

102☆☆

(既出問題)

- ダイオードについて正しいのはどれか。
- a ダイオードは一般に整流器，検流器に使用される。
 - b トンネルダイオードには増幅作用がある。
 - c シリコンやガラスは半導体である。
 - d 発光ダイオードは光をあてると明るさに応じてダイオードを流れる電流が変化する。
 - e 定電圧ダイオードは安定化直流電源の基準電圧をつくる時に利用される。
1. a, b, c 2. a, b, e
 3. a, d, e 4. b, c, d
 5. c, d, e

1

〔注解〕 a ダイオードには二極真空管およびp型半導体とn型半導体を接合した半導体ダイオードとがある。いずれも整流作用があり，また変調波を復調する検波器に使用される。

b トンネルダイオードは負性抵抗の特性(トンネル効果という)をもった素子で増幅作用もあるトンネルダイオードとしてのエサキダイオードは有名である。

c シリコンやゲルマニウムは半導体として働くが，ガラスは絶縁材である。

d ダイオードに電流を流すと電流の大きさによって発光するダイオードを発光ダイオードという。

e 安定化直流電源の基準電圧の発生には定電圧ダイオードが用いられる。基本的にはダイオードのツェナー特性が利用される。ツェナーダイオードともいう。

2

2

平成30年 国家試験 解答 2

単位と物理量の組合せで正しいのはどれか。

- 1. A ——— インダクタンス
- 2. C ——— 電 荷
- 3. F ——— 電 力
- 4. H ——— 磁束密度
- 5. T ——— キャパシタンス

3

トランスデューサ Transducer (変換器)

(センサ sensor)

生体などから、温度、圧力、電磁気、超音波などを検出し、別の情報(抵抗や電圧、電流など)に変換する素子。

103☆☆

(既出問題)

正しい組合せはどれか。

- 1. CdS素子———磁 界
- 2. ホール素子———温 度
- 3. ピエゾ素子———光
- 4. ヨウ化ナトリウム——イオン濃度
- 5. チタン酸バリウム——振 動

4

〔注解〕 1, 2. 磁界の測定には一般にホール素子が用いられるが，生体などの極微弱な磁界にはSQUID磁束計が用いられる。CdS素子は光があたると電気抵抗が変化する光導電素子である。この他にもCdSe, PbSなどの光導電素子が生体計測用トランスデューサとして使用される。温度の検出にはサーミスタなどの半導体を用いることが多いが，ときに起電力を発生する熱電対が用いられることがある。

5

3. ピエゾ素子は圧電素子であり圧が加わると起電力が発生する。

4. ヨウ化ナトリウム(NaI)は放射線によって蛍光を発する結晶物質でありシンチレーションカウンタなどに用いられる。溶液のイオン濃度を測定する代表的なセンサとしてH⁺濃度を測定するpH電極がある。この他pK, pNa, pCaなどがある。

