

## Tranzistorul MOS

### 1. Prezentare generală

Tranzistorul MOS (**Metal Oxide Semiconductor**) este un dispozitiv semiconductor, realizat din siliciu, care are **trei terminale**, denumite **DRENĂ**, **GRILĂ**, respectiv **SURSĂ**.

În funcție de particularitățile sale constructive, tranzistoarele MOS se clasifică în două mari categorii:

- tranzistoare MOS cu canal indus
- tranzistoare MOS cu canal inițial

Canalele amintite mai sus reprezintă elementul din structura internă a tranzistorului MOS care asigură transferul de sarcină electrică între drenă și sursă. Prin transferul de sarcină electrică între cele două terminale se asigură apariția fenomenelor de conducție electrică în tranzistor și astfel, apariția curentului electric prin acesta.

În plus, în funcție de tipul materialului semiconductor din care este construit canalul, tranzistoarele MOS se împart în 2 tipuri și anume:

- tranzistoare MOS cu canal de tip N (canalul tranzistorului este realizat dintr-un material semiconductor de tip N, caz în care sarcinile electrice care se deplasează prin canal sunt constituite din electroni, particule care au sarcină electrică negativă);
- tranzistoare MOS cu canal de tip P (canalul tranzistorului este realizat dintr-un material semiconductor de tip P, caz în care sarcinile electrice care se deplasează prin canal sunt constituite din goluri = particule fictive, care au sarcină electrică pozitivă);

În circuitele electronice, tranzistoarele MOS sunt simbolizate ca în Figura 1.

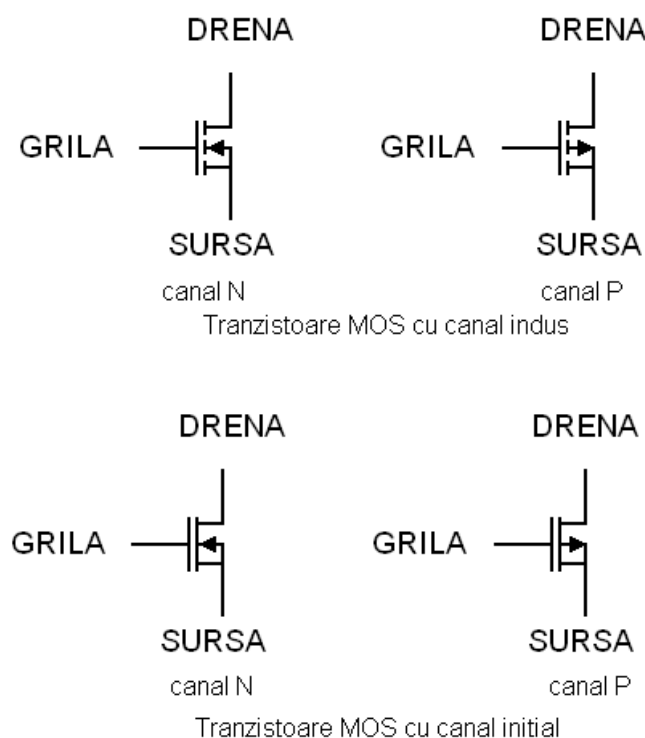


Figura 1. Simbolul electronic al tranzistoarelor MOS.

La nivelul tranzistorului MOS apar 4 mărimi electrice:

- 1 curent electric și anume curentul care este generat între DRENĂ și SURSĂ:
  - $i_D$  – curentul de drenă
- 3 tensiuni electrice și anume tensiunile între terminalele tranzistoarelor:
  - $v_{GS}$  – tensiunea grilă-sursă

- $v_{DS}$  – tensiunea drenă-sursă
- $v_{GD}$  – tensiunea grilă-drenă

Sensul curentului de drenă depinde de valorile potențialelor electrice aplicate pe drenă, respectiv sursă și de tipul canalului din structura tranzistorului. Astfel, pentru tranzistoarele cu canal N, dacă potențialul electric al drenei este superior potențialului electric al sursei, atunci sensul curentului electric prin tranzistor este de la drenă spre sursă. În caz contrar, sensul curentului prin tranzistor este de la sursă spre drenă. La tranzistoarele cu canal P sensul curentului se inversează în raport cu cazul tranzistoarelor de tip N.

