

Circuit de polarisation: implémentation



Electronique II

Du moment qu'on a appris comment on polarise un transistor et qu'on a vu qu'il va falloir lui appliquer une tension fixe sur sa base, pour imposer un courant dans son émetteur, dans cette partie, nous allons apprendre comment réaliser ce circuit. C'est-à-dire que nous allons aborder la réalisation d'une tension fixe à imposer sur la base d'un transistor. Vous verrez, c'est extrêmement simple. Une fois qu'on a terminé avec cette partie, nous allons tout de suite passer à l'utilisation du transistor polarisé. Et vous verrez, c'est la même chose qu'on va appeler tout d'un coup "source de courant". Parce qu'il suffit de le regarder depuis son collecteur et on va voir qu'il y a un courant fixe qui sort ou qui est absorbé par le collecteur, et nous allons l'utiliser comme source de courant. Dès qu'on a fini avec la démonstration qu'un transistor qu'on voit depuis le collecteur et qui est polarisé avec la résistance qu'on va voir tout de suite nous amène à une source de courant, nous allons tout de suite aborder l'intégration du même circuit, qui a été réalisé par des composants passifs, avec des composants discrets, et on veut passer sur un circuit intégré.

Notes

Summary



0m 05s

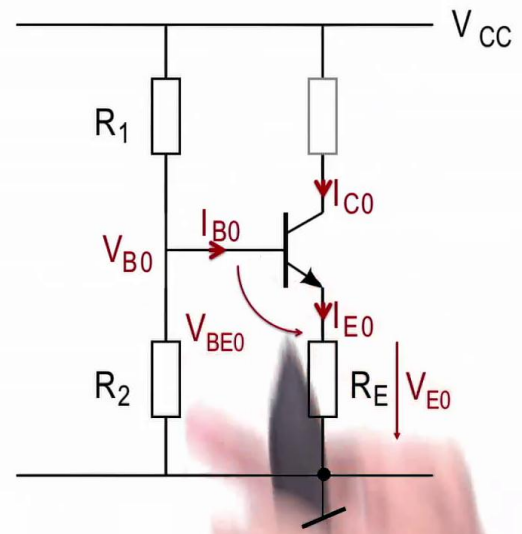
Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - U_J}{R_E}$$



Electronique II

Donc on voudrait implémenter sur une puce de silicium, ce qu'on appelle un circuit intégré, et démontrer que ça deviendrait beaucoup plus simple. Et on enlève beaucoup de ces composants passifs, et nous allons compter sur le transistor lui-même et réaliser des cellules, qu'on va voir à la fin de cette vidéo, pour faire des sources de courant. Prenons le schéma qu'on a vu tout à l'heure, donc ce fameux transistor : pour polariser et imposer un courant I_{C0} , on avait dit qu'on va imposer une tension V_{B0} . Imposer une tension V_{B0} sur un nœud d'un transistor en ayant une alimentation stabilisée à disposition. Donc on nous donne toujours ce qu'on appelle des rails d'alimentation et nous allons mettre un diviseur résistif qui est fait par les résistances R_1 et R_2 pour baisser cette tension et l'amener à un potentiel V_{B0} de notre choix. Parce que c'est comme ça qu'on avait vu que l'objectif, c'est imposer V_{B0} ; on utilise le transistor qui va faire chuter cette tension de l'ordre de grandeur d'une tension de jonction, et la tension V_{E0} qui nous reste nous permet d'imposer I_{E0} .

Notes

Summary



1m 12s

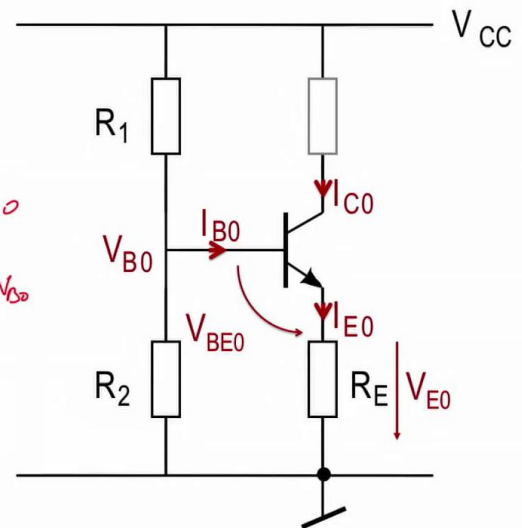
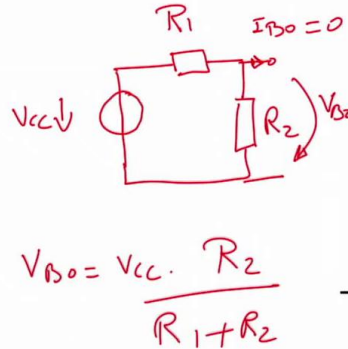
Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - U_J}{R_E}$$



Electronique II

J'aimerais bien prendre la source de tension V_{CC} qui est là, donc qui est ici, je dessine ma source V_{CC} , et je vais mettre un diviseur résistif qui va être réalisé par la résistance R_1 et la résistance R_2 et rappeler que ce genre de circuit va, à vide, me donner une tension là. Et cette tension-là, elle est proportionnelle si je parle de la tension V_{B0} , vous verrez, parce que ça va être la même chose que ceci, donc je vais écrire V_{B0} dans ce circuit-là égal à... ça, c'est V_{CC} , égal à V_{CC} qui multiplie R_2 et qui est divisé par la somme des 2, $R_1 + R_2$. Et voici, j'ai une tension qui est toujours inférieure à V_{CC} et qui dépend du rapport de résistances que j'ai choisi, c'est quelque chose que vous connaissez probablement très, très bien. Mais ceci est valable uniquement lorsque le courant que je tire de là, ce courant I que je vais écrire I_{B0} bien sûr parce que ça va être ce courant-là; ce courant I_{B0} doit absolument être égal à 0. Je peux écrire ceci et mettre l'égalité et tout ceci est correct. Mais est-ce que, vraiment, lorsque je réalise un diviseur résistif ici, je le prends et je le connecte dans ce nœud-là, ce courant I_{B0} est égal à 0 ?

Notes

Summary



Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

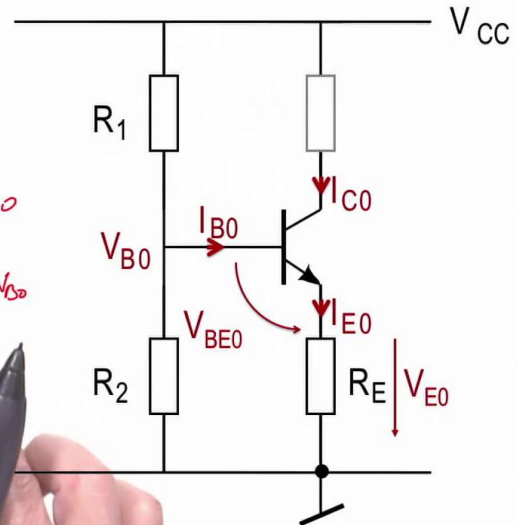
$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - U_J}{R_E}$$

$I \gg I_{B0}$



$$V_{B0} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Electronique II

Absolument pas, parce que là, il y a un courant I_{B0} . Donc ce circuit-là, si je l'utilise tel qu'il est sans réflexion, il ne va pas me permettre d'imposer une tension fixe. Donc nous avons appris que pour pouvoir imposer un courant dans un diviseur résistif, vous connaissez bien que le courant qui passerait là, ce courant, si le courant I_{B0} est égal à 0 il continue son chemin, il descend ici. Maintenant, si par hasard, vous tirez une certaine quantité de courant I_{B0} , vous verrez, vous allez chuter la tension aux bornes de votre résistance R_2 simplement parce qu'une partie de ce courant est partie. Vous pouvez très, très bien faire ce circuit et dire : Que se passe-t-il si ce courant que j'impose là, ce courant que je vais appeler I , est beaucoup plus grand que le courant I_{B0} ? Si vous mettez cette condition-là et vous dites : J'ai beaucoup plus de courant ici que ceci, la toute petite portion de courant qui part dans I_{B0} ne va jamais chuter cette tension ou la perturber, ou alors si elle le perturbe, elle le perturbe faiblement. Donc en d'autres termes si vous mettez cette condition-là, donc si vous imposez ici un courant qu'on appelle I , qui est beaucoup plus grand que le courant I_{B0} , vous arrivez à imposer ici un potentiel qui est quasi constant.

Notes

Summary



3m 45s

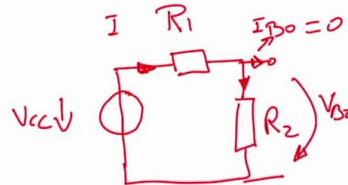
Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

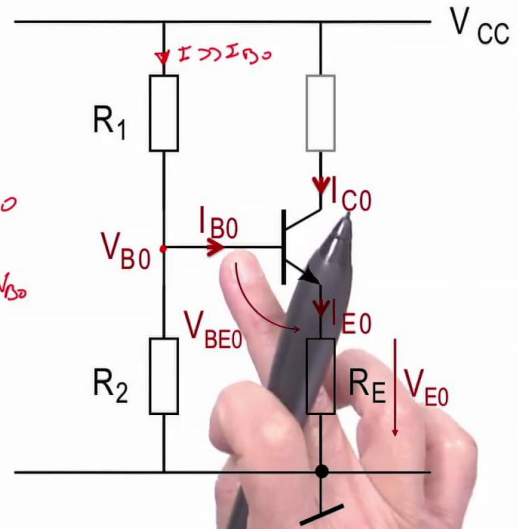
- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - U_J}{R_E}$$



$$V_{B0} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Electronique II

Et c'est ça qui va être appliqué pour réaliser une polarisation avec un diviseur résistif. Donc on est d'accord que ce n'est pas une source de tension idéale. C'est une source de tension qui dépend de ce courant I_{B0} . Ici, je vous donne des conditions : si vous vous arrangez pour mettre ici un courant qui est d'un ordre de grandeur 10 fois supérieur à ceci, voire plus que 10 fois, et bien vous perturbez peu le potentiel V_{B0} . Et alors, vous allez me dire : alors pourquoi ne pas mettre tout le temps un courant 100 fois, ou 1 000 fois supérieur à I_{B0} ? Faites très attention : ce courant qui passe dans ces 2 résistances, c'est un courant perdu, c'est un courant de polarisation. Ce courant-là est effectif, c'est le courant qui nous permet de calculer les paramètres petits signaux, et ceci, il n'a absolument pas d'impact sur ceci, il est simplement pour éviter que ce potentiel V_{B0} ne corresponde à celui qu'on aurait calculé par cette relation-là. Si vous écrivez cette relation, vous obtenez V_{B0} mais vous avez tenu compte du fait qu' I_{B0} n'existe pas. Et si ce I_{B0} existe, ça veut dire que vous avez posé un courant supérieur.

Notes

Summary



5m 16s

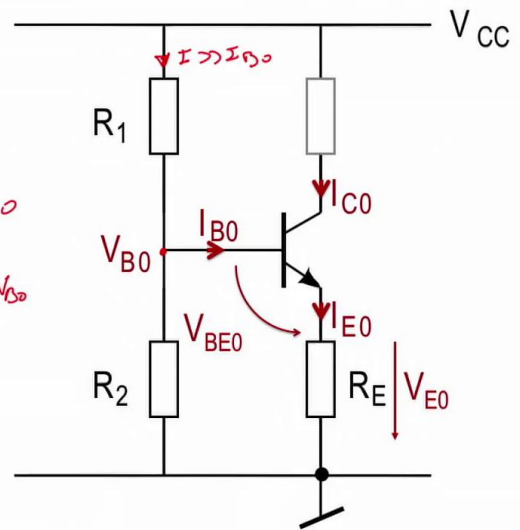
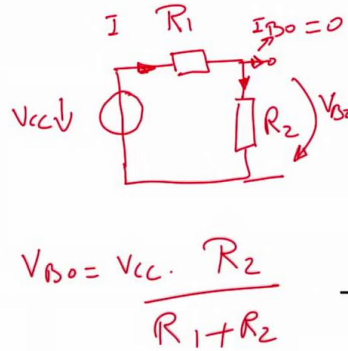
Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - U_J}{R_E}$$



Electronique II

Mais en réalité, le courant, c'est un courant qui est perdu, et c'est pour ça qu'on se contente d'aller de l'ordre de grandeur d'un rapport 10 entre ceci et ceci. Dans le pire des cas, si vous prenez ce courant égal à ce courant, ça signifie que c'est le β de votre transistor qui relie les deux, donc c'est comme si vous étiez en train de dire : J'ai β fois plus de courant là que là, donc β est égal à 100, 200, 300, selon le type de transistor que vous aurez choisi. Et à ce moment-là, votre potentiel V_{B0} n'est pas impacté par ceci.

Notes

Summary



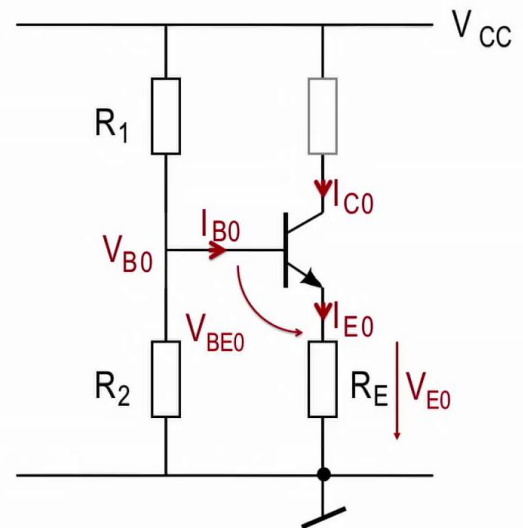
Schéma pratique de polarisation

- Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_{C0} \approx I_{E0} = \frac{V_{B0} - U_J}{R_E}$$



Electronique II

Je compte prendre ce même schéma et je compte maintenant aller commenter un peu plus ce qui va se passer avec mon diviseur résistif en le remplaçant par une source de tension telle que je l'ai présentée juste ici, avant d'effacer.