5. チタン酸バリウムは超音波探触子の振動子に使われる一種の圧電素子である。

5

〔関連事項〕 イオンセンサとしてFET(電解効果トランジスタ)を応用したISFETが最近注目されている。

6

光センサ

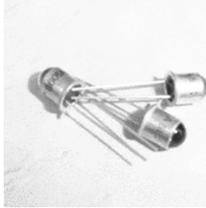
CdS素子

光センサ。光伝導セル。
硫化カドミウム CdS を使った抵抗で、
光が当たると、抵抗値が小さくなる。
車のヘッドライトの点灯確認装置などに利用。



フォトダイオード

フォトリジスタ
光が半導体のPN接合部に当たると
電子が接合部を通りやすくなる性質を
利用した光センサ。
CdSより小型で、光に対する反応が速い。

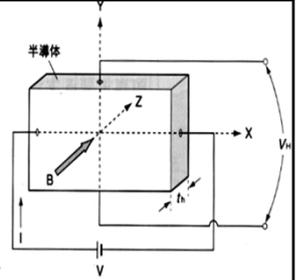


7

磁気センサ

ホール効果

電流を流した物体に電流と
直行する磁場をかけると、
電流と磁場に直行する
方向に別の電場が発生する。



ホール素子

この現象を半導体の中で行うと、半導体に加わった
磁力を測定するセンサを作ることができる。
磁場計測用のトランスデューサ。

8

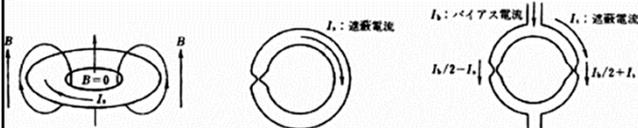
SQUID (SQUID磁束計) 超伝導量子干渉素子 super-conducting quantum interference device

高感度に脳磁図を測定できる装置。 北大病院にある。

超伝導状態(電気抵抗がゼロ)では、超伝導リングに外部から磁界Bを加えると、超伝導リングの中に磁界Bを通過させないように、これを打ち消す超伝導電流(遮蔽電流)Is が流れる。しかし超伝導リングは電気抵抗がゼロであるから電圧は発生しない(左図)。

ところが、超伝導リングに一部細い部分(ジョゼフソン結合)を作ると、そこにわずかな遮蔽電流 Is が流れただけで超伝導状態が崩れ、常伝導となり、細い部分に電圧が発生する。これを利用して、わずかな磁場の変化を電圧として取り出すことが可能となる。

普通の超伝導リング 細い部分を1つ持つ超伝導リング 細い部分を2つ持つ超伝導リング



9



10



SQUID 脳磁図計用ヘリウム

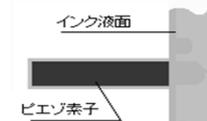
11

圧力センサ 歪みゲージ (ストレインゲージ)

ピエゾ素子 ピエゾ効果(圧電効果 piezo-electric effect)

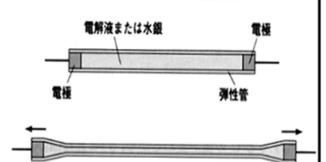
電圧をかけることにより、ある方向に伸びる材料。
逆に圧力をかけて変形させると電圧が生じる。

シリコンゴム、セラミックスが使われる。
血圧センサ、微小駆動装置
(インクジェットプリンタなど)、
電子ライターの点火などに利用される。



抵抗線ストレインゲージ

シリコンゴム管に電解液を封入した
チューブ。
引っ張ると電気抵抗が大きくなる。
呼吸センサなどに利用。



12

超音波センサ 超音波装置に利用

人の耳が検知できる音は1秒間に20回(20ヘルツ)から2万回(2万ヘルツ)位の振動音で、それ以上に高い(速い)振動は超音波といわれ、聞こえない。

超音波を発生させる振動体には圧電セラミックを使用する。

圧電セラミックとは、チタン酸バリウム等を高温で焼き固めた多結晶体のセラミックで、以下の圧電特性を持つ。

圧電セラミックに電圧をかけると、厚くなったり、薄くなったりして振動し、超音波を発生する。

逆に、超音波を受けて振動すると電圧を発生する。

13

シンチレータ scintillator 放射能測定器

電子などの荷電粒子が、蛍光物質中を通過するときに発光する現象をシンチレーションという。

その蛍光物質を、シンチレータという。

ヨウ化ナトリウム(NaI)などが頻用される。

ガンマ線などの放射線がシンチレータに入ると、荷電粒子が発生し発光する。その発光量を測定して放射能を定量する。

ラジオイムノアッセイ(RIA)などに使用する。

ウェル型(井戸型) NaI シンチレータ



14

血液ガス分析に用いる電極センサ

動脈血のpH、O₂濃度(PaO₂)などを測定する。

pHとは水溶液中の水素イオン(H⁺)濃度を表わす単位であり、 $pH = -\log_{10}(\text{水素イオン濃度})$ と定義。

ガラス電極 pH測定

水溶液のpHに比例した起電力を発生するガラス電極と、電位測定のための基準電位を与える比較電極を一对にして試料水に浸したとき、両電極(Ag-AgCl電極)間に発生するpHに対応する起電力を出力するpH電極と、目盛り付けするための機能を有しているpH指示変換器とを組み合わせ測定する方法。