Referințele tensiunilor depind de tipul canalului utilizat în structura tranzistorului MOS. În Figura 2 sunt prezentate sensul curentului (pentru cazul în care potențialul electric al drenei este mai mare decât cel al sursei), respectiv referințele tensiunilor de terminal. În această figură s-a reprezentat și curentul din grila tranzistorului notat  $i_G$ , deși valoarea acestui curent este întotdeauna nulă, datorită unui strat izolator din structura tranzistorului MOS.

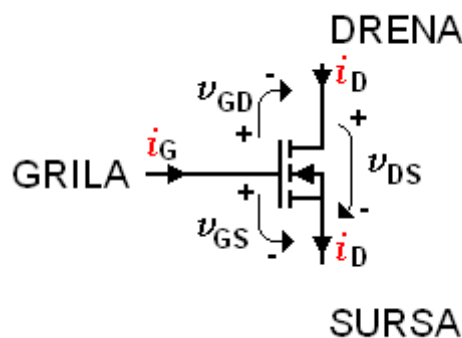


Figura 2. Mărimile electrice ale tranzistoarelor MOS; curentul  $i_G=0$  întotdeauna.

## 2. Regiunile și ecuațiile de funcționare ale tranzistorului MOS

Principiile de funcționare ale celor două categorii de tranzistoare MOS, cu canal indus, respectiv cele cu canal inițial sunt similare, și din acest motiv, în continuare, se vor prezenta numai tranzistoarele MOS cu canal indus, fiind scoase în evidență numai diferențele între cele 2 categorii de tranzistoare.

Relațiile dintre mărimile electrice ale tranzistorului MOS depind de regimul de funcționare al acestuia. Tranzistorul MOS poate funcționa în 3 regiuni de funcționare distincte, determinate de relațiile care se stabilesc între tensiunile tranzistorului. Astfel, regiunile de funcționare ale tranzistorului MOS sunt:

### • REGIUNEA DE BLOCARE:

- condiția de funcționare:  $v_{GS} < V_{TH}$  (canal N)  
unde  $V_{TH}$  reprezintă un parametru al tranzistorului MOS, numit **tensiune de prag**; valoarea tensiunii de prag  $V_{TH}$  tensiuni este:
  - pozitivă, pentru tranzistorul MOS cu canal indus de tip N,
  - negativă pentru tranzistorul MOS cu canal indus de tip P;
  - negativă pentru tranzistorul MOS cu canal inițial de tip N,
  - pozitivă pentru un tranzistor MOS cu canal inițial de tip P;
- în această regiune, funcționarea tranzistorului MOS este descrisă de ecuația de funcționare:

$$i_D = 0$$

**curentul tranzistorului în regiunea de blocare**

- în această regiune, comportamentul tranzistorului MOS poate fi exploatat pentru prelucrarea sau generarea semnalelor digitale.

- **REGIUNEA LINIARĂ:**

- condiția de funcționare:  $v_{GS} > V_{TH}$  și  $v_{DS} < v_{GS} - V_{TH}$
- în această regiune, funcționarea tranzistorului MOS este descrisă de ecuația de funcționare:

$$i_D = 2 \cdot k \cdot \left( v_{GS} - V_{TH} - \frac{v_{DS}}{2} \right) \cdot v_{DS}$$

unde **k** este un parametru al tranzistorului, a cărei valoare se exprimă în  $\frac{A}{V^2}$  (amperi împărțit la volți ridicat la pătrat).

- în această regiune, tranzistorul MOS se comportă ca o rezistență electrică, a cărei valoare poate fi controlată de tensiunea grilă-sursă.