Notes

Summary

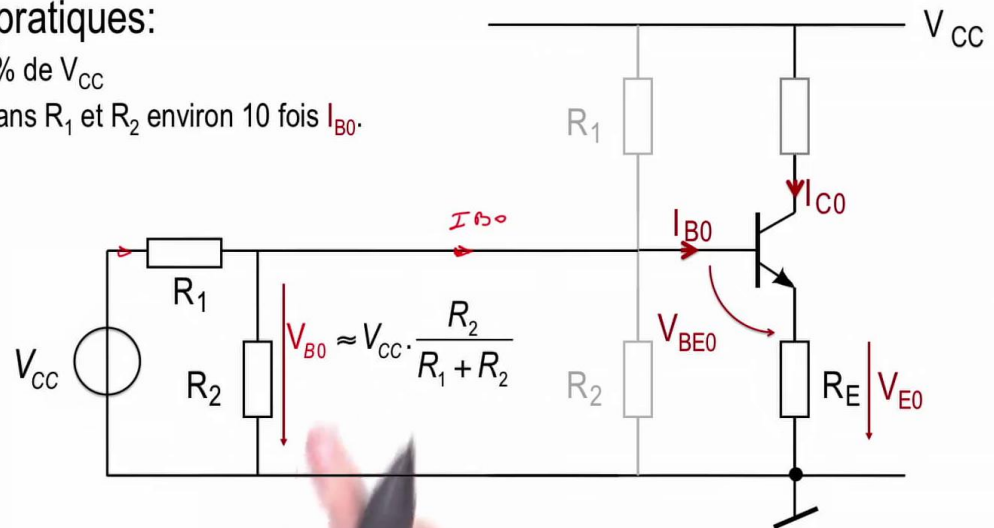


7m 01s

Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .



Electronique II

Et le voici. Donc j'ai simplement extrait mes 2 résistances, j'ai amené ma source de tension V_{CC} et j'ai mis mes 2 résistances comme on a vu tout à l'heure juste avant de mettre ce slide, et vous verrez que la tension là, c'est celle que je viens d'écrire. Et j'ai laissé un tout petit peu les 2 résistances pour voir que ce sont les mêmes que j'ai déplacées ici. Maintenant, on a dit que ce courant qui passera ici, c'est bel et bien le courant qui va être notre courant I_{B0} et qu'on va calculer en tenant compte que, la source de tension qu'on vient de réaliser, et en réalité ce V_{B0} , ce sont les diviseurs avec des résistances que vous aurez choisies vous-mêmes, avec les valeurs pour R_1 et pour R_2 , en appliquant que V_{B0} est égal à la tension qu'on aurait calculée. Mais le facteur 10 que je viens de mentionner, il est là, donc on s'arrange pour qu'au moins on ait 10 fois plus de courant qui passe dans cette branche-là par rapport à ce courant I_{B0} . Mais si vous prenez cette tension qu'on voit, V_{B0} , avec cette source-là, vous savez très, très bien que si vous regardez la résistance depuis là, la résistance de source, avec une source de tension réalisée avec 2 résistances sous forme de diviseur résistif, c'est comme si vous aviez réalisé une source de tension idéale dont la valeur c'est ceci, le V_{B0} .

Notes

Summary



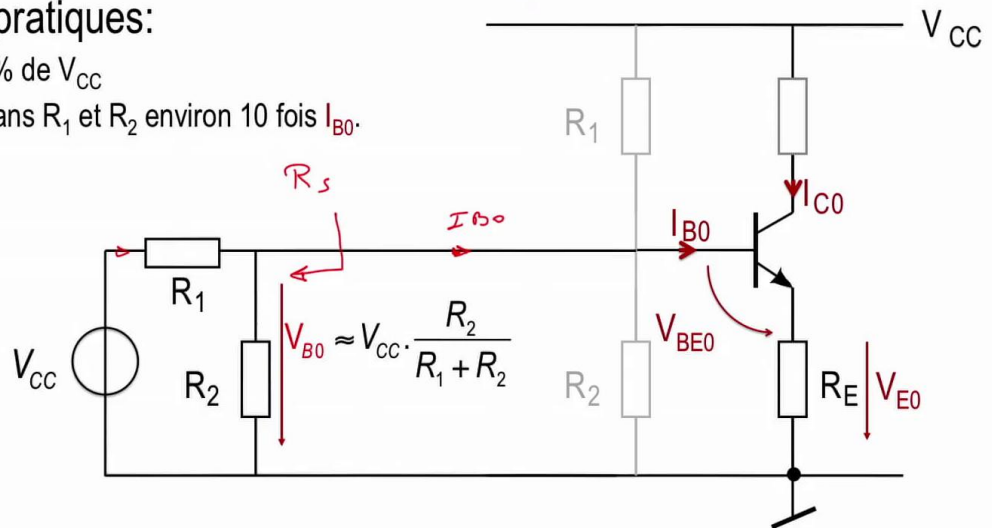
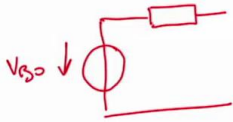
7m 17s

Schéma pratique de polarisation

• Considérations pratiques:

- V_{E0} entre 10% à 30% de V_{CC}
- Choisir le courant dans R_1 et R_2 environ 10 fois I_{B0} .

$R_1 // R_2$



Electronique II

Donc à vide, si je ne branche pas ça, j'aurai vu cette tension. Et la résistance interne de votre source va être la mise en parallèle de R_1 parallèle avec R_2 . Donc R_1 parallèle avec R_2 va nous donner la résistance équivalente, vue depuis ici, d'une source idéale dont la valeur est V_{B0} et dont la résistance de sortie, ou la résistance de source, va être R_1 parallèle avec R_2 . Donc si je veux prendre ce schéma-là et le mettre ici en enlevant les 2 résistances R_1 et R_2 , je vais obtenir ceci.

Notes

Summary



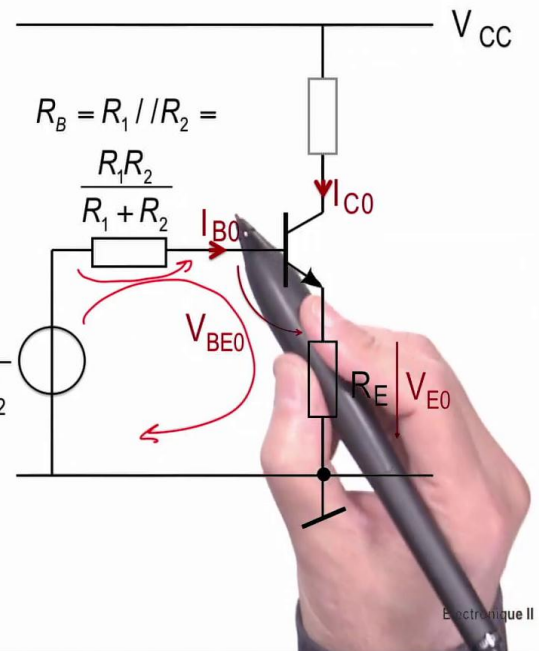
8m 47s

Dimensionnement de détail

- Tenir compte de la résistance interne de la source de polarisation:

$$I_{C0} \approx \frac{V_B - U_J}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Voici mon schéma maintenant, avec ma source de tension à vide et la mise en parallèle des 2 résistances, et ce circuit qui est là correspond en réalité à quelque chose de tout à fait correct. Maintenant, en tenant compte de mon courant IB0, en le mettant dans cette source idéale, et en mettant les valeurs de résistances que j'aurai choisies pour imposer le courant qui passe dans le diviseur résistif, et j'aurai mis une résistance équivalente qui est égale à R1 parallèle avec R2, je peux calculer exactement le courant, ou plutôt la tension que je verrai sur la base de ce transistor. Ou, en d'autres termes, dans cette maille qui est ici, donc celle qui est là, je dois tenir compte d'une chute de tension ici qui est égale à IB0 multiplié par RB, et ce IB0 x RB va me donner la chute de tension ici, que je dois soustraire de la tension à vide pour pouvoir calculer vraiment la tension VE0. Et comme je sais que le courant, le lien entre IC0 et IB0 passe par la relation IC0 = β x IB0, et bien je trouverai facilement l'expression exacte de IC0 qui tient compte des résistances que j'ai ajoutées moi-même pour réaliser cette division de tension.

Notes

Summary



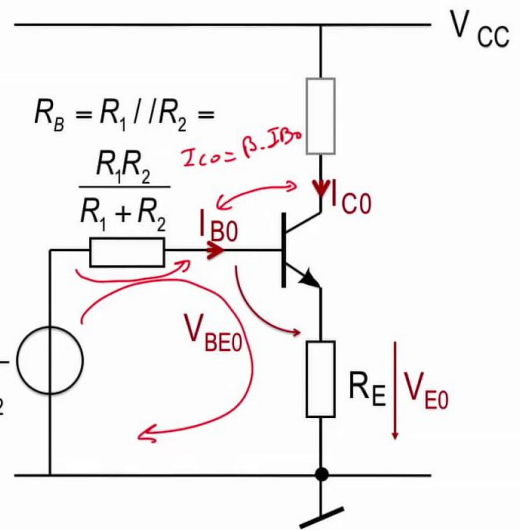
Dimensionnement de détail

- Tenir compte de la résistance interne de la source de polarisation:

$$I_{C0} \approx \frac{V_B - U_J}{R_E + R_B / \beta \approx \infty}$$



$$V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Electronique II

Et vous allez voir que par rapport à ce qu'on avait vu avant, si je cache cette partie, vous retrouvez l'expression originale qui amène le courant I_{C0} sans l'effet de cette résistance R_B parce qu'on a calculé, qu'on a considéré qu' I_{B0} est égal à 0, c'est comme si on avait dit $\beta = \infty$. Si vous mettez $\beta = \infty$, ce terme va disparaître, et vous retrouver le I_{C0} qu'on avait calculé avant. Et si β est fini, et si la résistance R_B que vous aurez ajoutée est une résistance de valeur finie, si vous écrivez cette équation-là qu'on aurait extraite de cette maille, vous retombez sur l'expression exacte de votre courant I_{C0} en fonction de β et de R_B . Donc, en pratique, si j'arrive à imposer un courant ici assez élevé comparé à I_{B0} , je peux effacer ça; c'est comme si j'étais en train de dire le R_B est beaucoup plus grand que $\beta \times R_E$. Donc, si c'est le cas... Pardon, je m'excuse, j'ai dit faux. C'est comme si j'étais en train de dire : le R_B / β est beaucoup plus petit que R_E , donc R_B est beaucoup plus petit que $\beta \times R_E$. Et on retombe sur l'approximation d'avant. L'expression exacte et l'expression tenant compte de la simplification dépendent de votre choix de résistances R_1 et R_2 , et du β de votre transistor.

Notes

Summary



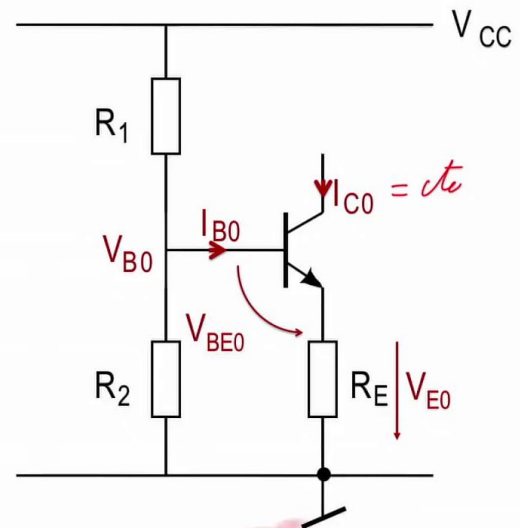
10m 54s

Résumé de polarisation

$$I_{C0} \approx \frac{V_B - U_j}{R_E + \frac{R_B}{\beta}} \quad \text{et} \quad V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{\Delta I_{C0} / I_{C0}}{\Delta T} = \frac{2 \text{ mV} / ^\circ \text{C}}{\underbrace{R_E I_{C0}}_{V_{E0}}} = \frac{2 \text{ mV} / ^\circ \text{C}}{V_{B0} - U_j}$$

- Indépendance de la température $V_{B0} \gg U_j$
- Indépendance de β : $R_B \ll \beta R_E$



Electronique II

J'aimerais bien résumer ici, sur ce qu'on voit là, l'histoire de la polarisation. On a utilisé un diviseur résistif, on a calculé le courant I_{C0} tenant compte d'une résistance qui est la mise en parallèle des 2, si on veut être exact, et on a trouvé que le V_{B0} , si réellement le courant ici est très grand, est égal à cette expression. Et ceci nous amène à l'idée qu'on cherche à appliquer : comment faire une source de courant où ce courant I_{C0} est égal à une constante indépendamment de la variation de la température qui est due à notre composant, le transistor bipolaire. On avait vu que ce courant va être affecté par le drift en température, ou le shift en température, ou la variation en température de ce ΔI_{C0} en fonction de la tension U_{BE0} qui est de $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, et que ceci dépend de la chute de tension que vous mettez sur $R_E \times I_{C0}$, donc c'est le V_{E0} . Et là, on a vu que plus on augmente cette tension, cette tension augmente, cette loi de 2 mV qui est propre au silicium va être divisée par ce que nous aurons choisi, donc c'est notre conception qui va rendre stable la variation de ce courant-là en fonction de la température. Donc on est dans des considérations de conception de circuit.