Po₂電極 クラーク電極 Po₂測定

銀Ag-AgCl電極と白金Pt電極間に電圧をかけて、溶液中の酸素による還元電流を測定。(ポーラログラフ法)



15

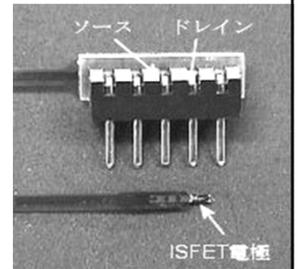
イオンセンサ 化学センサ

ISFET Ion Sensitive Field Effect Transistor (イオン感受性 電界効果トランジスタ)

ISFETのゲート上のイオン感受膜に溶液が接すると、溶液中のイオン活量に応じて電圧が発生する。

イオン感受膜にSiO₂-Si₃N₄を使用すると水素イオンに感応し、pHセンサになる。

従来のガラス電極法に比べるとイオン感受膜を変えることでCO₂測定なども可能、測定時間が短い、装置の小型化 消耗品の減少などの利点がある。



16

2008年 国家試験 解答 4

問題 95 熱電対温度計の原理に利用されているのはどれか。

- 1. 焦電効果
- 2. 光導電効果
- 3. ドブラ効果
- 4. ゼーベック効果
- 5. ピエゾ抵抗効果

焦電効果 = ピエゾ効果

セラミック等に圧力を加えると電圧が発生する。

光導電効果

光によって電圧が生じる。フォトトランジスタ等。

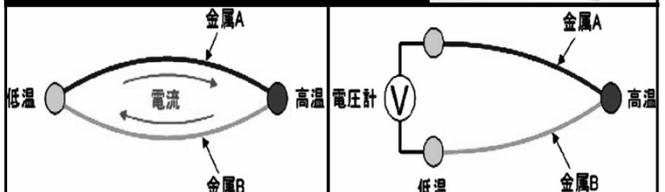
17

熱電対

異なる材料の2本の金属線を接続して1つの回路をつくり、ふたつの接点に温度差を与えると、回路に電圧が発生する。(ゼーベック効果)

片端を開放すれば、温度を電位差で検出できる。

この現象を利用した温度計を熱電対という。



18

FET(電界効果形成トランジスタ)について誤っているのはどれか。

1. P型とN型半導体からできている。
2. 電源の極性が反対で特性は同じ素子がある。
3. 周囲温度の影響を受ける。
4. 電流制御形である。
5. 真空管と同様、高入力抵抗である。

19

(注解) FETはp型, n型半導体からできており, 特に真空管同様高入力抵抗をもっていることから, また雑音が少ないことから接合型(ジャンクション形) FETは医用生体用増幅器の初段に用いられている。入力抵抗が大きいことからFETは電圧増幅素子として適当である。図104にnチャネル形FETの構造を示す。p型とn型半導体を入れ替えたpチャネル形FETでは特性は同じで無論電源の極性が反対になる。

