

# 福岡工業大学 学術機関リポジトリ

## 低温領域によるユニポーラデバイスの電気的特性の変化

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2021-02-09 キーワード (Ja): キーワード (En): JFET, transfer characteristics, saturated current, unipolar device 作成者: 篠田, 鼎, 服部, 毅範 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11478/00001635">http://hdl.handle.net/11478/00001635</a>

## 低温領域によるユニポーラデバイスの電気的特性の変化

篠 田 鼎 (情報工学科)  
服 部 毅 範 (機能材料工学科)

## A Change of Electric Characteristics of Unipolar Device in Low Temperature Region

Kanae SHINODA (Department of Communication and Computer Engineering)  
Takenori HATTORI (Department of Functional Materials Engineering)

## Abstract

We measured an electric characteristics of JFET used as the voltage control element in low temperature region. The following evidence were found as a result.

- (1) Operating resistance ( $\Delta I_D / \Delta V_{DS}$ ) become large in saturated region.
- (2) Operating point that does not receive influence of temperature is  $V_{GS} = -1.6$  [V].
- (3) The curve of  $I_D$  slips off in low temperature region ( $-75, -100, -120^\circ\text{C}$ ).

Accordingly, we should consider the application of JFET in low temperature region when design a circuit as variable constant current element and small signal amplifier.

Key words: JFET, transfer characteristics, saturated current, unipolar device

## 1. はじめに

ユニポーラデバイス<sup>1), 2), 3)</sup>の電気伝導機構は二つの電極(ソース-ドレイン電極)の間を流れる電流を第三の電極(ゲート電極)の電圧で制御する三端子素子の半導体デバイスである。

ユニポーラデバイスである電界効果トランジスタには、接合形FET(Junction Field Effect Transistor: JFET)と絶縁ゲート形FET(Insulated Gate Field Effect Transistor: IGFET)の2種類がある。

それぞれのFETは、キャリアの通路の種類によってn-channelとp-channelとに分けられる。両方と

も多数キャリアによって電流が流れる。この様に電流は単一の極性を有するキャリアによって伝達されるので、ユニポーラデバイスと呼ばれる。また接合トランジスタは極性が異なる二つの形を持つキャリアによって電流が流れるので、バイポーラデバイスと呼ばれる。

JFETはゲート制御電圧によって逆バイアスされたpn接合がその空乏層幅を変化させるため、入力インピーダンスが高いと云う特長がある。ここでは、低温領域における伝達特性(ゲート電圧-ドレイン電流)のドレイン電流の変化について検討する。

2. 接合形FETのドレイン電流-ドレイン電圧特性<sup>1), 2), 3), 4)</sup>

図1よりゲート電圧が $V_{GS}=0$ の時、ドレイン電圧 $V_{DS}$ が加えられると、電子はソースからドレインに

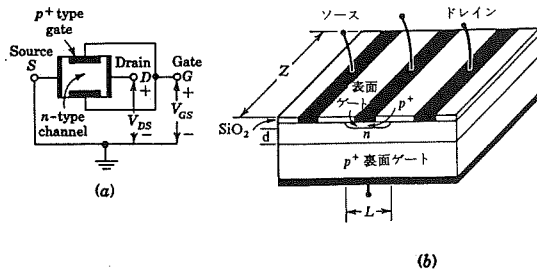


図1 (a)JFETの断面図と(b)JFETの説明図

移動する。二つの空乏領域に囲まれたn形領域においてドレインからソースに向かって電流が流れる。この様な領域をチャンネルと言い、チャンネルの抵抗Rは次式で与えられる。

$$R = L / (qn\mu_n Z d) \quad (1)$$

ここで、 $q$ ,  $\mu_n$ は電子の電荷、移動度、 $n$ ,  $L$ ,  $Z$ および $d$ はそれぞれチャンネル領域のドナー濃度、長さ、幅および厚さである。電界効果トランジスタのドレイン電流 $I_D$ は(2)式で与えられる。

$$I_D = (1/R) [V_{DS} - 2/3(8\epsilon/qnd^2)^{1/2}(\phi - V_{GS} + V_{DS})^{3/2} - (\phi - V_{GS})^{3/2}] \quad (2)$$