Notes

Summary



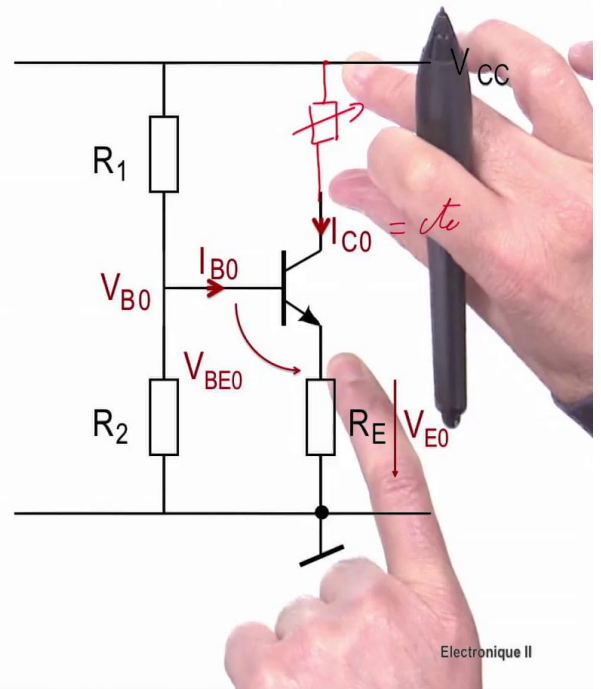
12m 28s

Résumé de polarisation

$$I_{C0} \approx \frac{V_B - U_j}{R_E + \frac{R_B}{\beta}} \quad \text{et} \quad V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{\Delta I_{C0} / I_{C0}}{\Delta T} = \frac{2 \text{ mV } / ^\circ \text{ C}}{\underbrace{R_E I_{C0}}_{V_{E0}}} = \frac{2 \text{ mV } / ^\circ \text{ C}}{V_{B0} - U_j}$$

- Indépendance de la température $V_{B0} \gg U_j$
- Indépendance de β : $R_B \ll \beta R_E$



Electronique II

Et c'est au concepteur de prendre ce genre de décisions. Et voilà, j'ai résumé ceci. Alors, en regardant ça, j'ai fait quoi avec ça finalement ? J'ai imposé un courant $I_{C0} = \text{constant}$, donc ce courant-là ne varie pas même si je varie cette tension. Vous vous souvenez qu'on avait dit : UCE, quand ça varie, il y a l'effet Early et ça impacte sur mon courant I_{C0} qui, quand la tension UC augmente, on va voir que IC va augmenter avec avec une pente qui est liée à cette tension d'Early. En pratique, quand on utilise notre transistor, nous branchons une charge ici. Donc on va avoir une résistance qui viendrait là. Si votre résistance est variable, c'est-à-dire que cette résistance change dans le temps, ou elle change en fonction d'une variation de quelque chose; donc cette tension-là monte ou elle descend; même quand on est en DC donc on a une tension continue, la variation de cette tension, regardez cette tension, on a tout fait pour le rendre constant. Et on l'a fait dans cette maille, donc dans cette maille cette tension moins cette tension me donne celle-ci constante. Celle où je bouge mes doigts, elle va taper sur la tension V_{E0} . Donc quand j'augmente cette résistance que je vois plutôt...

Notes

Summary

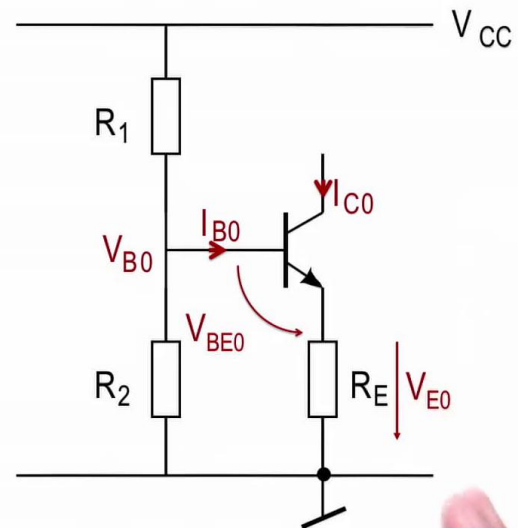


Résumé de polarisation

$$I_{C0} \approx \frac{V_B - U_j}{R_E + \frac{R_B}{\beta}} \quad \text{et} \quad V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{\Delta I_{C0} / I_{C0}}{\Delta T} = \frac{2 \text{ mV } / ^\circ \text{ C}}{R_E I_{C0}} = \frac{2 \text{ mV } / ^\circ \text{ C}}{V_{B0} - U_j}$$

- Indépendance de la température $V_{B0} \gg U_j$
- Indépendance de β : $R_B \ll \beta R_E$



Electronique II

[BALBUTIEMENTS] J'augmente mon courant I_{C0} qui est là, il va augmenter cette tension aux bornes de cette résistance. Regardez mes 2 doigts, ou plutôt mon doigt, d'ici, il va descendre et il va descendre jusqu'à ce qu'il touche l'autre. Et au moment où il touche l'autre, c'est comme si j'étais en train de dire : $U_{CE} = 0$. Quand cette tension-là est égale à cette tension, mon transistor n'est plus source de courant. Donc je ne peux plus parler de polarisation et d'une imposition d'un courant constant. Donc je ne peux utiliser ce montage. Ce que j'aimerais bien dire autour de ça, je vais effacer ce que je viens d'ajouter; j'aimerais bien revenir sur cette idée : j'aimerais réaliser une source de courant. Donc un courant ici constant qui supporte toute variation de tension ici, jusqu'à la saturation bien sûr, tout en ayant perdu de cette gamme de 0 à V_{CC} une partie pour V_{E0} . Donc n'oubliez pas qu'au début, si vous mettiez l'émetteur à la masse le V_{E0} n'existait pas. Et cette tension V_{E0} , on vient de l'ajouter pour obtenir cette relation. Donc on a une source de courant stable mais on a quand même perdu quelque part ce V_{E0} .

Notes

Summary



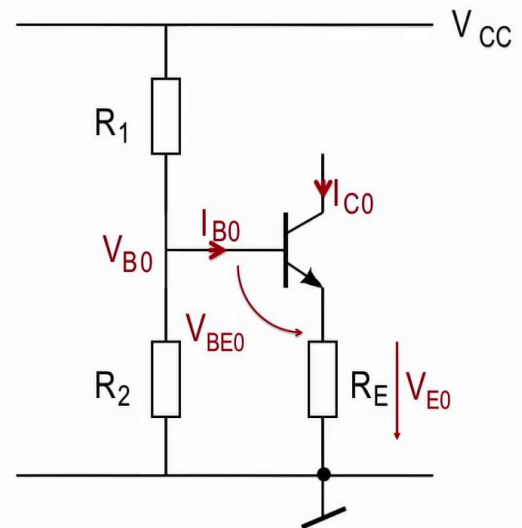
15m 22s

Résumé de polarisation

$$I_{C0} \approx \frac{V_B - U_j}{R_E + \frac{R_B}{\beta}} \quad \text{et} \quad V_{B0} \approx V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{\Delta I_{C0} / I_{C0}}{\Delta T} = \frac{2 \text{ mV } / ^\circ \text{ C}}{R_E I_{C0}} = \frac{2 \text{ mV } / ^\circ \text{ C}}{V_{B0} - U_j}$$

- Indépendance de la température $V_{B0} \gg U_j$
- Indépendance de β : $R_B \ll \beta R_E$



Electronique II

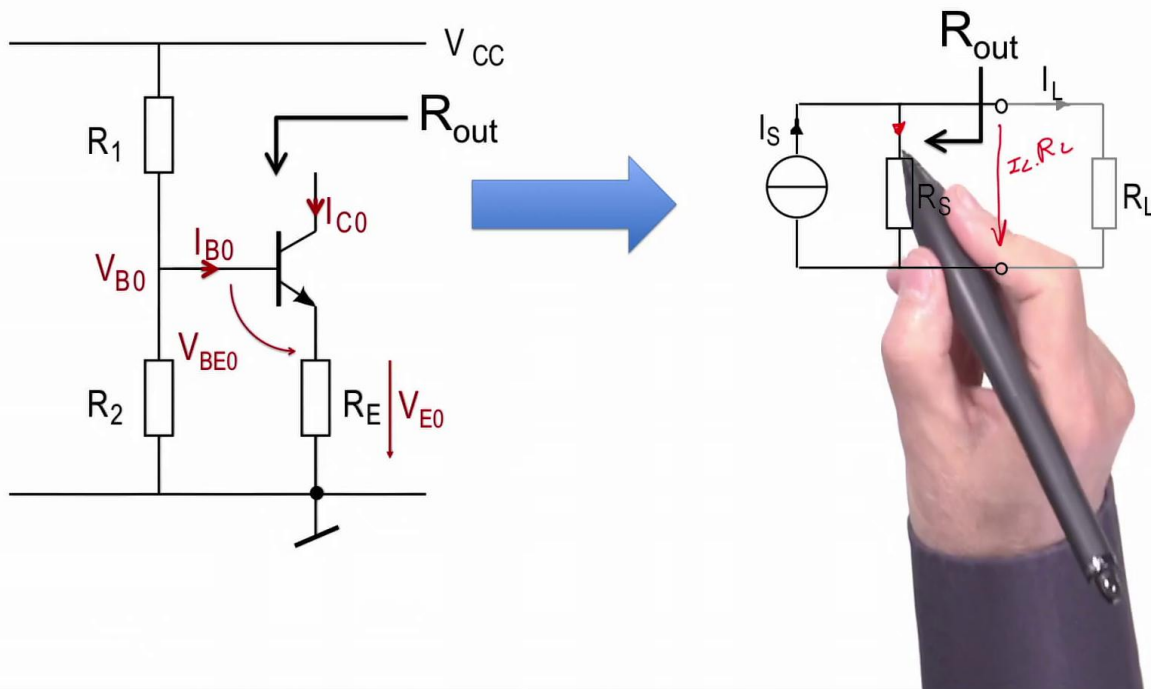
Et moi, j'aimerais bien avoir un circuit qui se comporte comme source de courant en ayant perdu ceci, et voir ce que je peux faire avec lorsque je varie ma tension qui vient là, et dire que je viens de faire une source de courant qui va m'aider plus tard à polariser en courant beaucoup de choses et qui va me permettre dès la leçon de la semaine prochaine de comprendre que là, le courant I_{C0} , il va, ou ce genre de montage va me permettre d'utiliser une source de courant fixe qui va me donner une résistance infinie et que j'appellerai "charge active", mais on verra ça la semaine prochaine. Donc on vient de voir la polarisation. Maintenant, je vais prendre cette polarisation et un peu la voir autrement.

Notes

Summary



Source de courant et résistance de sortie



Electronique II

Si le courant est fixe et qu'il est stable par rapport à la température, regardez, ça c'est un symbole d'une source de courant. Une source de courant, qu'est-ce qu'on aimerait bien avoir en parallèle avec elle ? On sait qu'il a un défaut qui est dû à une résistance qui vient se mettre en parallèle, que si cette résistance n'existe pas et que je peux créer un court-circuit à la sortie, mon courant de court-circuit est égal, donc si ce UCE, est égal à 0. Et si je prends ça et je dis : ça c'est l'équivalent d'un UCE, si ça avait été un transistor, je peux court-circuiter mon transistor. Si il n'y avait pas eu cette résistance, j'aurais tout le courant qui passe dans ma source ici et ce serait extraordinaire. On vient de dissiper l'idée qu'on ne peut pas court-circuiter un transistor entre collecteur et émetteur à cause de sa saturation. Indépendamment de ça, s'il y a une résistance en parallèle avec une source de courant, le courant I_L qui part de là va souffrir d'un courant qui, quand cette tension de sortie varie, donc cette tension c'est $I_L \times R_L$, quand cet $I_L \times R_L$ change, la tension ici va changer. Donc le courant qui passe dans cette résistance aussi.

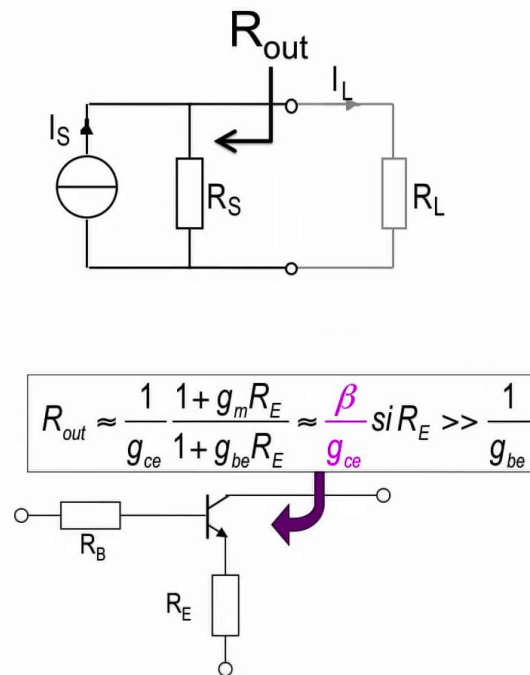
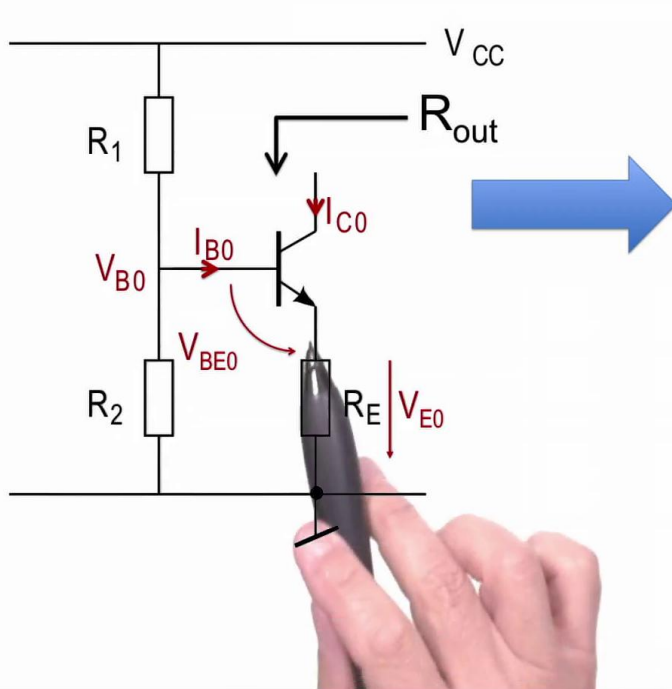
Notes

Summary



17m 24s

Source de courant et résistance de sortie



$$R_{out} \approx \frac{1}{g_{ce}} \frac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E} \approx \frac{\beta}{g_{ce}} \text{ si } R_E \gg \frac{1}{g_{be}}$$

Electronique II

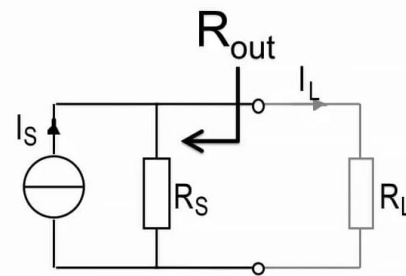
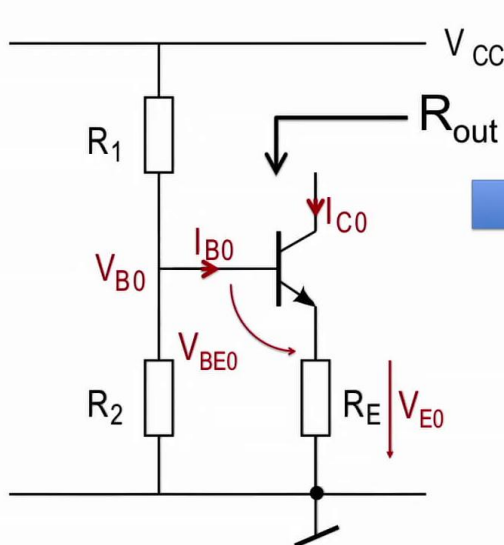
Donc en fonction de cette tension, je risque de perdre une proportion qui passe là-dedans de mon courant I_S , que moi j'aurais aimé $I_S = I_L$. Donc cette résistance devrait être infinie, elle n'existe pas, elle disparaît, ou bien la plus élevée possible. Donc quand je regarde cette source de courant et que je me pose la question : si je veux utiliser cette analogie, que ça c'est équivalent à ça, ce qui est vrai, quelle est la valeur de R_S ? Donc ici j'ai un courant fixe, ça, ça va être le I_S , mais alors, il souffre d'une résistance de sortie. Quelle est sa valeur ? Si il n'y avait pas eu R_E , je sais très bien, c'est $1/g_{ce}$. Mais maintenant, on a ajouté R_E . Est-ce que cette résistance s'est dégradée ou s'est améliorée ? La réponse : la résistance R_{OUT} s'est parfaitement améliorée. Bien au contraire, le fait d'utiliser ce montage comme ça en mettant R_E va me permettre d'obtenir une résistance R_{OUT} qui va être élevée. Et ça va être le circuit qu'on va utiliser pour faire des sources de courant. Voici mon montage et voici ce que je veux faire, voici ce qu'on avait étudié avant pour calculer quelle est la résistance de sortie.