- **REGIUNEA DE SATURAȚIE:**

- condiția de funcționare:  $v_{GS} > V_{TH}$  și  $v_{DS} > v_{GS} - V_{TH}$
- în această regiune, funcționarea tranzistorului MOS este descrisă de ecuația de funcționare:

$$i_D = k \cdot (v_{GS} - V_{TH})^2$$

**curentul tranzistorului în regiunea de saturație**

- în această regiune de funcționare tranzistorul MOS poate fi utilizat pentru prelucrarea analogică a semnalelor, fiind singura regiune de funcționare în care tranzistorul MOS poate **AMPLIFICA LINIAR** semnalele (informația);

Observație: condițiile de funcționare specificate mai sus sunt valabile pentru tranzistoarele MOS cu canal de tip N; în cazul tranzistoarelor MOS cu canal P, condițiile de funcționare sunt similare, cu mențiunea că ordinea indicilor care specifică tensiunile implicate, se inversează:  $v_{GS} \rightarrow v_{SG}$ ,  $v_{DS} \rightarrow v_{SD}$ .

### 3. Modelarea funcționării tranzistorului MOS În regim variabil de semnal mic

Din ecuațiile de funcționare ale tranzistorului MOS, specifice regiunilor de funcționare, se constată că tranzistorul MOS este un **ELEMENT DE CIRCUIT NELINIAR**. Analiza circuitelor care conțin elemente de circuit neliniare este dificilă. Din acest motiv, întotdeauna este util ca, pentru aceste elemente de circuit neliniare, să se dezvolte **MODELE LINIARE**, valabile în anumite condiții de funcționare. La fel se pune problema și în cazul tranzistoarelor MOS.

#### Modelarea funcționării tranzistorului MOS în variabil de semnal mic.

Deoarece tranzistorul MOS poate amplifica liniar numai în regiunea de saturație, este util să se dezvolte un model, care să descrie comportamentul dinamic al tranzistorului (la variațiile mărimilor sale electrice) în această regiune de funcționare.

Modelul prezentat în continuare se poate aplica numai în cazul în care tranzistorul MOS funcționează în regim variabil de semnal mic.

Un tranzistor MOS funcționează în regim variabil de semnal mic dacă mărimile sale electrice au valori variabile în timp, iar amplitudinea variației tensiunii GRILĂ-SURSĂ este mai mică decât o valoare de aproximativ 12,5[mV]:  $v_{GS} < 12,5[mV]$ . În aceste condiții, comportamentul tranzistorului MOS poate fi considerat ca fiind LINIAR și în consecință poate fi modelat prin intermediul unui circuit LINIAR.

Din ecuația de funcționare a tranzistorului MOS valabilă în regiunea de saturație se remarcă faptul că valoarea curentului de drenă  $i_D$  variază în funcție de tensiunea grilă-sursă  $v_{GS}$ . Valoarea variației curentului de drenă  $i_D$  se poate determina determinând derivata curentului  $i_D$  în funcție de tensiunea  $v_{GS}$  pentru cazul în care valoarea curentului de DRENĂ este menținută la o valoare constantă, notată  $I_D$ . Valoarea derivatei respective se notează cu  $g_m$  și se numește **PANTA** tranzistorului MOS:

$$g_m \stackrel{\text{definitie}}{=} \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{i_D=I_D}$$

Ținând cont de ecuația de funcționare a tranzistorului MOS valabilă în regiunea de saturație, relația de calcul a pantei tranzistorului este:

$$g_m = 2\sqrt{k \cdot I_D}$$

unde  $I_D$  este **curentul CONTINUU** prin DRENA tranzistorului.

Panta tranzistorului MOS descrie complet comportamentul tranzistorului MOS în regim variabil de semnal mic, astfel încât, circuitul echivalent al tranzistorului, care modelează comportamentul acestuia în regimul de funcționare amintit, este cel prezentat în Figura 3. În acest circuit, mărimile electrice  $I_g$ ,  $I_s$  și  $I_d$  reprezintă amplitudinile curenților de grilă, sursă, respectiv drenă, iar  $V_{gs}$  reprezintă amplitudinea tensiunii grilă-sursă. Circuitul prezentat este valabil numai dacă frecvența de lucru a tranzistorului MOS este plasată în domeniul frecvențe joase și medii, adică este mai mică decât aproximativ **1MHz**.