ここで $\phi$ ,  $\epsilon$ は拡散電圧, 誘電率である。

$V_{DS}$ が $V_{GS}$ に比べて十分に大きくなると、ドレイン電流( $I_D$ )はドレイン電圧( $V_{DS}$ )に無関係にほぼ一定値となる。増幅回路や定電流回路などに用いる時はこの領域を使用する。 $V_{GS} > V_{DS}$ ならば、(2)式は近似式で次のように表される。

$$I_D = (1/R) [1 - \{8\epsilon/(qnd^2)(\phi - V_{GS})\}^{1/2}] V_{DS} \quad (3)$$

ドレイン電流( $I_D$ )はドレイン電圧( $V_{DS}$ )に比例するのでこの近似式が成り立つ。この領域はオーミックと呼ばれ、FETを可変抗素子として利用できる。

### 3. 接合形FETの相互コンダクタンス<sup>1), 2), 3), 4)</sup>

接合形FETは電圧制御素子なので、ゲート-ソース間電圧( $V_{GS}$ )でドレイン電流( $I_D$ )を制御する事ができる。(3)式において、 $V_P = -(qnd^2/8\epsilon) + \phi$ とおくと、一般に $(qnd^2/8\epsilon) > \phi$ であるので $V_P = -(qnd^2/8\epsilon)$ となる。また、 $I_{DSS}$ は $V_{DS}/R$ として表すことができる。その関係式は

$$I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_P)^2 \quad (4)$$

$I_D$ : ドレイン電流

$I_{DSS}$ :  $V_{GS} = 0$ の時の飽和ドレイン電流

$V_{GS}$ : ゲート-ソース間電圧

$V_P$ : ピンチオフ電圧

と表す事ができる。 $I_{DSS}$ と $V_P$ さえ知れば、この式から $I_D$ の実際の値を計算できる。ただし、この式は、 $V_{GS}$ が大きい飽和領域(定電流領域)で成立する。

相互コンダクタンスは(4)式を $V_{GS}$ で微分すると、(5)式が得られる。

$$g_m = -(2I_{DSS}/V_P)(1 - V_{GS}/V_P) \quad (5)$$

## 4. 実験方法

接合形FETの試料として、東芝製の2SK30ATF(n-channelJFET)を用いる。

### 4-1 測定準備<sup>5)</sup>

外部の影響を受けないように試料はクライオスタットの中にセットし、デジタル温度制御器で温度を設定する。測定の温度範囲はそれぞれ-120, -100, -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75 [°C]である。この時、室温より低い温度で測定する場合、液体窒素を使用する。

### 4-2 測定方法

#### (1) JFETの静特性

JFETの静特性は、ゲート電圧( $V_{GS}$ )を0.0, -0.5, -1.0, -1.5 [V]とそれぞれ一定電圧に定め、ドレイン電圧( $V_{DS}$ )を0.2 [V]の間隔で、0.0~4.8 [V]の範囲のもとにドレイン電流( $I_D$ )-ドレイン電圧( $V_{DS}$ )を測定する。

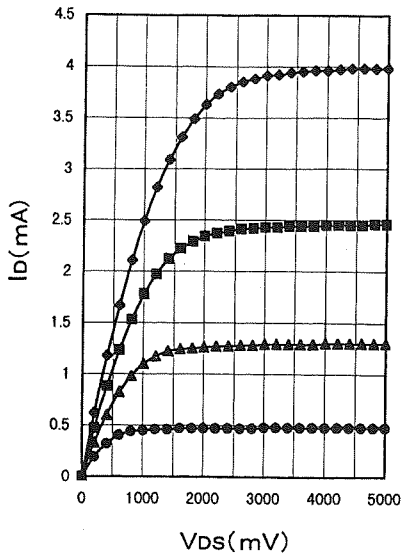
#### (2) JFETの伝達特性

JFETの伝達特性は、ドレイン電圧( $V_{DS}$ )を5, 10, 15 [V]とそれぞれ一定電圧に定め、ゲート電圧( $V_{GS}$ )を-0.1 [V]の間隔で、0.0~-3.0 [V]の範囲の逆バイアスのもとにドレイン電流( $I_D$ )-ゲート電圧( $V_{GS}$ )を測定する。