Notes

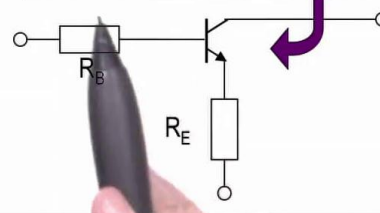
Summary



Source de courant et résistance de sortie



$$R_{out} \approx \frac{1}{g_{ce}} \frac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E} \approx \frac{\beta}{g_{ce}} \text{ si } R_E \gg \frac{1}{g_{be}}$$



Electronique II

Donc je prends ce schéma-là, je le remplace par l'équivalent en disant : ces 2 résistances R1 parallèle avec R2 m'ont créé une résistance RB dans la base. J'ai ajouté une résistance RE moi-même. Alors quelle est l'impédance que je regarde depuis le collecteur d'un transistor ayant une résistance RB dans la base et RE dans l'émetteur ? Je vous envoie sur le chapitre où on a étudié ça. Mais si je prends en compte une considération supplémentaire et je dis : cette résistance RB par rapport à $\beta \times R_E$ dont je peux ne plus parler, je peux considérer que RB est quasiment 0, c'est-à-dire le courant IB0 est très, très faible, et que les résistances R1 et R2 qui sont ici et qui sont mises en parallèle avec la source ne m'affectent pas beaucoup dans le potentiel de VB0, c'est comme si ce potentiel ne bougeait pas donc cette résistance R1 parallèle avec R2 devient égale à 0. Et bien, je tombe sur cette approximation qu'on a calculée en long et en large il y a quelques leçons auparavant, et on avait trouvé la chose suivante : $R_{OUT} = 1/G_{CE}$, et au numérateur on a $1 + G_{BE} \times R_E$, et au dénominateur on a $1 + G_{BE} \times R_E$.

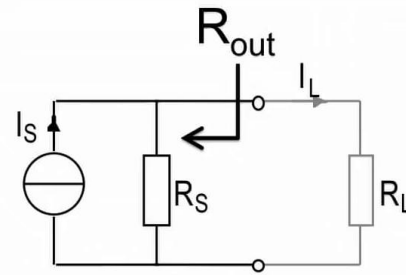
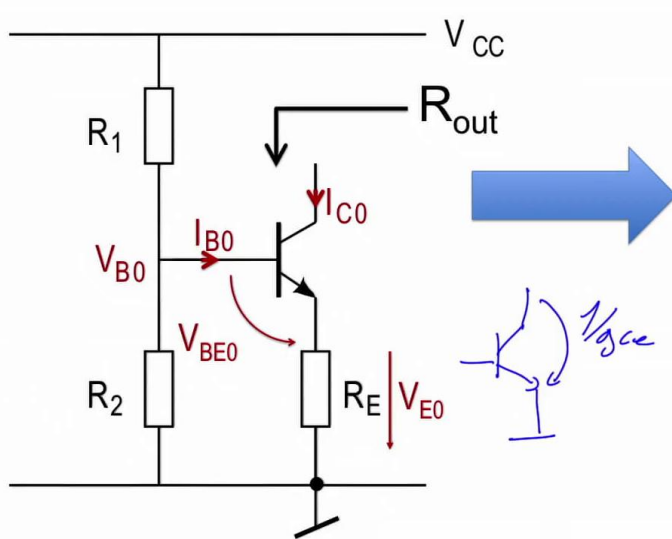
Notes

Summary

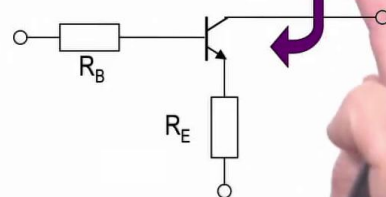


19m 51s

Source de courant et résistance de sortie



$$R_{out} \approx \frac{1}{g_{ce}} \frac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E} \approx \frac{\beta}{g_{ce}} \text{ si } R_E \gg \frac{1}{g_{be}}$$



Electronique II

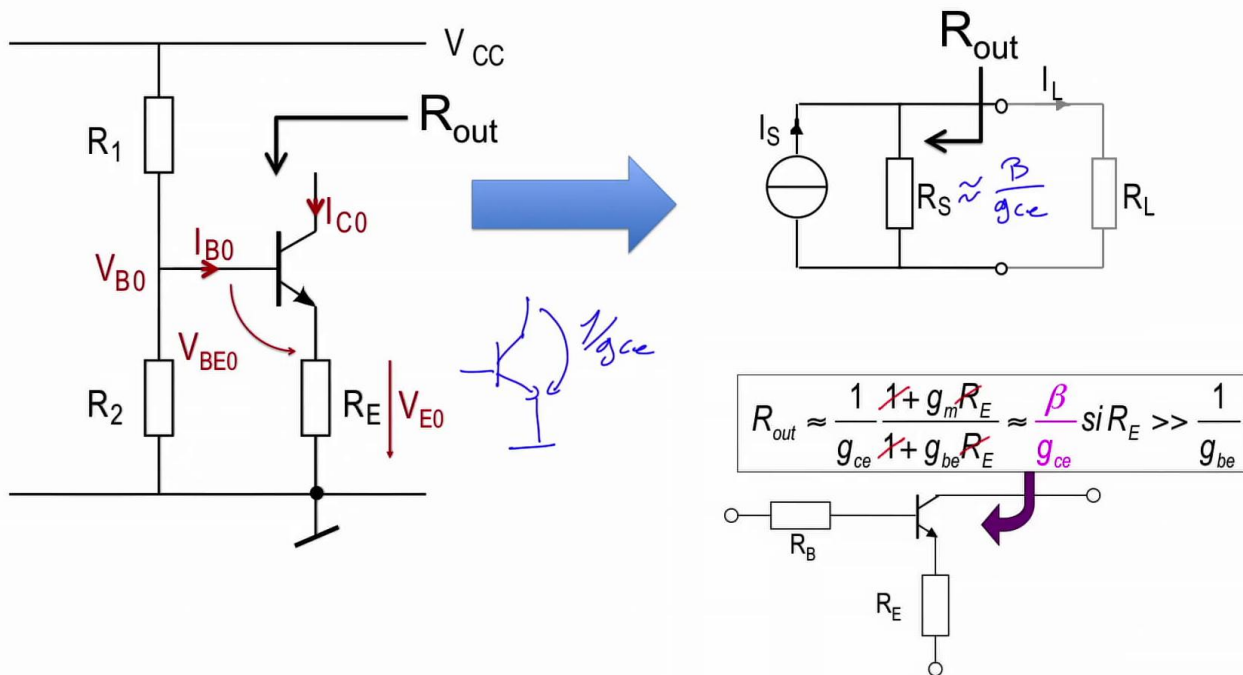
Si je considère que $G_{BE} \times R_E \gg 1$; En d'autres termes, G_{BE} dépend de I_{C0} comme G_M , donc, dépend de I_{C0} ; mais j'ai mis une résistance R_E suffisamment grande là-dedans, que le produit de la résistance que j'ai ajoutée moi-même multipliée par le G_{BE} que j'ai obtenu par la polarisation est beaucoup plus grand que 1. Donc si c'est le cas, je peux dire : le 1, il est quasiment négligeable par rapport à ce $G_{BE} \times R_E$. Donc en l'occurrence, là c'est sûr que c'est négligeable, puisque je me suis permis de le négliger ici, je dois sûrement le négliger là parce que le G_M est $\beta \times G_{BE}$. Donc ça, c'est beaucoup plus grand donc je peux aussi négliger ceci. Et je vais me trouver avec $(G_M \times R_E)/(G_{BE} \times R_E)$, donc je simplifie R_E et R_E , je trouve G_M/G_{BE} qui n'est rien d'autre que β . Donc $G_M/G_{BE} = \beta$ et j'avais le $1/G_{CE}$: je trouve que la résistance de sortie est $\beta \times 1/G_{CE}$. Je vous rappelle qu'un simple transistor, si vous branchez votre transistor et l'émetteur, vous le mettez réellement à la masse en AC, ça c'est $1/G_{CE}$. Le fait d'avoir ajouté une résistance dans l'émetteur, vous vous retrouvez à β/G_{CE} en ayant imposé une tension fixe sur la base. Donc on est β fois supérieur que ce qu'on aurait obtenu avec un transistor simple.

Notes

Summary



Source de courant et résistance de sortie



Electronique II

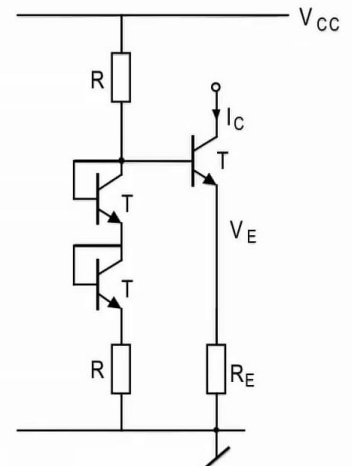
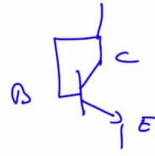
Extrêmement intéressant pour faire ça. Donc là, je me trouve par rapport à un transistor simple polarisé : R_S aurait été $1/G_{CE}$, et dans les calculs qu'on avait faits ça nous montre en fonction de la tension d'Early et du courant qu'on mettait là-dedans que là, on tend vers quelque chose d'une dizaine de $k\Omega$. Et là, je trouve : c'est β fois, donc vous allez booster et augmenter votre impédance de sortie ou votre résistance de sortie par un facteur β de votre transistor grâce à cette résistance. Donc c'est extrêmement intéressant et nous venons de réaliser une équivalence avec un R_S de l'ordre de grandeur de β/G_{CE} d'un transistor ayant une polarisation I_{C0} et une tension d'Early donnée.

Notes

Summary



Amélioration de la stabilité thermique



Electronique II

Quelques mots concernant une amélioration de la stabilité thermique. On a ajouté cette résistance et je viens de vous faire une proposition avec ce schéma. Et ce schéma, j'ai pris un transistor et j'ai dit : je vais utiliser le même que ceci. Donc j'ai 1 transistor, 2, 3, qui sont exactement les mêmes. Sachez que ceci, on les trouve quand on intègre les 3 ensemble sur la même puce d'un silicium, et que sur la même puce, on choisit le même composant répété 3 fois, et on a des règles qu'on appelle des règles de matching, ou d'appariement en français, c'est-à-dire : on fait en sorte que les 3 composants soient similaires lors de la réalisation, fabriqués par le même processus de fabrication en même temps, donc a beaucoup de similarités entre les 3 composants. Et si vous prenez un composant comme ça, un transistor, et vous court-circuitez la jonction base-collecteur, vous êtes en train d'annuler l'effet transistor. Le transistor a disparu. Vous gardez juste une jonction base-émetteur. Et pourquoi on a fait ça ? Ça devient comme une diode, c'est vraiment identique à ça.

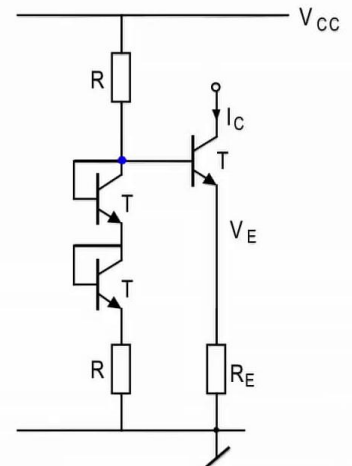
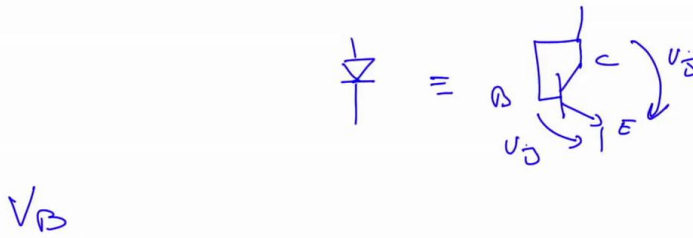
Notes

Summary



23m 39s

Amélioration de la stabilité thermique



Electronique II

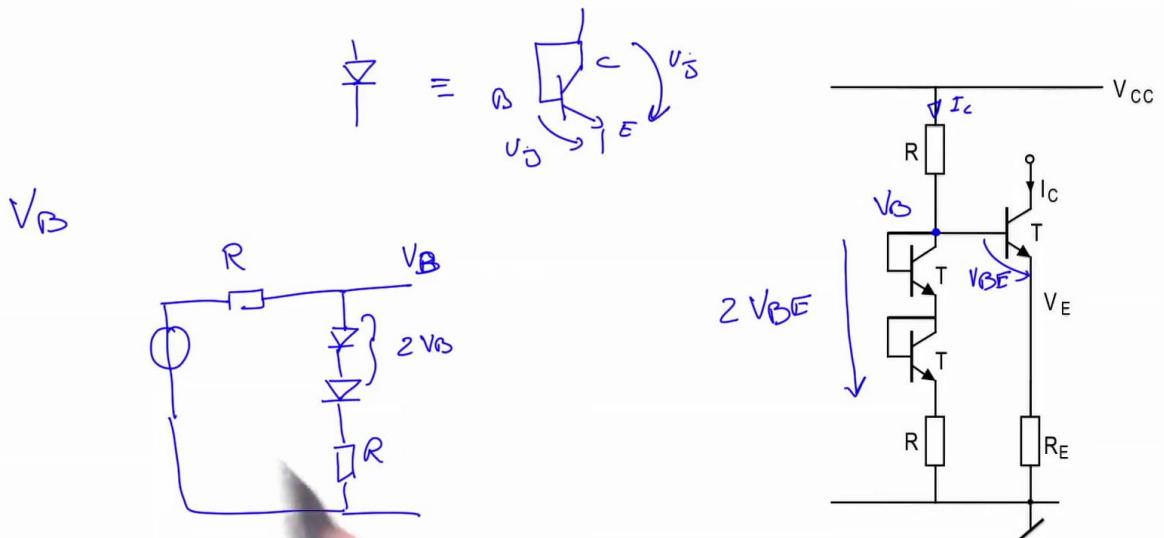
C'est-à-dire si vous prenez le composant et vous le répétez 3 fois, les règles de similarité entre les 3 vont être respectées en prenant un transistor et en le modifiant, en le transformant en diode, et on l'appelle "transistor connecté en diode" où la jonction base-collecteur a été complètement éliminée par un court-circuit. Et il va nous rester une jonction base-émetteur. Donc ce transistor, la tension UCE est égale à UBE tout le temps et c'est une tension de jonction. Donc c'est une tension de l'ordre de grandeur de UJ. Et c'est la même parce qu'il y a un court-circuit entre les 2. Il n'y a plus de transistor, il y a une diode à la place. Je vais prendre ce genre de schéma, je vais vous rappeler ça parce qu'on va l'utiliser très, très bientôt, et je vais prendre ceci et faire un tout petit peu de calcul autour. Je vais m'intéresser à la tension que je vois là et je vais l'appeler la tension VB. Et je vais l'écrire en tenant compte de ce diviseur résistif qu'on a maintenu.