答 4

20

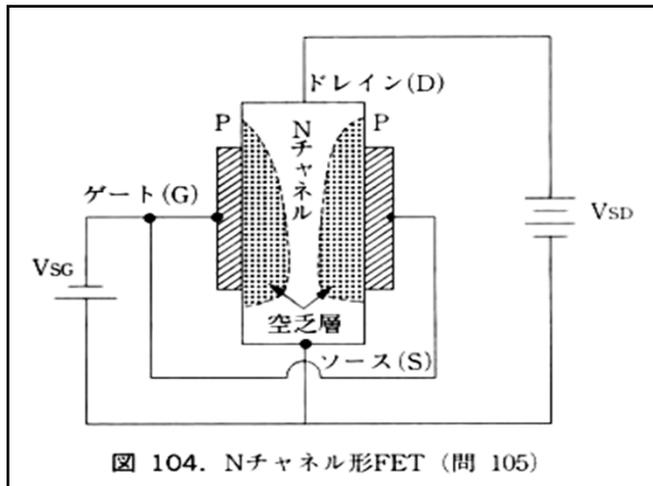
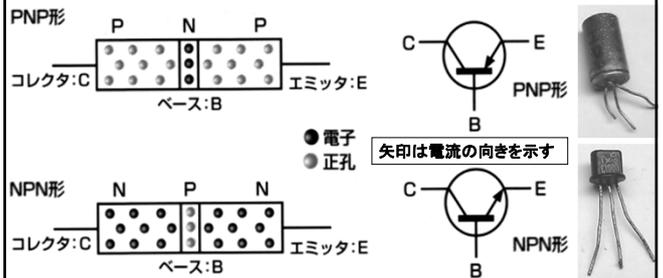


図 104. Nチャネル形FET (問 105)

21

トランジスタ Transistor 電流を増幅する素子

PNP形トランジスタ P形の中にN形半導体をはさんだもの。
NPN形トランジスタ N形の中にP形半導体をはさんだもの。
間にはさまれた半導体の厚さは非常に薄い(数 μm)。
ベース B、エミッタ E、コレクタ C の 3本の端子をもつ。



22

トランジスタ transistor

= transfer(電気を伝える) + resistor(抵抗素子)

1947年にアメリカのベル研究所で、長距離電話を実用化するために、通話信号を増幅する素子をショックレーらが発明。1956年ノーベル物理学賞。

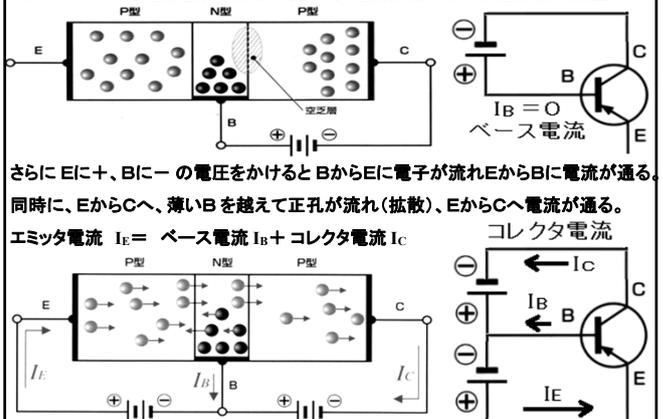
従来の増幅器であった真空管に比べ、安定化、小型化、低消費電力化を実現した。

電流を運ぶ媒体(キャリア)に、電子と正孔の2種類を利用しているので、バイポーラトランジスタともいう。(FETは電子または正孔の1種類のキャリアを利用)

23

PNP形トランジスタ (旧式トランジスタに多い形)

Bに+, Cに-の電圧をかけるだけではBに電流は流れない。(空乏層の発生)



24

NPN形トランジスタ (現在はNPN形が多い)
 Bにー、Cに+ の電圧をかけるだけでは Bに電流は流れない。(空乏層の発生)

さらに Eにー、Bに+ の電圧をかけると BからEに正孔が流れBからEに電流が通る。同時に、EからCへ、薄いBを越えて電子が流れ(拡散)、CからEへ電流が通る。
 エミッタ電流 $I_E =$ ベース電流 $I_B +$ コレクタ電流 I_C