## 5. 測定結果

### (1) JFETの静特性

図2は室温(25°C)において、 $V_{GS}$ の逆バイアス電圧範囲が0.0, -0.5, -1.0, -1.5 [V]に対するJFETの静特性(ドレイン電流( $I_D$ )-ドレイン電圧( $V_{DS}$ ))である。これは $V_{DS}$ の増加にともない、 $I_D$ は飽和し、ほとんど変化しなくなる。 $V_{GS}$ の増加と共にチャンネル内を移動する電子が制限を受けるので、チャンネル抵抗に影



室温(25度)におけるVGSの変化に伴うID-VDS特性

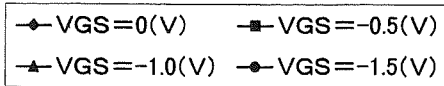


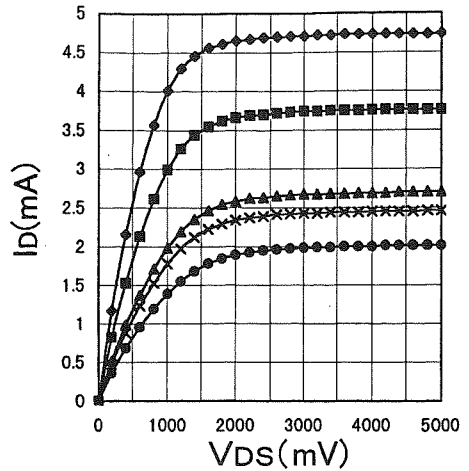
図2 室温(25°C)におけるVGSの変化に伴うID-VDS特性

響を与えることになる。従って、飽和領域において、 $I_{DSS}$ は $V_{GS}$ の変化に応じて変化する。

図3は $V_{GS} = -0.5 [V]$ の場合の温度変化に伴う $I_D - V_{DS}$ 特性である。 $I_{DSS}$ は温度が低くなるにつれて高くなり、また、温度が高くなるにつれて低くなるので、図3の逆バイアスの変化と似た傾向を示す。

(2) JFETの伝達特性

図4は室温(25°C)で、 $V_{DS}$ の電圧をそれぞれ5, 10, 15[V]と一定電圧のもとに、 $V_{GS}$ に0.0~2.5[V]の範囲の逆バイアスを加えた時のJFETの伝達特性(ドレイン電流 $I_D$ -ゲート電圧 $V_{GS}$ )を示す。伝達特性は $V_{DS}$ を変えても $I_D$ に変化がみられない。(4)式の計算値と良く一致する。次に、図5、図6は $V_{DS}$ の電圧を5[V]一定とし、温度が70~-25 [°C]と-50, -75, -100, -120 [°C]とに分け、縦軸を $I_D/I_{DSS}$ 、横軸を $V_{DS}/V_P$ で規格化したJFETの伝達特性である。規格化した伝達特性は、70~-50 [°C]の範囲においてよく一致する。しかし、図6は、 $V_{GS}$ 対 $I_D$ 曲線が