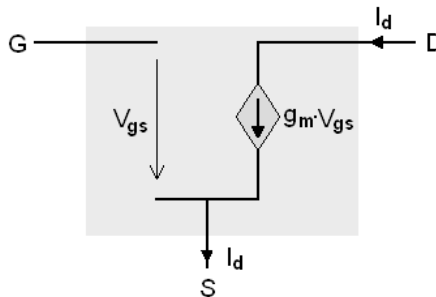


Figura 3. Circuitul echivalent ale modelului tranzistorului MOS în regim variabil de semnal mic, pentru frecvențe joase și medii.

Pentru frecvențe mai mari decât aproximativ **1[MHz]** (domeniul frecvențelor înalte), funcționarea tranzistorului MOS este afectată de anumite fenomene dinamice, de natură capacitivă, care pot fi modelate prin intermediul unor **CAPACITĂȚI PARAZITE**, reunite în parametrii notați  $c_{gs}$ , respectiv  $c_{ds}$ . Circuitul echivalent valabil în acest caz este prezentat în Figura 4.

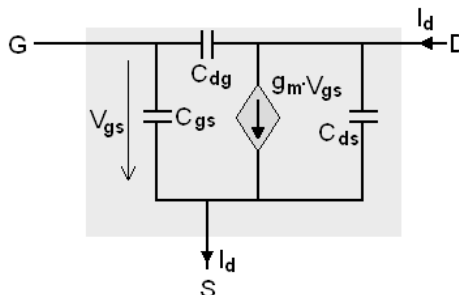


Figura 4. Circuitul echivalent ale modelului tranzistorului MOS în regim variabil de semnal mic, pentru frecvențe înalte.

#### 4. Polarizarea tranzistoarelor MOS

Regiunea de funcționare a tranzistorului MOS este impusă prin polarizarea acestuia. Circuitul electronic care realizează polarizarea tranzistorului MOS se numește circuit de polarizare.

În cazul sistemelor electronice analogice, circuitul de polarizare trebuie astfel proiectat încât să asigure funcționarea tranzistorului MOS în **Regiunea de Saturație**.

Prin polarizarea tranzistorului MOS, la nivelul acestuia se stabilesc mărimi electrice **CONTINUE** (curenți electrici de terminal, respectiv tensiuni electrice între terminale).

O pereche de mărimi electrice **CONTINUE**, compusă dintr-un curent de terminal și o tensiune între 2 terminale formează **PUNCTUL STATIC de FUNCȚIONARE** al tranzistorului respectiv (pe scurt PSF-ul tranzistorului). PSF-ul tranzistorului furnizează informații despre regiunea în care acesta funcționează. Din acest motiv, în sistemele electronice analogice, circuitul de polarizare al tranzistorului MOS trebuie astfel proiectat încât să asigure plasarea PSFului tranzistorului respectiv în regiunea de saturație.

Pentru tranzistoarele MOS, perechea de mărimi electrice care definește PSF-ul este:

- curentul continuu din drenă:  $I_D$
- tensiunea continuă drenă-sursă:  $V_{DS}$

#### Circuite de polarizare pentru tranzistoarele MOS

Circuitele de polarizare ale tranzistoarelor MOS au rolul de a impune funcționarea tranzistoarelor MOS, în regim de curent continuu, în **regiunea de saturație**. Din acest motiv, circuitul de polarizare trebuie astfel proiectat încât să determine ca tensiunile electrice CONTINUE, stabilite între terminalele tranzistorului MOS, să satisfacă următoarele condiții:

$$V_{GS} > V_{TH}$$

și

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

Dacă aceste condiții nu sunt satisfăcute, atunci tranzistorul MOS nu funcționează în regiunea de saturație.

În continuare se va discuta cazul **tranzistoarelor MOS cu canal de tip N**.

##### a. Circuit de polarizare cu divizor rezistiv în grilă

Pentru tranzistoarele MOS cu canal indus, circuitul de polarizare elementar este prezentat în Figura 5. Circuitul prezentat se numește cu divizor rezistiv în grilă deoarece grupul de rezistoare **R<sub>G1</sub> R<sub>G2</sub>** compun un divizor rezistiv pentru tensiunea de alimentare **V<sub>DD</sub>**, a cărei tensiune de ieșire se consideră a fi din grila tranzistorului MOS la masa circuitului.