25

増幅 amplification 増幅器=アンプ amplifier
 何らかの信号の入力に対して元の信号より大きな出力信号を得ること。
 心電図や脳波などの微弱な電流を、観察しやすいように大きな電流や電圧の信号に変換する。
 入力信号のもつエネルギーそのものを拡大するのではなく、増幅器に外部から供給したエネルギー(電源)を、入力に応じて制御する装置。
 増幅器は、水道の蛇口と似たような装置と考えると理解しやすい。蛇口は、上水道から来る大量の水を、調節して流す水量を増減する。増幅器は、電源から来る大電流を、入力信号と比例する分量で通過させ、入力信号と同じ波形の電流信号が大きくなって出力される。

26

ベース電流 I_B の微小な変化で、コレクタ電流 I_C を大きく変えられる。(電流増幅作用)
 ベース電流が大きいと、ベース内の正孔がベース半導体の端に寄るので、エミッタからコレクタへの電子の流れが良くなる。
 ベース電流の変化量 ΔI_B に対するコレクタ電流の変化量 ΔI_C の比率を電流増幅率 β という。 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
 エミッタ電流 I_E は I_C と I_B の和になる。

27

トランジスタの欠点
 電流増幅素子なので、入力電極間に電流が流れないと動作しない。
 入力に電流が流れる=入力インピーダンスが低い
 ベース、コレクタ、エミッタの各端子の間の抵抗値が小さい。
 端子間に電流が常に流れている。
 半導体の内部で電子と正孔が常に動いているので発熱しやすい。高密度な集積回路には向かない。
 温度で増幅率が変動する。

この問題を解決するために FETが作られた。

28

FET Field Effect Transistor
 1960年に アメリカのベル研究所で、カーンらが発明。
 ベル研究所は、真空管と動作が類似したFETを、先に作ろうとしていた。
 トランジスタは、FETの開発段階で作られたもの。
 トランジスタに比べ、端子間の抵抗値が高く(インピーダンスが高い)、
 発熱量が低く、より低消費電力化、小型化、高集積化可能。
 現在の集積回路にはFETが多く使われている。
 FETは電子または正孔の1種類のキャリアを利用。

29

インピーダンス impedance
 回路に交流電流を流した際に生じる抵抗(交流抵抗)。
 心電図や脳波などの生体信号は、電流や電圧が常に変動しており、交流電流である。
 皮膚、筋肉、脂肪などの生体組織には、電気的に抵抗やコンデンサなどと同様の成分が含まれており、
 生体は、生体信号として発生する交流電流を通すが、その信号に対する抵抗(組織インピーダンス)も持つ。

30

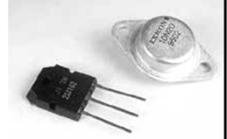
微弱な生体信号を正確に測定する装置は、生体に付ける入力端子、電極間に電流が流れないほうが良い。

測定装置から電極を介して生体に電流が流れると生体はインピーダンスを持つので電圧が生じ、測定したい心電図や脳波の波形を変形させる。測定器が、測定したい信号を変化させてはいけない。

できるだけ装置の入力電極に電流が流れないように、入力インピーダンスの高い測定器が必要。(電極間の抵抗が高いと電流が流れにくい。)

31

FET (電界効果(形)トランジスタ) 電圧を増幅する素子
Field Effect Transistor
ソース S、ゲート G、ドレイン D の3本の端子をもつ。



接合形FET (Junction-FET J-FET)

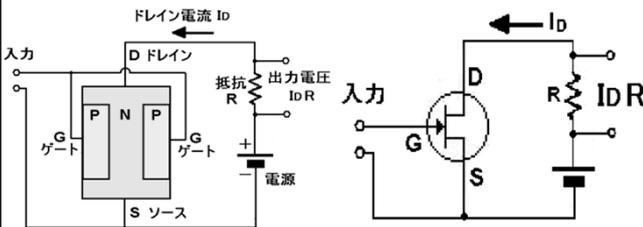
PチャンネルFET P形半導体基板に2個のN形端子。
NチャンネルFET N形半導体基板に2個のP形端子。