VGS=-0.5(V)におけるID-VDSの温度依存性

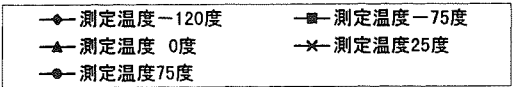


図3  $V_{GS} = -0.5 [V]$ における $I_D - V_{DS}$ の温存依存性

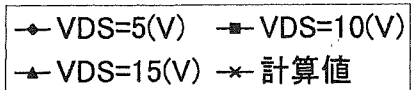
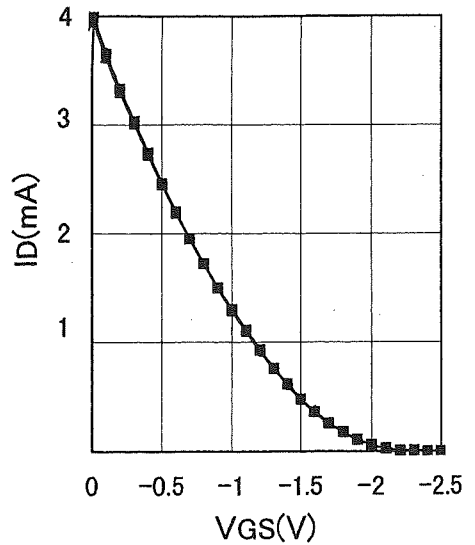
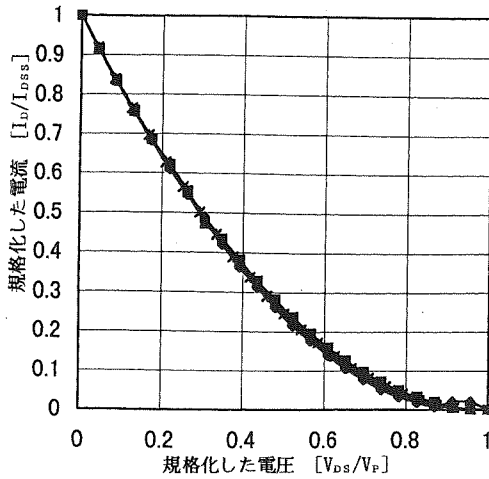


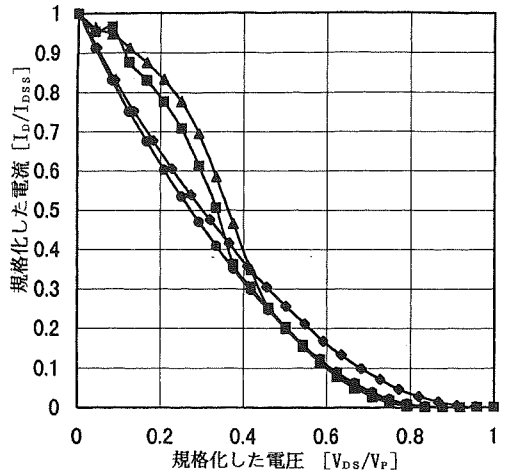
図4 室温における $V_{DS}$ の変化に伴う $I_D - V_{GS}$ 特性



$V_{DS}=5(V)$ の時の  
伝達特性

- ◆ 測定温度 -25度
- 測定温度 0度
- ▲ 測定温度 25度
- 測定温度 50度
- \* 測定温度 75度

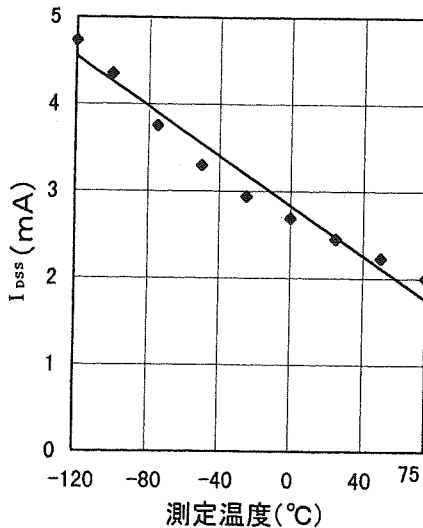
図5  $V_{DS}=5[V]$ における温度変化に伴う  $I_D-V_{GS}$ 規格化



$V_{DS}=5(V)$ のときの  
伝達特性

- ▲ 測定温度 -120度
- 測定温度 -100度
- 測定温度 -75度
- ◆ 測定温度 -50度

図6  $V_{DS}=5[V]$ における温度変化に伴う  $I_D-V_{GS}$ 規格化



飽和電流の温度依存性  
[ $V_{DS}=5(V)$ ]