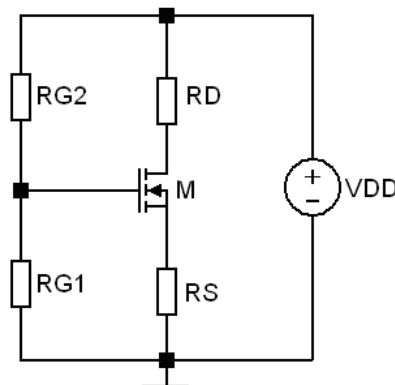
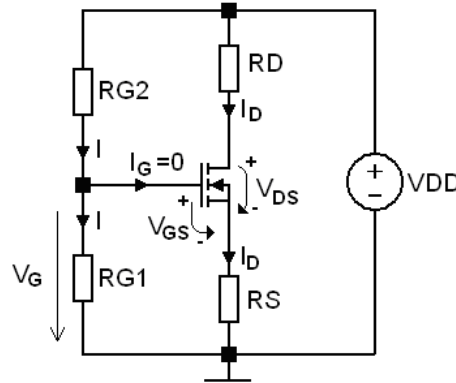


Figura 5. Circuit elementar de polarizare cu divizor rezistiv în grilă.

În continuare se prezintă modul în care se determină valoarea PSF-ului tranzistorului MOS. Calculele se vor efectua pe circuitul din figura de mai jos:



- Se determina valoarea tensiunii  $V_G$  aplicând TK2 pe bucla **RG2, RG1 si VDD** si apoi aplicând legea lui Ohm pe **RG1**:

$$R_{G2} \cdot I + R_{G1} \cdot I - V_{GG} = 0$$

$$V_G = R_{G1} \cdot I$$

Rezultă:

$$V_G = \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot V_{DD}$$

- 2. Determinarea curentului  $I_D$ :**  
Se presupune că tranzistorul MOS lucrează în regiunea de saturatie. În acest caz, tranzistorul MOS funcționează după ecuația:

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Aplicînd TK2 pe bucla **RG1, VGS, RS** rezultă:

$$V_{GS} + R_S \cdot I_D - V_G = 0$$

unde  $V_G$  are expresia din relația dedusă la punctul 1. Ecuațiile de mai sus formează un sistem de ecuații, în necunoscutele  $V_{GS}$  și  $I_D$ .

**Din cele 2 necunoscute, mai întâi se determină întotdeauna necunoscuta  $V_{GS}$ .**

Din cele 2 soluții posibile pentru tensiunea  $V_{GS}$ , întotdeauna se alege soluția care satisface condiția:

$$V_{GS} > V_{TH}$$

unde  $V_{TH}$  este tensiunea de prag a tranzistorului; dacă nici una din soluțiile obținute pentru  $V_{GS}$  nu satisface această condiție, atunci tranzistorul MOS funcționează în regiunea de blocare și în acest caz  $I_D = 0$ .

După determinarea tensiunii  $V_{GS}$ , curentul  $I_D$  se calculează din ecuația de funcționare a tranzistorului MOS  $I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$ .

- **Determinarea tensiunii  $V_{DS}$ :**

se aplica TK2 pe bucla **RD, VDS, RS, VDD**:

$$R_D \cdot I_D + V_{DS} + R_S \cdot I_D - V_{DD} = 0$$

Rezulta: 
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot (R_D + R_S)$$

- **Verificare presupunere initiala**

S-a presupus ca tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație. La final, această presupunere trebuie verificată. Tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație dacă valorile tensiunilor  $V_{GS}$  și  $V_{DS}$  calculate ca mai sus satisfac condiția:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

### b. Circuit cu autopolarizare a grilei

Pentru polarizarea tranzistoarelor MOS cu **canal inițial**, pe lângă circuitul de polarizare cu divizor rezistiv în grilă se mai utilizează încă un circuit de polarizare, denumit **circuit cu autopolarizare a grilei**. Acest circuit de polarizare este mai simplu și poate fi utilizat numai în cazul tranzistoarelor MOS cu canal inițial, deoarece utilizarea acestuia se bazează pe faptul că tranzistoarele MOS cu canal inițial au tensiunea de prag  $V_{TH}$  de semn contrar tensiunii de prag a tranzistoarelor MOS cu canal indus. De exemplu, pentru tranzistoarele cu canal de tip N, cele care au canal indus au valoarea  $V_{TH} > 0[V]$ , iar cele care au canal inițial, au valoarea  $V_{TH} < 0[V]$ . Structura circuitului cu autopolarizare a grilei este prezentat în Figura 6.