MOS形FET (Metal Oxide Semiconductor FET)

NMOS形FET N形の中にP形半導体
PMOS形FET P形の中にN形半導体
CMOS形FET NMOSとPMOSの複合体

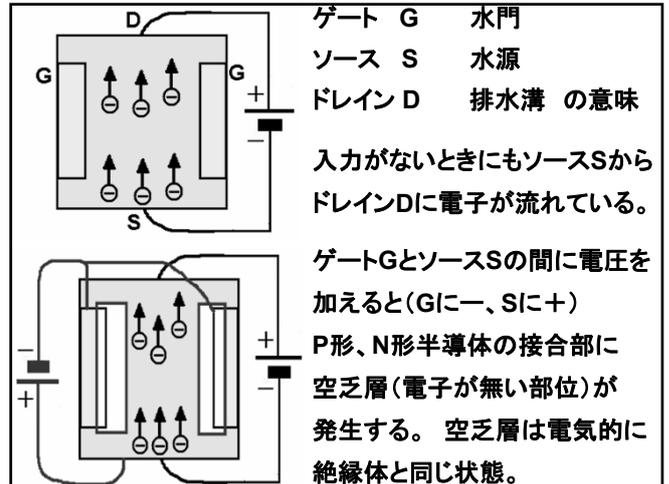
32

接合形FETの動作原理 (Nチャンネル J-FETの場合)
(Pチャンネルの場合は、半導体のP形とN形、電源の向き、電子と正孔が入れ替わるだけで、同じ原理。回路記号の矢印の向きも逆になる。)

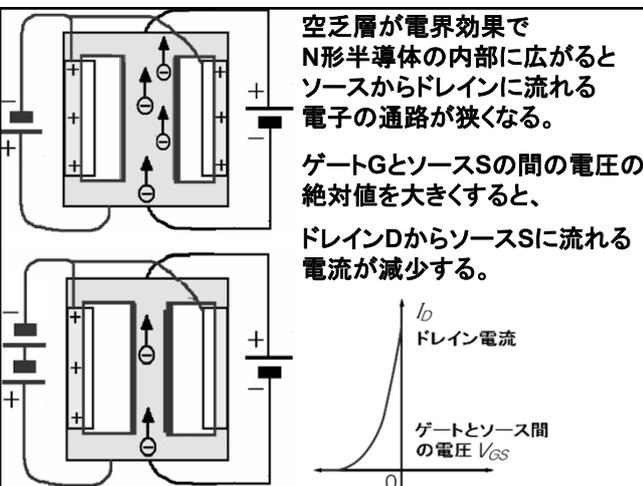


ゲートに加える電圧で出力電流が変化する(電圧増幅作用)
入力端子には電流がほとんど流れない(高インピーダンス)

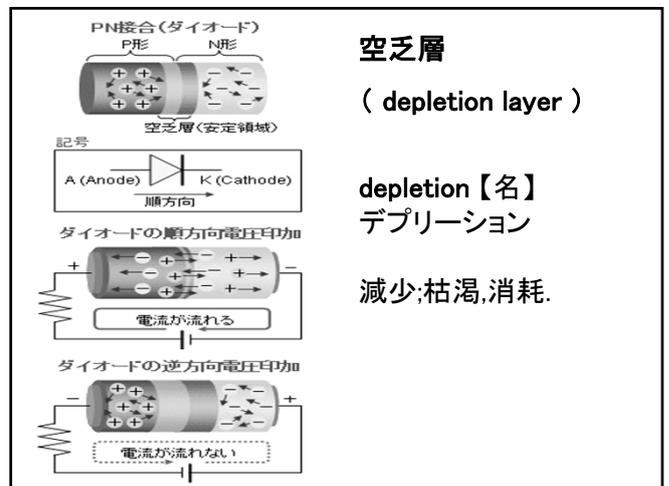
33



34



35



36

MOS形 FETの動作原理 (NチャンネルMOSFETの場合)
 (Pチャンネルの場合は、半導体のP形とN形、電源の向き、電子と正孔が入れ替わるだけで、同じ原理。回路記号の矢印の向きも逆になる。)