Notes

Summary



Amélioration de la stabilité thermique



Electronique II

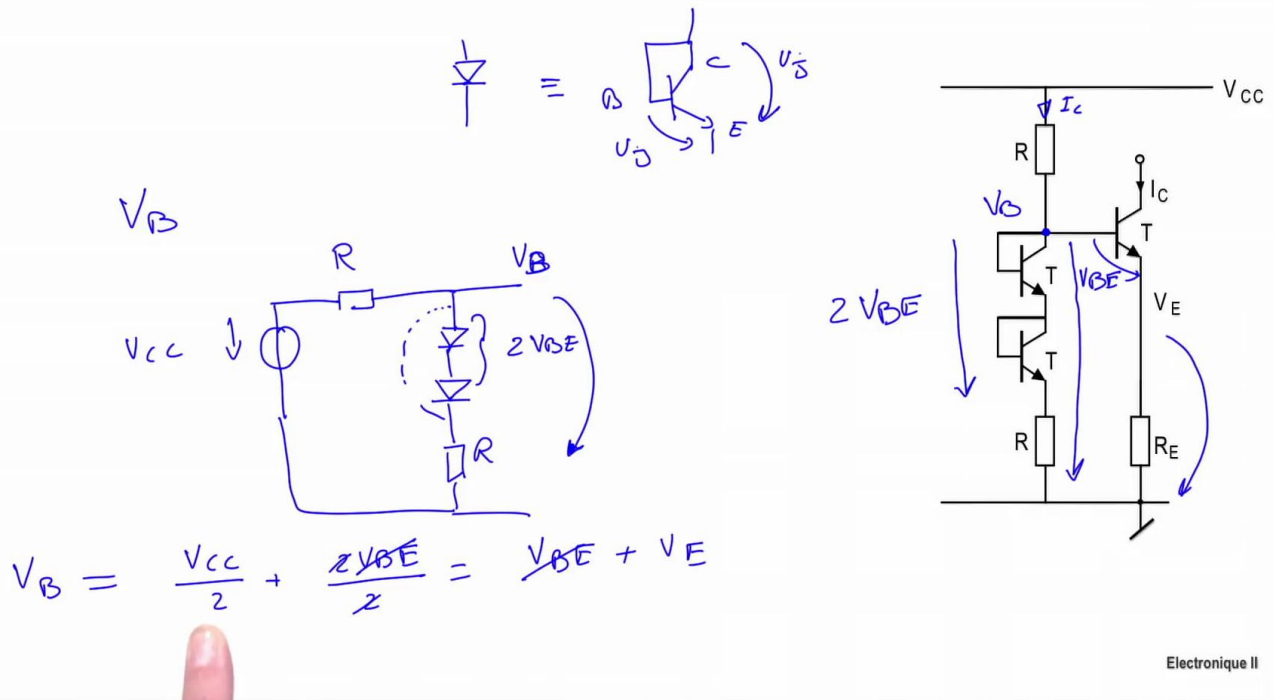
Donc j'ai pris une même résistance de part et d'autre et j'ai mis ici 2 diodes en série, donc je vais dessiner cette partie et je vais appeler cette tension V_B et je vais écrire que la source de tension que je vois là, elle va avoir une résistance R , une diode, en série avec une deuxième diode, en série avec une troisième résistance ou une deuxième résistance ayant la même valeur que celle-ci, et je vais appeler cette tension-là V_B ou V_{B0} , c'est comme vous souhaitez. Et ces 2 diodes vont se retrouver parcourues par un courant donc elles vont afficher une tension de là à là de $2 \times V_{BE}$ et cette tension-là, elle est de l'ordre de grandeur de V_{BE} . Si vous prenez la considération que ce courant-là est du même ordre de grandeur que ceci, donc ce V_{BE} , ce V_{BE} et ce V_{BE} sont vraiment copies conformes, vous avez un transistor parcouru par un courant qui est le même que vous avez imposé ici, et là, vous allez avoir $2 \times V_{BE}$. Si vous prenez ça, et vous regardez quelle est la tension V_B qui apparaît, vous pouvez appliquer le principe de superposition par exemple, de style, vous dites : J'ai ici V_{CC} , vous dites : J'annule V_{CC} et je regarde l'effet de $2 V_{BE}$ sur la tension que je vois ici, qui va être la tension V_B , ça me donne par superposition avec le fait que j'annule ces 2 tensions et je regarde V_{CC} sur la même tension et j'additionne les 2, et je trouverai quel est le potentiel V_B .

Notes

Summary



Amélioration de la stabilité thermique



Je vais l'écrire. Donc si vous voulez écrire V_B qui est l'effet d'une annulation de cette source, c'est quand je court-circuite ces 2 diodes, et je regarde la tension que je vois là et c'est comme si j'avais une résistance et une résistance et une tension V_{CC} , ça va me donner : $V_{CC}/2$. Maintenant, j'annule la tension V_{CC} et je regarde $2 V_B$... Pardon, j'ai oublié le E ici, $2 V_{BE}$ ici sur cette tension que je vois ici qui est en l'occurrence V_B , et je vais trouver que ceci est égal à $2 V_{BE}$ multiplié par le diviseur résistif réalisé par les 2 résistances, et comme c'est la même valeur, ceci me donne $1/2$ et ça va me donner $+ V_{BE}$. Donc cette tension V_B , je la regarde en fonction de ça et je l'écris ici. Cette même tension, je la regarde de ce côté-là en appelant ça V_E . Je dis : Cette même tension est égale à $V_{BE} + V_E$. En effet, cette tension est égale à $V_{BE} + V_E$, et V_E c'est de là à là. Cette tension V_E . Donc j'ai $V_{CC}/2 + V_{BE}$ est égal de ce côté-là, de l'autre côté, égal à $V_{BE} + V_E$. Donc j'ai V_{BE} et V_{BE} qui vont disparaître et j'ai la tension V_E égale uniquement à $V_{CC}/2$. C'est extraordinaire !

Notes

Summary



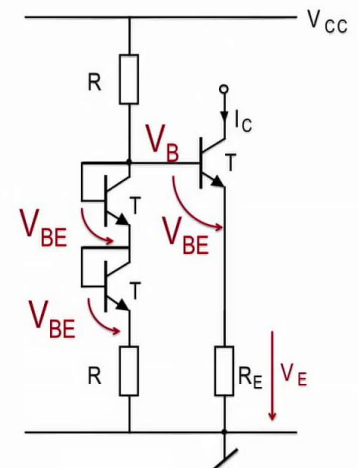
27m 42s

Amélioration de la stabilité thermique

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$V_E = (V_{CC} - 2V_{BE}) \frac{R}{R + R} = \frac{V_{CC}}{2} - V_{BE}$$

$$V_B \approx \frac{V_{CC}}{2}$$



Electronique II

C'est-à-dire : le fait d'avoir ajouté 2 jonctions réalisées par des transistors connectés en diodes ou par des simples diodes, j'ai éliminé l'effet de V_{BE} et cette modification de la température qui impacte sur le courant, je l'ai complètement annulée par ce phénomène-là et j'ai réalisé une source de courant pratiquement indépendante de la température en n'ayant plus d'effet de V_{BE} , à condition que je fasse ça dans une technologie intégrée. Donc, un peu plus propre que ce que je viens d'écrire, je vais juste commenter très rapidement sur ceci. Voilà proprement dessiné, et voilà les mêmes relations que j'ai écrites sur V_E en fonction de ce côté-là, et V_E en fonction de ce côté-là, qui me donne cette relation-là. Donc j'égalise V_E et V_E et je tombe réellement sur une tension V_B qui va être égale à $V_{CC}/2$ et qui ne dépend que de la division par 2 d'une tension d'alimentation, et j'espère que quand vous utilisez ce genre de montage, vos tensions d'alimentation sont stables en température. Donc vous avez réussi à réaliser un courant qui dépend d'une tension V_B où cette tension-là n'a vraiment... l'effet de la relation entre I_C et la tension qu'on a appliquée sur la base n'a pas d'effet de la température.

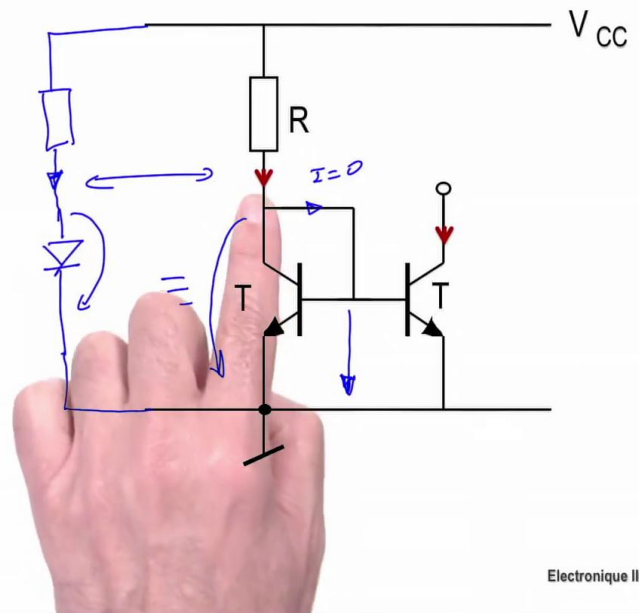
Notes

Summary



29m 22s

Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique II

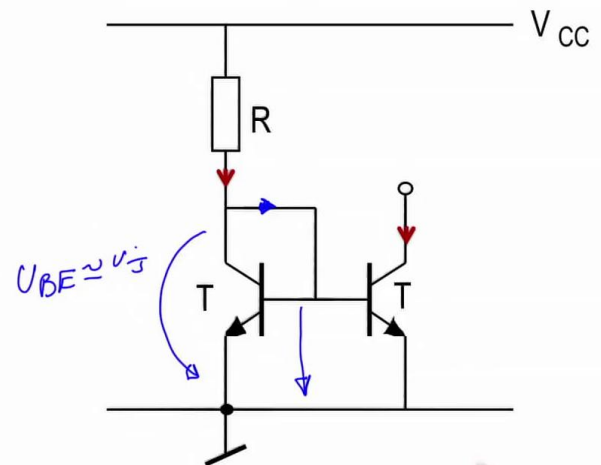
On a vu comment faire une source de courant avec des composants discrets. Et si je vous présente ça, et je vous dis : ça aussi, ça va être une source de courant qui serait intégrée. Pourquoi intégrée ? Je reprends le même discours de tout à l'heure : j'ai réalisé un transistor connecté en diode. Donc ceci, c'est comme si j'avais une simple diode. L'équivalent d'un transistor où j'ai court-circuité la base au collecteur, c'est comme une diode. Et je lui ai branché une résistance ici pour lui amener un courant et je l'ai mis contre la base. Donc il va voir un courant qui le traverse là. C'est ce courant-là. Ça, ça va me générer une tension. Cette tension, je ne veux même pas savoir combien elle vaut. J'ai un courant qui traverse une diode. Si je vous dis : imposez ce courant dans ce composant-là, et prenez le même composant, mettez-le à côté, et lisez la tension, celle qui est là, que vous copiez ici sur un composant absolument similaire, qu'est-ce qui va vous arriver ? Si vous négligez le courant qui passe ici, vous dites : Ce courant-là est nul. Je prends un courant, je le convertis en tension et dans le même composant, je convertis la même tension en un courant.

Notes

Summary



Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique II

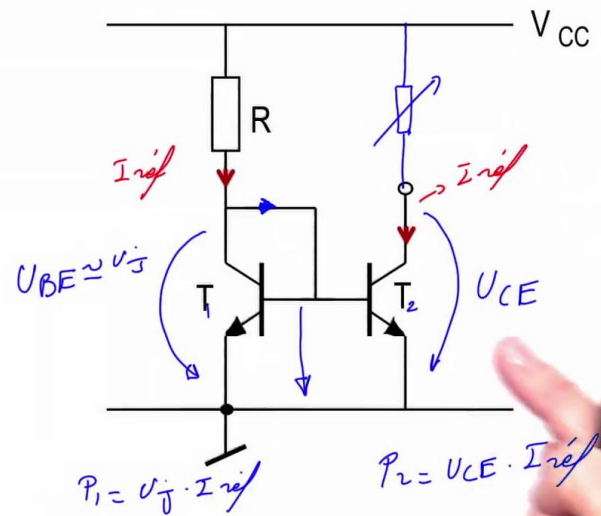
Et vous allez me dire : sans connaître quoi que ce soit, je peux affirmer que ce courant est égal à ce courant. J'ai fait un miroir de courant. J'ai pris un courant converti en tension et je l'ai converti de nouveau en courant à travers un composant similaire. Lui a une loi, n'importe laquelle en l'occurrence là c'est de l'exponentielle, courant, tension, tension, courant, alors je me retrouve avec une égalité parfaite entre ce courant-là et ce courant-là. Quelles sont les hypothèses que je viens de faire ? Alors les hypothèses sont : on a pris comme hypothèse d'abord que ce courant-là est égal à 0. Donc j'ai annulé ce courant, considérant que ce courant qui va aller dans les bases est quasi négligeable, voire inexistant. Alors, la deuxième hypothèse, c'est que cette tension-là est appliquée sur les 2 jonctions de transistor, base-émetteur et base-émetteur, qui sont les mêmes en réalité. Mais alors, si on regarde cette tension, c'est bel et bien celle-ci. Donc cette tension qu'on voit là et là c'est la tension U_{BE} d'un transistor qui est de l'ordre de grandeur d'une tension de jonction U_J . Et alors quand je regarde de l'autre côté, je vais voir que j'ai une tension U_{CE} de transistor.