図7  $V_{DS}=5[V]$ の時の飽和電流対温度

-75, -100, -120 [°C] のときの伝達特性では、低温領域において一致しなくなる。また、ピンチオフ電圧に近づくにつれて、 $I_D/I_{DSS}$ はフィットする事を示す。

図7は  $V_{DS}=5[V]$  の時の温度対  $I_{DSS}$  との関係を示す。 $I_{DSS}$  は温度が高くなるにつれ減少する。また、温度が低くなると共に上昇する傾向を示す。ここで、 $I_{DSS}$  の温度係数は  $-0.0431 [mA]/[°C]$  となる。

図8は相互コンダクタンス対温度との関係を示す。(5)式より、それぞれの温度のピンチオフ電圧および飽和ドレイン電流、 $V_{GS}=-0.1[V]$  とから求めたものである。低温になるほどチャネル抵抗が下がる事を示す。

図9は温度変化による伝達特性の変化を示す。この図は、 $V_{DS}=10[V]$  で  $V_{GS}=-1[V]$  のとき、 $I_D$  は上から順に -120, -100, -75, -50, -25, 25, 50, 75 [°C] の時の値を示す。温度の影響を受けない  $V_{GS}$  の動作電圧は、 $-1.6[V]$  となる。

6. ま と め

(1) JFETの静特性

JFETの静特性において、(ソース・ドレイン間の移動に自由電子が寄与するので)、ドレイン電流( $I_D$ )は逆バイアス電圧( $V_{GS}$ )と温度の変化に大きく影響をうける。前者は空乏層の厚さに起因し、後者はシリコン原子の熱運動のためチャンネル抵抗としてふるまう。この静特性は大きい $I_D$ の時には、チャンネル抵抗の増加の効果が大きく、 $I_D$ が小さい時には空乏層の厚さの変化の方が効果が大きくなる。

(2) JFETの伝達特性

図3, 4, 5より2SK30ATFは温度によって空乏層の厚さは影響を受けにくく、また温度が上昇するとチャンネル抵抗が増加して $I_D$ が減少する。図5の温度範囲においては、ピンチオフ電圧 $V_p$ は殆ど変化しない事を示している。温度に対する飽和電流はドレイン電圧の影響が少なく、温度上昇と共に飽和電流は流れにくくなる。ドレイン電圧が小さいときは、ゲート電圧によって制御できるので可変抵抗素子、スイッチとし