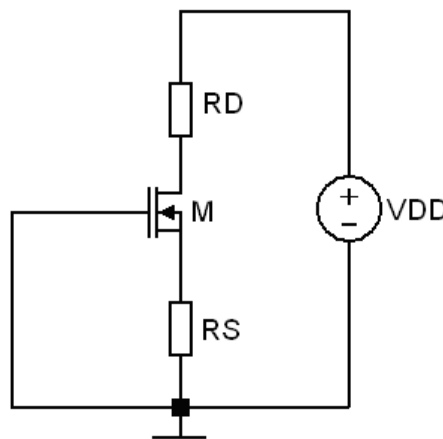
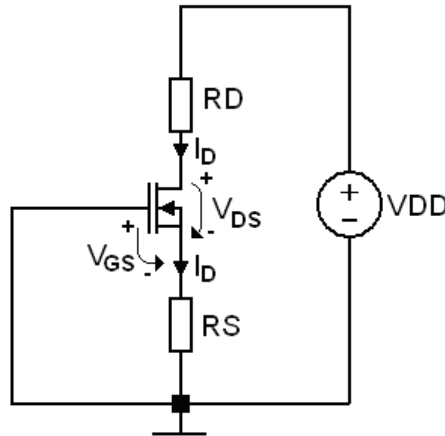


Figura 6. Circuit cu autopolarizare a grilei – valabil numai pentru tranzistoarele MOS cu canal inițial.

Punctul Static de Funcționare a acestui tranzistor se determină pe circuitul de calcul din figura de mai jos.



- 1. Determinarea curentului  $I_D$ :

Se presupune că tranzistorul MOS lucrează în regiunea de saturatie. În acest caz, tranzistorul MOS funcționează după ecuația:

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Aplicînd TK2 pe bucla  $V_{GS}$ ,  $R_S$  rezultă:

$$V_{GS} + R_S \cdot I_D = 0$$

Ecuatiile de mai sus formează un sistem de ecuații, în necunoscutele  $V_{GS}$  și  $I_D$ .

**Din cele 2 necunoscute, mai întâi se determină întotdeauna necunoscuta  $V_{GS}$ .**

Din cele 2 soluții posibile pentru tensiunea  $V_{GS}$ , întotdeauna se alege soluția care satisface condiția:

$$V_{GS} > V_{TH}$$

unde  $V_{TH}$  este tensiunea de prag a tranzistorului; dacă nici una din soluțiile obținute pentru  $V_{GS}$  nu satisface această condiție, atunci tranzistorul MOS funcționează în regiunea de blocare și în acest caz  $I_D = 0$ .

După determinarea tensiunii  $V_{GS}$ , curentul  $I_D$  se calculează din ecuația de funcționare a tranzistorului MOS  $I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$ .

- Determinarea tensiunii  $V_{DS}$ :**

se aplica TK2 pe bucla  $R_D$ ,  $V_{DS}$ ,  $R_S$ ,  $V_{DD}$ :

$$R_D \cdot I_D + V_{DS} + R_S \cdot I_D - V_{DD} = 0$$

Rezulta:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D \cdot (R_D + R_S)$$



- **Verificare presupunere initiala**

S-a presupus ca tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație. La final, această presupunere trebuie verificată. Tranzistorul MOS funcționează în regiunea de saturație dacă valorile tensiunilor  $V_{GS}$  și  $V_{DS}$  calculate ca mai sus satisfac condiția:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

În cazurile prezentate mai sus, s-a considerat că tranzistoarele MOS au canal de tip N. Pentru cele cu canal de tip P, circuitele de polarizare au aceeași structură, dar bornele sursei de alimentare  $V_{DD}$  sunt inversate față de cazul tranzistorului MOS cu canal N – adică, borna “-” se leagă la  $R_D$  și  $R_{G2}$ , iar borna “+” reprezintă masa circuitului.