Notes

Summary



Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique

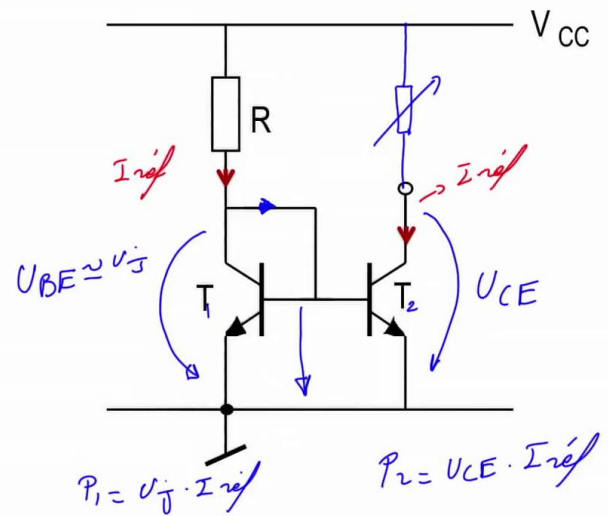
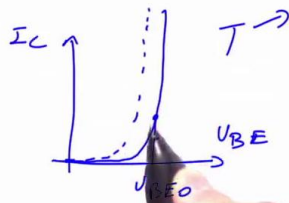
Alors, si cette tension-là est U_{BE} et cette tension-là est U_{CE} , et j'ai 2 transistors qui sont similaires avec 2 courants qui sont les mêmes, alors je vais écrire les puissances dissipées dans chacun de ces composants. Je prends ce composant-là, je vais l'appeler T1 et celui-là je vais l'appeler T2. Et je vais écrire la puissance P1 qui va être le courant ici que je vais appeler I_{REF} , donc ce courant I_{REF} , et c'est le même de l'autre côté, et bien je vais écrire la puissance dans le transistor T1 et T2. ça va me donner P1 est égal à l'ordre de grandeur de U_j multiplié par I_{REF} . Par contre de l'autre côté, ça va être la puissance P2 qui va être bien sûr le fameux I_{REF} mais multiplié par U_{CE} . C'est $U_{CE} \times I_{REF}$. Maintenant quand vous regardez ceci et vous dites : ça va dépendre, là j'ai I_{REF} , I_{REF} , mais là ça va dépendre de U_{CE} . Ça c'est une tension quasi constante, elle bouge mais très, très peu. Donc cette tension U_{CE} dépend de quoi ? C'est ce qu'on aurait branché ici. Si je branche ici une résistance variable, et cette résistance-là, elle va faire varier la tension depuis V_{CC} jusqu'à la tension de saturation. Donc ce U_{CE} varie dans une dynamique qui est de l'ordre de grandeur de V_{CC} .

Notes

Summary



Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique II

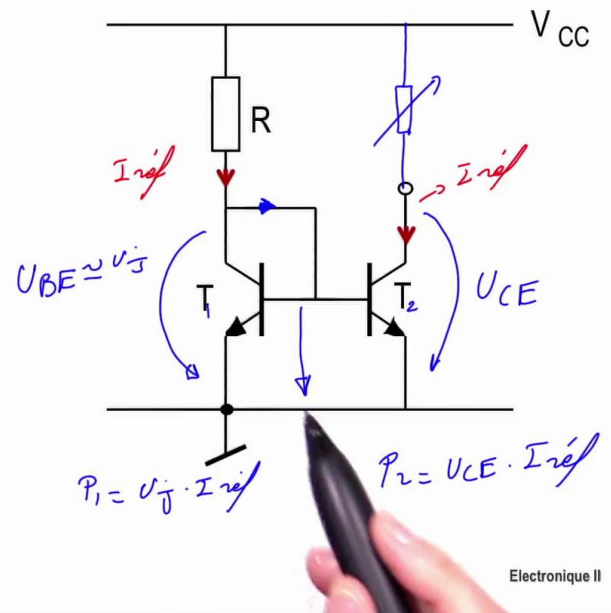
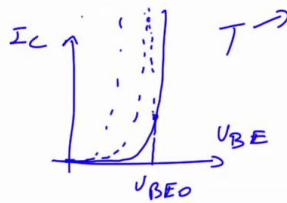
Si on regarde cette variation, donc ce V_{CE} est bien supérieur, ça pourrait être bien supérieur à ce V_j qui va me donner une puissance P_2 dissipée dans ce transistor qui est bien plus élevée que le transistor T_1 . Dans le transistor T_1 , c'est quasi constant. Alors qu'est-ce que ça va donner, ça ? On avait étudié qu'il est banni de prendre un transistor, de lui appliquer une tension fixe et d'imaginer qu'en mettant cette tension fixe, quand le transistor va chauffer à cause de cette puissance que je viens de mentionner ici, il va y avoir une dérive thermique. Pourquoi ? Parce que la température augmente. Alors traçons la caractéristique I_C en fonction d'une tension de jonction V_{BE} et on avait dit que cette caractéristique-là, on n'a absolument pas le droit de venir lui appliquer une tension V_{BE0} qui vient d'une source de tension quelconque. Et là, c'est ce qu'on est en train de faire. On a pris cette tension-là, on l'a appliquée à ce transistor ici. Et au début, quand on a parlé de cet effet-là et on a dit : Quand la température augmente, cette caractéristique se déplace dans ce sens-là. Donc votre V_{BE0} va engendrer un courant supérieur.

Notes

Summary



Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique II

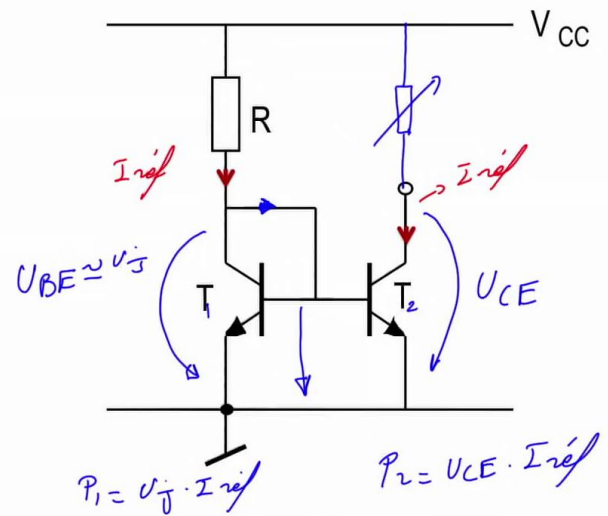
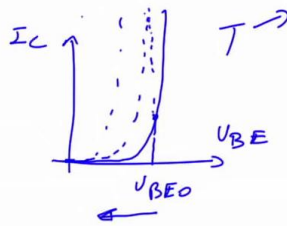
Donc $I_C \times U_{CE}$ va me donner une puissance qui augmente, donc un échauffement de votre device, de votre transistor, qui va augmenter, donc votre caractéristique continue à se déplacer jusqu'à ce que ce courant-là applique un courant extrême dans votre composant, ce qui ramène à l'emballement thermique, et le transistor est détruit par la chaleur. Donc, comment ça se fait que là on admet que c'est faisable, pourtant on a interdit de le faire avant à cause de ce phénomène-là ? Et bien, ce qui se passe, c'est que quand vous prenez ces 2 transistors, la condition de réalisation d'un miroir de courant c'est de mettre les 2 côté à côté à l'intérieur d'un substrat de silicium. Et généralement, quand on fait un lay-out d'un circuit intégré, donc le miroir de courant ne peut être implémenté ou réalisé que dans un circuit intégré, les 2 sont collés vraiment l'un à l'autre, voire mélangés l'un à l'autre dans leur lay-out, dans leur façon de construire au niveau du silicium. Lorsque ce transistor commence à chauffer il chauffe en même temps son voisin. Donc cette jonction qui impose la tension, elle va voir aussi son U_{BE0} se déplacer en même temps.

Notes

Summary



Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique II

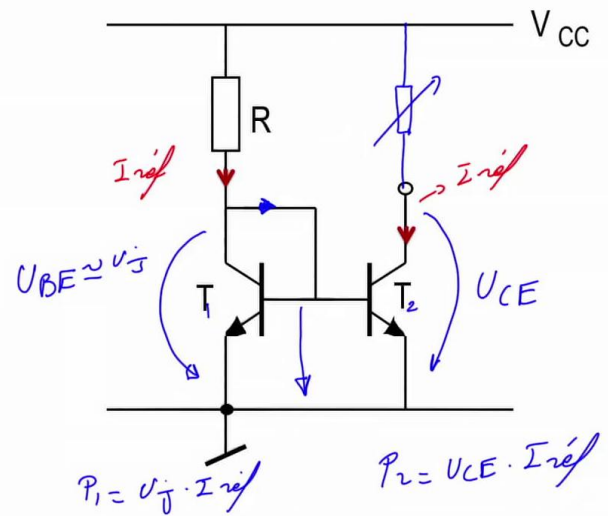
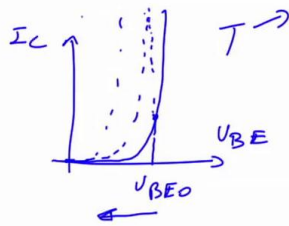
Donc si cette tension-là V_{BE0} est la même que l'autre, et ce transistor est en train de chauffer donc l'autre aussi est en train de chauffer, si les 2 transistors sont similaires, les 2 caractéristiques des 2 transistors se déplacent dans le même sens et en même temps. Donc cette tension-là continue à être modifiée en fonction de la température de ceci si on fait abstraction de l'inertie thermique entre l'un et l'autre, donc c'est une adaptation de la tension V_{BE} à la loi exponentielle et à la dérive, au drift thermique du transistor. Donc on peut réaliser 2 transistors comme ça dans quelque chose qui s'appelle "miroir de courant" à condition que les 2 soient intégrés ensemble dans des conditions que vous allez probablement apprendre dans un cours de circuits intégrés où on vous dit : on applique les règles d'appareillement, ou de matching en anglais, pour que les 2 composants soient absolument les mêmes et que les températures soient les mêmes appliquées aux 2. Sinon, je vous signale : vous devez ajouter une résistance ici et une résistance là, qui permet ou qui permettrait d'éviter l'emballement thermique de votre transistor en insérant une loi d'Ohm là-dedans.

Notes

Summary



Sources de courant intégrées: miroir de courant



Electronique II

Maintenant qu'on a vu le miroir de courant avec la condition qui est ici, faites très attention. Ne prenez pas 2 composants discrets et ne branchez pas un composant loin de l'autre. Parce que si vous faites ceci et ce transistor commence à augmenter, vous pouvez essayer ça au laboratoire et je vous déconseille fortement : mettez 2 transistors connectés à un transistor en diode et posez votre doigt sur celui-ci, comme je fais ici. Vous allez voir, vous allez avoir une brûlure sur votre doigt. Votre doigt va brûler parce qu'il s'emballe tellement vite parce que vous avez 37°C de température de votre corps, d'ici que la température arrive vers la jonction, ce transistor s'emballe et votre transistor va peut-être se détruire à cause de la température, mais vous allez le sentir vite fait sur votre doigt qui correspond à une vraie brûlure, surtout si le boîtier est métallique.

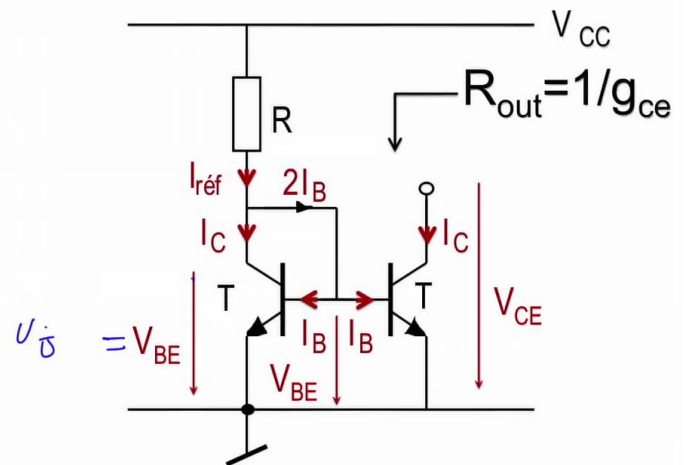
Notes

Summary



Sources de courant intégrées

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - U_J}{R} = I_C + 2I_B = I_C(1 + \frac{2}{\beta}) \approx I_C$$



Electronique II

J'ai dessiné maintenant mon miroir de courant avec tout le bilan du courant qui passe. J'ai dit : ce courant-là, il va fournir un courant I_C mais il va perdre quand même $2 I_B$. Pourquoi 2 ? Parce qu'il y a 2 bases connectées ensemble, un tire un courant I_B , l'autre tirerait le même courant I_B donc j'ai 2 fois I_B . Par contre cette tension base-émetteur est absolument la même pour les 2. Ce transistor vit toujours avec une tension V_{BE} , V_{CE} est égal à V_{BE} ; ce transistor vivra avec le V_{CE} que vous lui faites subir en fonction de la charge et la tension ici qui est égale à la même tension que l'autre. Par contre, le courant est copie conforme. Donc si vous écrivez la relation entre le courant I_{REF} qui fournira $2 I_B$, vous devez écrire comme ça. Il doit donner $I_C + 2 I_B$ ce qui est noté ici. Si vous considérez que cette tension, c'est de l'ordre de grandeur d' U_J parce qu'il est connecté en diode, vous allez trouver que $I_{REF} = (V_{CC} - U_J) / R$. Maintenant je fais le bilan en espérant que les 2 transistors ont le même β et je calcule en disant que ce I_C est égal à I_C : je trouve que la relation entre I_{REF} et le courant I_C , c'est $1 + 2/\beta$, le β de ce transistor.