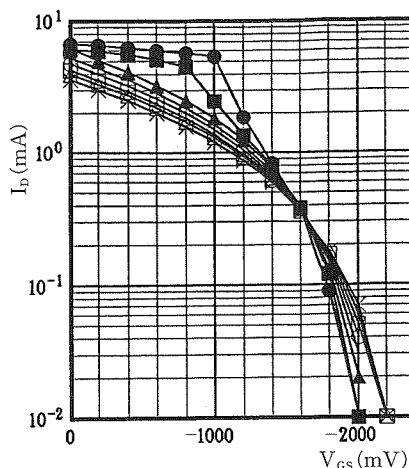


図9 温度変化による伝達特性の変化

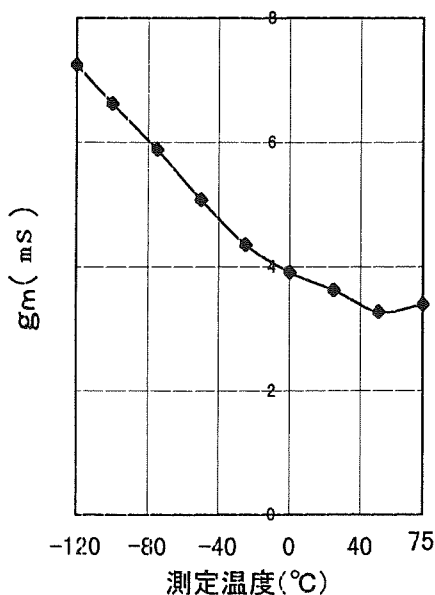


図8 相互コンダクタンス対温度

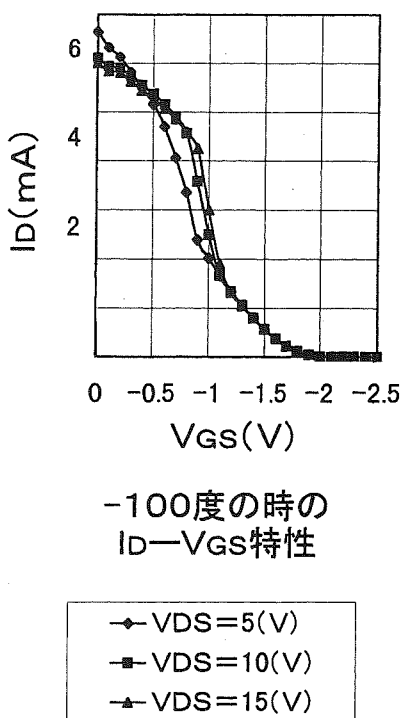
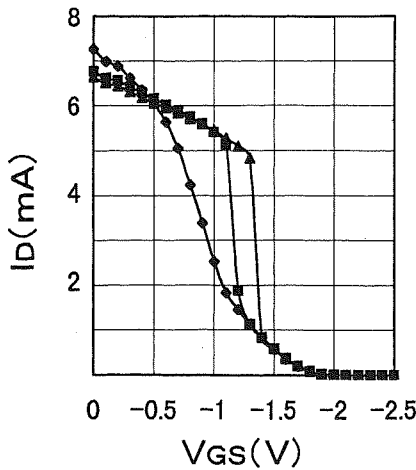


図10 低温領域における $V_{DS}$ の変化に伴う $I_D-V_{GS}$ 特性



-120度のときの  
ID-VGS特性

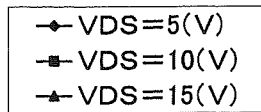


図11 低温領域における  $V_{DS}$  の変化に伴う  $I_D-V_{GS}$  特性

て働らく。ドレイン電圧が高いと可変定電流素子、増幅回路として使用できる。したがって図8より飽和電流は温度が上昇するにつれて減少する傾向を示すので、JFETの熱暴走を抑制できる。

図9は温度変化による伝達特性の変化である。温度

の影響を受けない動作点  $V_{GS} = -1.6$  [V] を境にして、 $V_{GS}$  が小さい場合は  $I_D$  が増加し温度係数は負、 $V_{GS}$  が大きい場合には  $I_D$  が減少し正となる。回路設計に際しては、動作点をこの電圧とすることで、温度変化に対して安定な回路にすることができる。

低温領域において図10より、 $I_D-V_{GS}$  特性は  $V_{DS} = 5$  [V] より大きい10, 15 [V] では、 $V_{GS}$  が右側へシフトする。図11では、 $V_{GS}$  が更に右側へシフトするので  $V_{GS}$  が  $-1$  [V] から  $-1.3$  [V] の間で  $I_D$  はリニア的な変化ではなく、急激な変化をすることが分かる。従って、この範囲の  $V_{GS}$  では  $I_D$  を制御できないことが発生する。この現象は、一種の低温暴走ではないかと推定する。

### 参 考 文 献

- 1) Millman・Halkias: Integrated Electronics, McGraw-Hill, International Book Company, (1972) pp310-321
- 2) S.M. Sze: Physics of Semiconductor Device, John Willy & Sons, Inc., (1981) pp312-334
- 3) 垂井: 半導体デバイスの基礎, オーム社, (1996) pp231-287
- 4) 菊池: 接合形半導体, 東海大学, (1991) pp187-194
- 5) 篠田, 服部: ダイオードの低電流領域における電氣的特性, 福岡工業大学研究論集, 第31巻 第1号 別冊 (1998) pp101-105