＜NMOS＞
 S G D
 n n
 p

＜PMOS＞
 ソース ゲート ドレイン
 S G D
 p p
 n
 シリコン基板断面 チャネル

SiO₂(酸化膜)
 電極

記号

金属電極 Metal
 酸化膜 Oxide
 半導体 Semiconductor
 の、3層構造なのでMOS

37

NMOS FET

金属電極 絶縁体(酸化膜) NMOS FET

ソースSにー、ドレインDに+の電圧を加えても、ゲートGに入力電圧がないときにはソースSからドレインDに電子が流れない($I_D = 0$)。

入力 D G S
 I_D
 R $I_D R$

38

ゲートGに+の電圧をかけると絶縁体の酸化膜の内部と周囲に静電気が発生する。ソースとドレインの間のP半導体内部に電子の層が出現する(チャンネル)(channel: 水路)。チャンネルを伝ってソースからドレインに電子が流れる。

39

MOS形FETは、入力信号がないときは出力電流が流れないので、J-FETよりも半導体の発熱が少なく、消費電力も少ないので、集積回路に適する。酸化膜は薄く、外部からの静電気で破壊されやすい。

半導体素子はすべて熱に弱く、温度でPN接合部の特性が変動するので、発熱が少ない素子ほど動作が安定する。

MOS形FETは、PMOSとNMOSを組み合わせた回路をよく用いるので、これを組み合わせたCMOS Complementary MOSが使われる。

＜CMOS＞
 n n p p
 p n

記号

40

真空管 (電子管) Vacuum tube

3極真空管は、NチャンネルJ-FETと同じ動作。電極間が真空なので、入力インピーダンスが極めて高い。エジソンが発明。

ヒータで加熱したカソード電極からプレート電極に電子が飛ぶ。その間の金網状のグリッドに電圧をかけてプレートに飛ぶ電子の量を調節する。

3極 真空管 N channel J-FET

入力 グリッド P プレート
 K ヒータ
 カソード

41

真空管は、大きい、壊れやすい、消費電力が多い欠点を持つが、電極間が真空なので入力インピーダンスは極めて高く、電圧増幅特性は非常に優秀。高性能な測定装置やオーディオ装置、大出力の送信機(放送局など)、電子管(ブラウン管など)では、現在でも用いられている。

42

2008年 国家試験 解答 3

問題 95 入力インピーダンスが最も高いのはどれか。

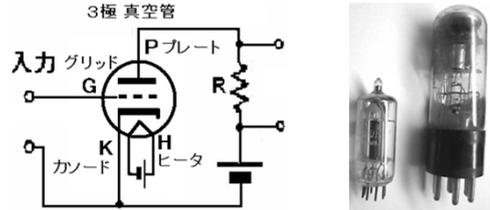
1. 真空管
2. 接合形 FET
3. MOS 形 FET
4. NPN 形トランジスタ
5. PNP 形トランジスタ

入力インピーダンスが高い
= 入力端子間に流れる電流が少ない
(通る電子が少ない).