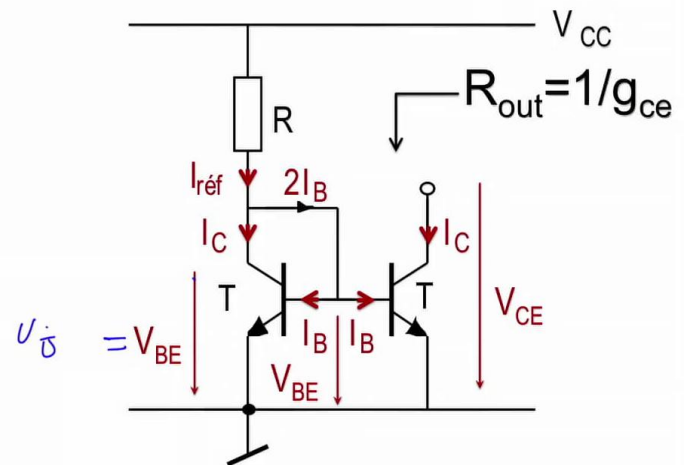
Notes

Summary



Sources de courant intégrées

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - U_J}{R} = I_C + 2I_B = I_C \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \approx I_C$$



Electronique II

Donc finalement, le β des transistors, si le β est élevé, ce terme est très faible donc on peut l'annuler et on peut dire que les 2 courants sont les mêmes. Il y a moyen de faire mieux. Donc ça arrive dans certains montages où on cherche vraiment à ne pas charger le courant I_{REF} par $2 \times I_B$. Nous pouvons faire la chose suivante.

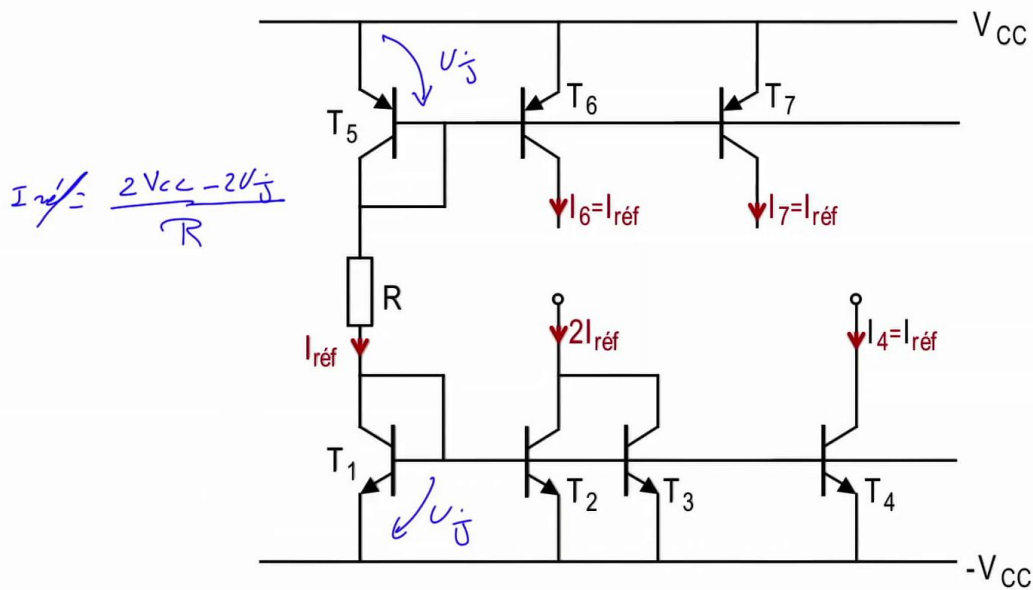
Notes

Summary



41m 04s

Miroir à sorties multiples



Electronique II

La solution qui est adoptée dans les circuits intégrés, elle est basée sur une réflexion comme celle-ci. Si vous allez regarder un circuit réalisé en technologie bipolaire ou en technologie intégrée, vous allez voir que le fabricant utilise des rails d'alimentation. Là en l'occurrence, j'ai pris +VCC et -VCC. Et ils ajoutent 2 batteries de miroirs de courant parce que nous pouvons copier un miroir de courant plusieurs fois. Donc regardez ça, ça correspond à un miroir de courant PNP. Ça, c'est un miroir de courant NPN. Donc si vous prenez depuis VCC +VCC, -VCC, et vous mettez un transistor connecté en diode de type PNP, un transistor connecté en diode de type NPN, et vous choisissez une résistance de votre choix : vous pouvez très bien dire : Le courant I_{REF} , je néglige le courant de base et je vais écrire I_{REF} qui va être $V_{CC} - (-V_{CC})$ donc c'est $2 V_{CC}$, divisé par la... Pardon, moins la chute de tension que j'ai ici que j'approxime à U_j , et celle que j'ai de là que je vais approximer à U_j , ça me donne $2 U_j$ que je diviserai par la résistance R . Donc ça me donne : $(2 V_{CC} - 2 U_j) / R$ donc je vais obtenir le courant I_{REF} que j'aurai calculé en fonction de ma résistance R .

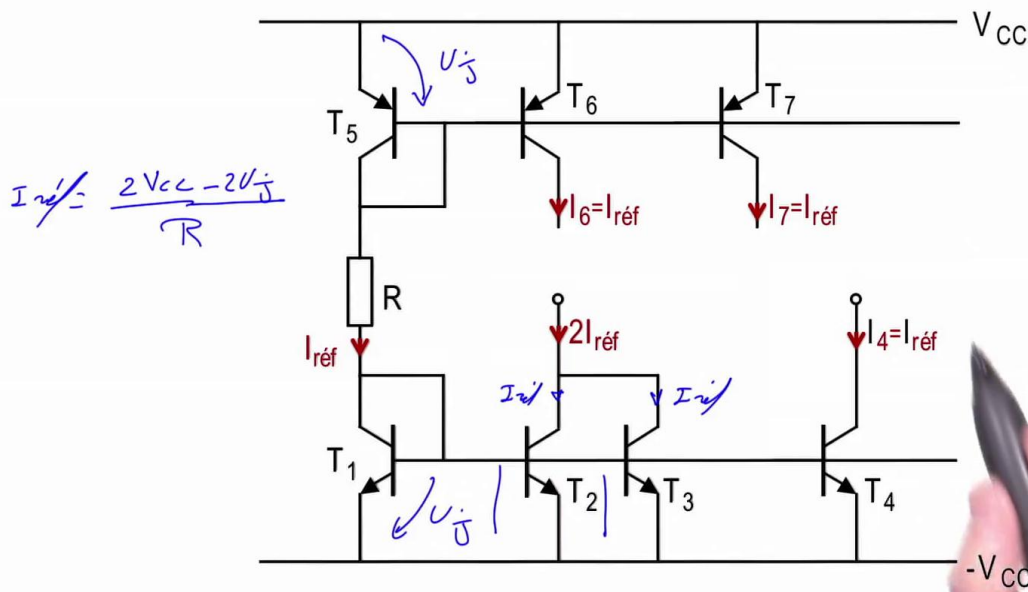
Notes

Summary



42m 57s

Miroir à sorties multiples



Electronique II

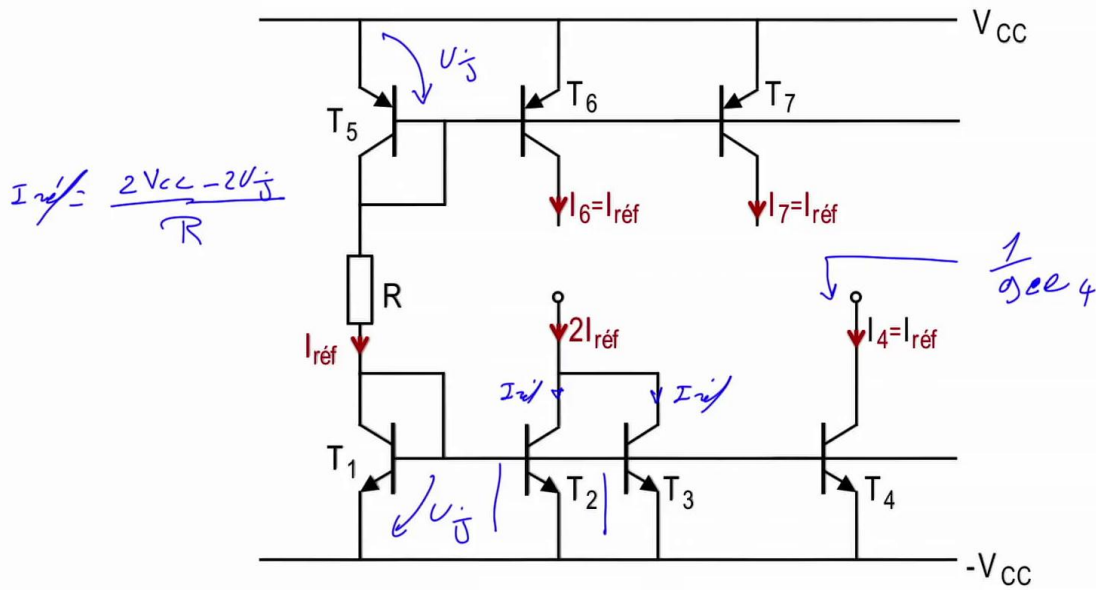
Et maintenant, je prends ce courant et je vais faire des miroirs de courant qui le copient pour donner des courants, des sources de courant, qui injectent un courant dans ce sens-là. Et je peux le copier autant de fois que je veux. Je peux faire des sources de courant qui tirent des courants et je peux aussi injecter autant de fois que je veux. Et là, je viens de faire une subtilité : c'est que, sachez que si vous voulez multiplier par un facteur 2 ce même courant, il suffit de brancher 2 transistors parallèles. Prenez le même transistor et vous le mettez 2 fois en parallèle. Le courant qui passe ici, ça va être I_{REF} et ça c'est I_{REF} . Pourquoi ? Parce qu'ils ont tous la même tension, donc le I_{REF} va apparaître ici et le I_{REF} va apparaître là, et là vous allez vous retrouver avec $2 I_{REF}$. Donc plus tard, quand on commence à regarder des circuits réalisés avec des circuits intégrés, vous allez constater facilement que la première chose qu'on fait dans un circuit, c'est de générer des courants de référence qui sont faits de cette manière-là et on va l'utiliser partout. Alors, l'impédance de sortie que je vois partout, j'ai un transistor que je regarde depuis collecteur et émetteur, cette impédance de sortie, c'est $1/G_{CE}$ de ce transistor.

Notes

Summary



Miroir à sorties multiples



Electronique II

Donc c'est le transistor 4, ça va être $1/g_{ce4}$, là c'est la même chose mais G_{ce7} , et caetera, et caetera. On va voir comment faire mieux pour booster cette impédance de sortie. Cette impédance de sortie, elle est grande mais peut-on faire plus grand ? Oui, on peut faire plus grand. Et on le fait comment ? On le fait de cette manière.

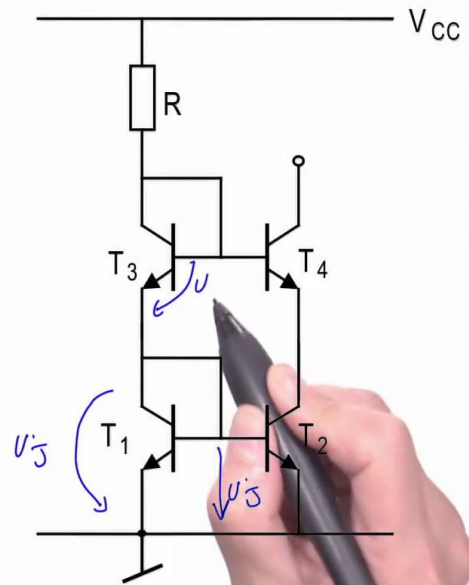
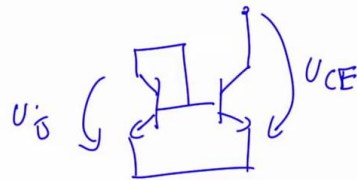
Notes

Summary



45m 43s

Montage Cascode



Electronique II

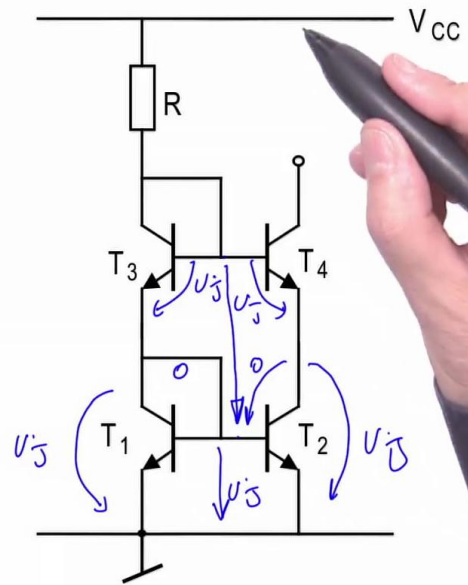
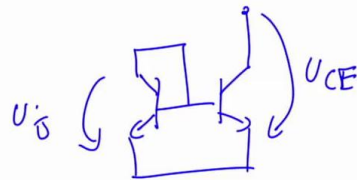
On fait comme ça. Ça, c'est mon miroir de courant original. Et je viens mettre dessus un autre miroir de courant similaire. Donc je fais 2 étages. Avant d'aller dans les détails de l'impédance de sortie que je vous ai annoncée et qui va être améliorée, j'aimerais juste vous montrer que ce genre de montage, il est déjà extrêmement bien réalisé pour les dérives en température et pour pouvoir imposer une tension fixe à ce transistor T2. Vous vous souvenez, tout à l'heure quand j'avais pris le miroir de courant normal et j'ai connecté un transistor en diode et j'ai fait tout un discours sur le fait que ce transistor-là, il va subir une tension U_{CE} et ce transistor-là, il va subir une tension U_J . Donc ça, ça posait un problème que la dissipation thermique dans ce transistor va être supérieure. Et comment on améliore ça ? Par l'appareillement, le fait que l'un et l'autre, c'est sur la même puce. Est-ce que c'est le cas par rapport à T1 et T2 quand je lui mets un étage dessus ? Analysons-le. Je regarde ce transistor : qu'est-ce qu'il voit ici ? Je vais parler de U_J pour me simplifier la vie. Il va voir une tension U_J . Quelle est la tension là ? C'est U_J . Quelle est la tension ici ? C'est U_J .

