、空乏層中の浅い不準物レベルはイオン化している筈である。従ってパルス印加後、ドレイン空乏層は不純物のイオン化に従って短くなりpunch-throughの状態から通常のMOSFETの状態に移行する。従って直流動作ではMOS界面のチャネル電流が支配的となる。このことは77 Kの特性とも矛盾しない。

②の電流のkinkと③の負性抵抗特性とは、ある相関をもっているかも知れないが、詳細は今のところ不明である。このkinkが浅い不純物準位のfield ionizationに関連があるかも知れない。

③の負性抵抗は、測定時間に依存し、図12の0.125 V/secの場合、最も顕著である。これは単に温度上昇のみで説明することは出来ない。何故なら図12から分かる様に、電流は電圧に対して振動的に変化する場合があるからである。更に消費電力は図12の $V_g = -6V$ では1 mWであり、熱抵抗を100 K/Wと仮定しても温

度上昇は0.1 Kと非常に小さい。もしこれが界面量子化による正孔遷移効果であれば、その遷移の時定数が極めて長い現象であり、従来の考え方とは相違している。更にSiの価電子帯に対する影響は未だ全く判っておらず、これを量子効果とする根拠もない。現在のところ、この様なpチャネルMOSFETの直流V—I特性の特異なふるまいに対する有効な説明はなく、今後の研究にまつところが大きい。

5. 謝 辞

本実験にあたり、試料を提供下さった、日本電気株式会社藤江氏、日立製作所大野氏、液体ヘリウム等の供給で援助していただいた、東京大学物性研究所液化室の方々に感謝する。又御討論いただいた当所補助教授に深謝する。

(1974年12月7日受理)

参考文献

- 1) Y. Katayama, I. Yoshida, N. Kotera, and K. F. Komatsubara: Appl. Phys. Lett. **20** (1972) 31.
- 2) H. Sakaki and T. Sugano: Proc. 5th Conf. Solid State Devices (Tokyo, 1973), J. Japan Soc. appl. Phys. Suppl. **43**(1974) 314.
- 3) T. Ikoma, Y. Kurihara, and Y. Adachi: SEISAN-KEN KYU **22**(1970) 17.
- 4) P. Richman: IEEE Trans. Electron Devices **ED-16** (1969) 759.