43

真空管(電子管) Vacuum tube

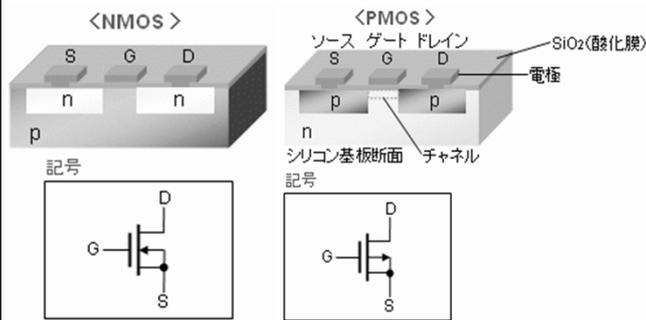
真空管の電極間は真空なので、入力インピーダンスは極めて高いが、ヒータで加熱したカソード電極からプレート電極に電子が飛び、その間の金網状のグリッドに電圧をかけてプレートに飛ぶ電子の量を調節するので、真空中を飛ぶ電子の流れが入力端子間に電流を発生する。



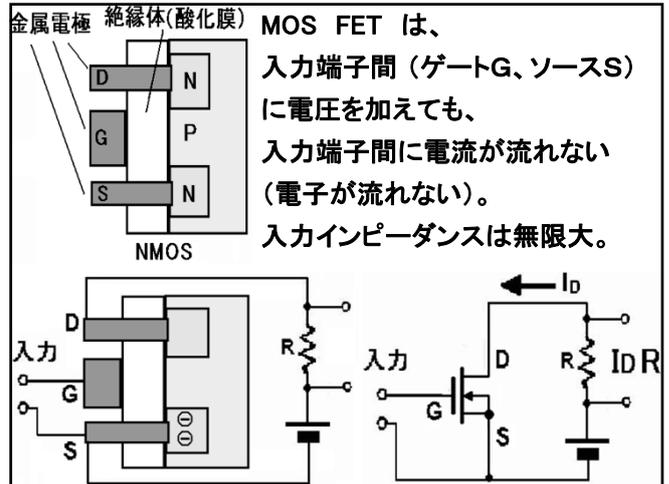
44

MOS形 FET

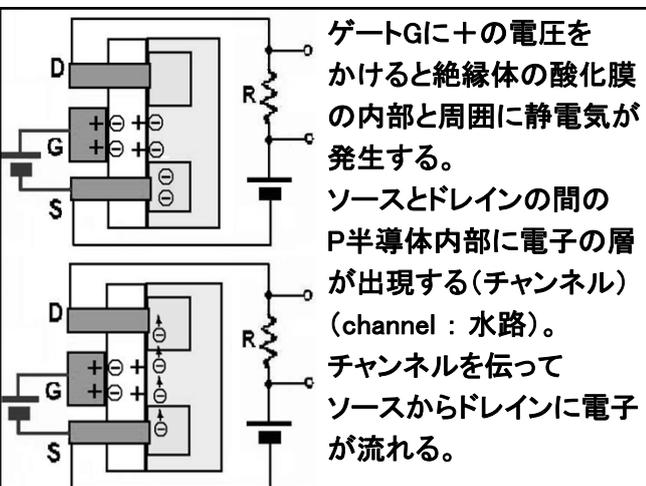
金属電極 Metal、酸化膜 Oxide、半導体 Semiconductor の、3層構造なのでMOS。入力電極間は、酸化膜で絶縁されている。



45



46



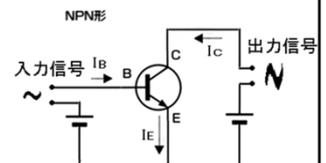
ゲートGに+の電圧をかけると絶縁体の酸化膜の内部と周囲に静電気が発生する。
ソースとドレインの間のP半導体内部に電子の層が出現する(チャンネル) (channel: 水路)。
チャンネルを伝ってソースからドレインに電子が流れる。

47

トランジスタの欠点

電流増幅素子なので、入力電極間に電流が流れないと動作しない。
入りに電流が流れる=入力インピーダンスが低い
ベース、コレクタ、エミッタの各端子の間の抵抗値が小さい。
端子間に電流が常に流れている。
半導体の内部で電子と正孔が常に動いているので発熱しやすい。高密度な集積回路には向かない。
温度で増幅率が変動する。

この問題を解決するためにFETが作られた。



48