Notes

Summary



Montage Cascode



Electronique II

La tension là, c'est U_J . Alors je vais regarder la tension qui est de là à là : la tension que je vois de là à là, cette tension est égale à quoi ? Là, de ce côté-là si je cache cette partie c'est $U_J + 0$, ça c'est 0, c'est un court-circuit. De ce côté-là, de là à là, cette tension est partagée, c'est la même. Si de ce côté-là j'ai U_J et là j'ai 0 forcément de l'autre côté j'ai U_J et là j'ai une chute de tension égale à 0. Donc cette tension-là, malgré que je n'aie pas un court-circuit réel, je vais me trouver avec une différence de potentiel qui va me dire que la base et le collecteur se retrouvent au même potentiel. Donc ce transistor T_2 est placé au seuil de la saturation. Et si il voit par construction qu'il a une tension 0, c'est-à-dire cette tension de là à là elle est aussi égale à U_J . C'est génial ! Les 2 tensions sont les mêmes. Ce transistor et ce transistor vivront tout le temps avec la même tension. Donc, comme si j'étais en train de dire : l'effet Early ne va pas apparaître, il n'y aura pas de variation de tension. Si vous branchez ici une charge et que vous faites varier cette charge avec une résistance variable, donc vous allez avoir cette tension qui va baisser ce transistor-là, il voit tout le temps son émetteur à une tension fixe qui est égale à U_J et ne bouge pas.

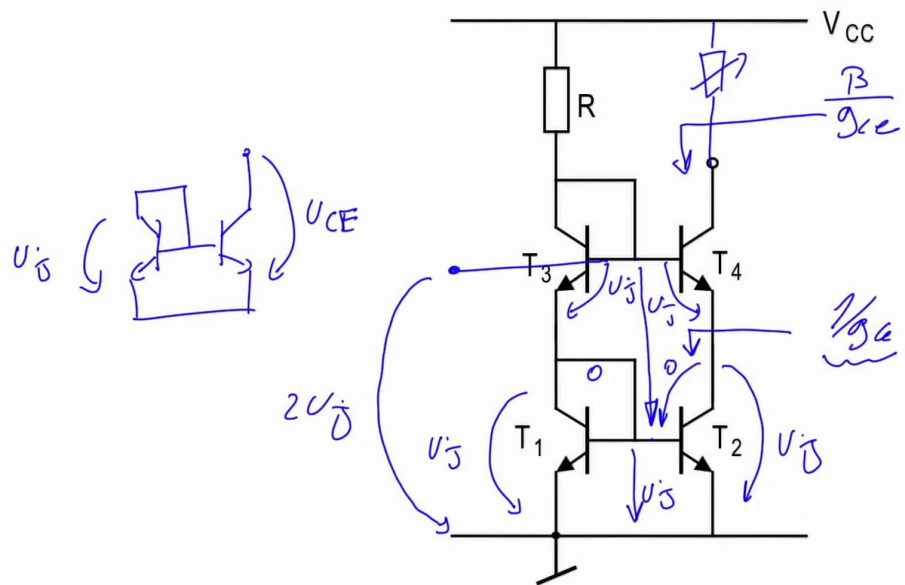
Notes

Summary



47m 32s

Montage Cascode



Electronique II

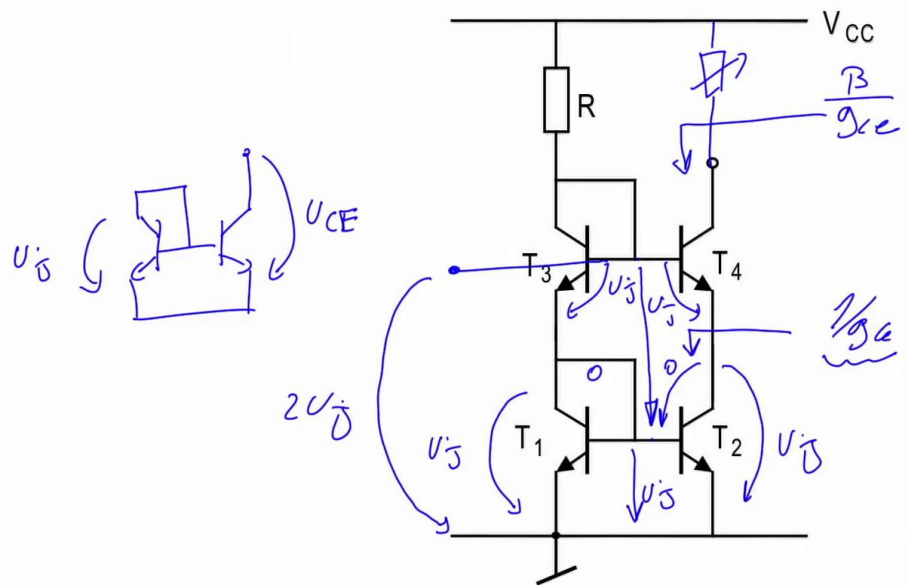
Quand la tension U_{CE} est égale à 0 et lui sature, ce transistor-là n'a pas saturé. Il est hors saturation ce qui va nous amener à avoir cette structure qui devient beaucoup plus stable en termes de température, ça c'est d'un côté, et de l'autre côté ce transistor-là se retrouve chargé avec une impédance là. On l'avait établie tout à l'heure, c'est combien ? C'est $1/G_{CE}$. Donc là, j'ai $1/G_{CE}$ comme impédance que j'ai mise dans l'émetteur d'un transistor. Donc, c'est un transistor où il se trouve que la base a un potentiel fixe. Et la base de ce transistor de là à là c'est $U_J + U_J$: c'est $2 U_J$. Donc la base est connectée à un potentiel fixe, c'est comme une base commune, je regarde son impédance depuis ce collecteur et dans son émetteur, je lui ai mis une résistance égale à quelque chose de $1/G_{CE}$ qui est forcément beaucoup plus grand que son $1/G_{BE}$. Et si vous vous souvenez, quand on dit $1/G_{CE}$ ou plutôt la résistance que j'ai ajoutée dans son émetteur ou que j'ai appelée R_E , est beaucoup plus grande que $1/G_{BE}$, et bien je vais me trouver avec une impédance de sortie qui va tendre vers β divisé par G_{CE} . C'est génial !

Notes

Summary



Montage Cascode



Electronique II

Donc j'obtiens une impédance de sortie extrêmement élevée tout en ayant une structure dans laquelle la tension ici ne bouge pas et le transistor d'en haut va subir une variation. Donc c'est une excellente source de courant. On va le regarder encore une fois plus propre avec tout ce que j'ai ajouté comme écriture sur ceci.

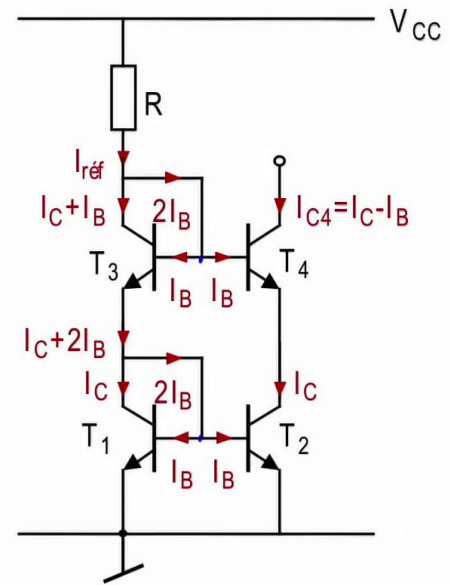
Notes

Summary



Montage Cascode

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - 2U_j}{R}$$



Electronique II

Regardez le même montage maintenant analysé avec tous les bilans de courant, je ne vais aller dans les détails parce que ça n'a pas de sens de montrer qu'il y a un courant qui passe. Si on veut l'améliorer, on n'a qu'à ajouter ce transistor qui viendrait là pour tirer une composante du courant, on peut faire pareil ici. Mais ça, ce sont des solutions de second ordre qu'on fait rarement dans certains circuits, où quand on est à la recherche de la perfection, on essaye de mettre un transistor là et un transistor là. Mais nous tombons sur un schéma, ce qu'on appelle le Montage Cascade qu'on a déjà étudié. Parce qu'on a mis en cascade 2 transistors et on a imposé sur la base d'un transistor un potentiel fixe et à la base d'un transistor, le deuxième, un potentiel fixe, et l'impédance que je vais voir depuis ici, ça va être le $\beta \times 1/GCE$. Et ceci, c'est en répétant le même miroir de courant et en le copiant une deuxième fois. Et je réalise avec ça une excellente source de courant. Donc ça, c'est l'équivalent de ça avec une impédance de sortie dont cette valeur-là est β/GCE , comparé au miroir de courant simple, si je n'avais pas ajouté un autre par dessus j'aurais obtenu que c'est égal de là à là à simplement $1/GCE$.

Notes

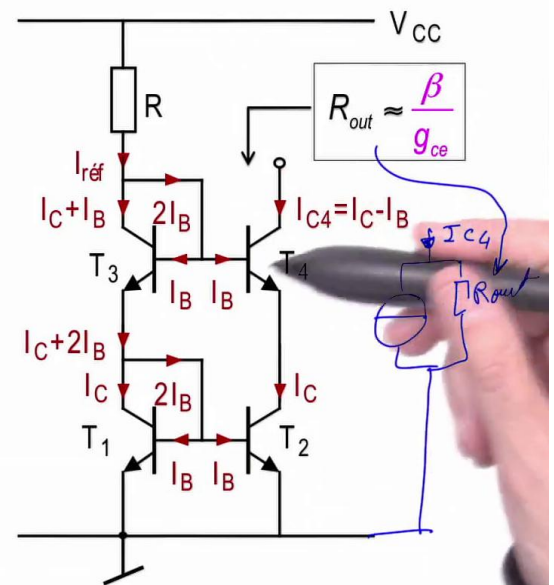
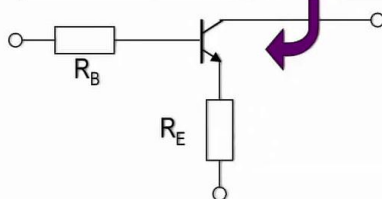
Summary



Montage Cascode

$$I_{\text{réf}} = \frac{V_{CC} - 2U_j}{R}$$

$$R_{\text{out}} \approx \frac{1}{g_{ce}} \frac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E} \approx \frac{\beta}{g_{ce}} \text{ si } R_E \gg \frac{1}{g_{be}}$$



Electronique II

Donc en termes d'impédance de sortie, je viens de l'améliorer β fois par rapport à un miroir de courant normal. Et bien sûr, tout ça viendrait avec la stabilité thermique de ce montage. Et pour le résumer, je ne pense pas qu'il y ait besoin de venir commenter ça une deuxième fois, on vient de le voir, et je le rapporte sur ce dessin, et ceci vous rapporte un résumé de l'impédance de sortie qui m'intéresse fortement et du courant de référence que je viens d'imposer. Donc de ce côté-là, j'ai un courant que j'impose moi-même, donc de diode, de l'autre côté, je vois une source de courant. Faites très attention que de ce côté-là il n'y a pas de source de courant : c'est moi qui impose un courant dans 2 diodes en série. Et là, je me trouve avec vraiment une source de courant qui est comme ça et ce courant-là, c'est le courant IC_4 . Et là, c'est imposé à la masse et la résistance R_{OUT} qui est là, c'est cette résistance aussi élevée que β/g_{ce} . Et sachez que si vous répétez ça et vous ajoutez encore un étage, vous pouvez continuer jusqu'au ciel, et chaque fois vous ajoutez un β fois ce qui vient ici. Donc j'aurais en ajoutant encore un miroir de courant dessus, je trouverais β^2/g_{ce} .

Notes

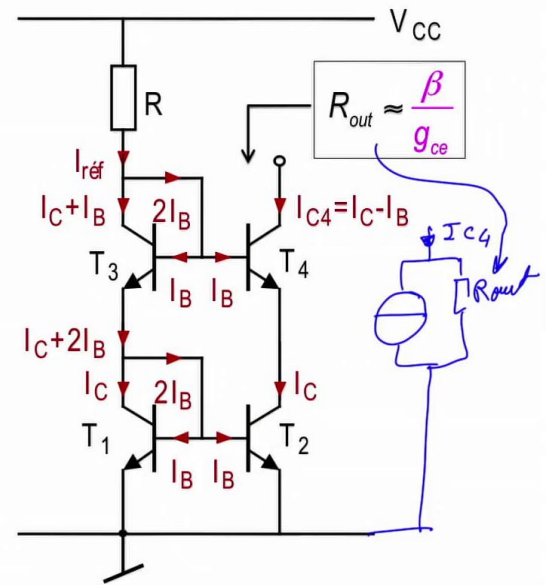
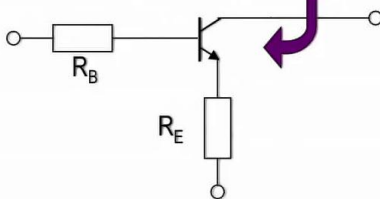
Summary



Montage Cascode

$$I_{réf} = \frac{V_{CC} - 2U_j}{R}$$

$$R_{out} \approx \frac{1}{g_{ce}} \frac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E} \approx \frac{\beta}{g_{ce}} \text{ si } R_E \gg \frac{1}{g_{be}}$$



Electronique II

Donc des sources de courant qui ont une stabilité extraordinaire et qui peuvent servir à réaliser des sources de courant et des références de courant qui sont extrêmement stables, en ayant éliminé tout ce qui est lié à l'effet Early d'un transistor simple. Donc en résumé, on vient de voir l'ensemble des circuiteries qu'on utilise pour polariser un transistor. Sachez que la polarisation est une chose absolument... la plus importante dans un circuit. Nous allons voir plus tard que ça impacte sur la dynamique, ça impacte sur le rendement du circuit. Et on a terminé après, vers la fin, avec des circuiteries de polarisation un peu spécifiques qu'on a appelées les sources de courant et on va voir que ces sources de courant vont être à l'origine de la réalisation de la résistance infinie, celle qu'on va utiliser dans les circuits intégrés et notamment dans les amplificateurs opérationnels. Parce que, si vous vous rappelez que le gain d'un ampli-op est infini, le gain en tension, c'est parce qu'on a réalisé une résistance infinie. Et ces sources de courant vont nous permettre d'imposer un courant fixe ou de réaliser des charges actives qui seront le sujet de notre prochain chapitre.

Notes

Summary

