

АЧХ и на нижних, и на верхних частотах. С помощью раздельной регулировки можно изменять усиление на нижних частотах от -20 до $+20$ дБ, на верхних — от -16 до $+16$ дБ по отношению к средним частотам. При нижнем положении регулятора НЧ сигнал снимают с резистора с маленьким сопротивлением $0,1R$, что обеспечивает спад АЧХ на нижних частотах. При верхнем положении регулятора НЧ сигнал снимают с резистора с большим сопротивлением и с параллельного конденсатора $10C$, что обеспечивает подъем характеристики на нижних частотах. При нижнем положении регулятора ВЧ в цепь коррекции параллельно выходу включен конденсатор $10C$ через небольшое сопротивление $0,1R$, что приводит к уменьшению усиления на верхних частотах (спаду АЧХ на ВЧ). При верхнем положении регулятора параллельно выходу подключена емкость $10C$ через большое сопротивление $10R$, что обеспечивает подъем АЧХ на верхних частотах по отношению к среднему положению регулятора ВЧ. Частотная характеристика регулятора приведена на рис. 17.25,б.

Выводы. 1. Для создания определенной амплитуды сигнала на выходе усилителя используются соответствующие регулировки. Применяются как частотно-зависимые, так и частотно-независимые регулировки. 2. Регулировки могут осуществляться изменением амплитуды на входе усилителя или на входе отдельных его каскадов, изменением режима работы усилительного элемента, изменением глубины отрицательной обратной связи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определите общий коэффициент усиления по напряжению трехкаскадного усилителя в децибелах, если коэффициент усиления каждого каскада $K_1 = K_2 = K_3 = 10$.

2. Каким образом суммируются коэффициенты частотных искажений и углов сдвига фаз, вносимых отдельными каскадами, в многокаскадном усилителе?

3. Может ли произойти выброс вершины импульса на выходе многокаскадного усилителя, если каждый из каскадов его не имеет?

4. Какие меры принимают для уменьшения мощности шума на выходе многокаскадного усилителя?

5. Определите сопротивление и коэффициент усиления K каскада на биполярном транзисторе (на низкой частоте) с отрицательной обратной связью по току, если $k_{210} = 60$, $h_{110} = 1000$ Ом; $R_{o,c} = 100$ Ом; $R_u = 1000$ Ом.

6. Определите выходное сопротивление эмиттерного повторителя, если $h_{110} = 1000$ Ом; $R_{ra} = 5000$ Ом; $h_{210} = 50$.

7. Какие меры применяют в многокаскадных усилителях для обеспечения зависимости входного и выходного сопротивлений от изменения сопротивлений нагрузки и сопротивления источника питания?

8. Что называют самовозбуждением или потерей устойчивости усилителя? При каких условиях возникает самовозбуждение усилителя?

9. Может ли усилитель с отрицательной обратной связью потерять устойчивость?

10. Назовите условия устойчивой работы многокаскадного усилителя с обратной связью.

11. Какие меры применяют для обеспечения устойчивости усилителя с отрицательной обратной связью?

12. Каковы причины возникновения паразитной обратной связи через общий источник питания? Как влияет эта обратная связь на свойства усилителя?

13. Какие меры применяют для уменьшения паразитной обратной связи?
14. Какие существуют способы регулировки в усилителях?
15. Для чего используют тонокомпенсированные регуляторы громкости?

Глава 18. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

18.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Усилители постоянного тока (УПТ) служат для усиления по напряжению, току и мощности медленно изменяющихся во времени сигналов, включая и их постоянную составляющую. Коэффициент усиления таких усилителей при понижении частоты сигнала до нуля не обращается в нуль, как у обычных усилителей переменного тока, а остается примерно постоянным в полосе частот $\omega = 0 \dots \omega_{max}$, определяемой назначением усилителя. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики такого усилителя приведены на рис. 18.1.

Усилители постоянного тока используют в чувствительных тальванометрах; для регистрации фототоков при медленно изменяющейся освещенности; для усиления ЭДС термопар; для измерения ионных токов, текущих в коллекторах масс-спектрометров; в устройствах автоматического регулирования и управления; в устройствах автоматического регулирования и управления; стабилизаторах напряжения и тока; для измерения магнитного поля; в осциллографах для исследования медленно меняющихся процессов; в аппаратуре связи. Кроме того, УПТ применяют для усиления сигналов по мощности в оконечных каскадах, нагрузкой которых являются исполнительные элементы (обмотки электродвигателей и генераторов постоянного тока, электромашинных усилителей, поляризованных электромагнитных реле). Усилители постоянного тока — основные элементы электронных моделирующих машин.

По принципу действия и схемному выполнению УПТ делят на два основных вида: усилители постоянного тока прямого усиления или УПТ с гальванической связью, и усилители постоянного тока с преобразованием сигнала.

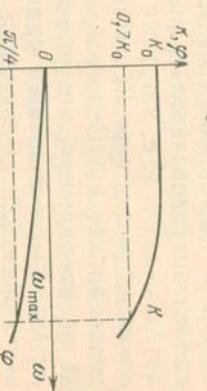


Рис. 18.1. Частотно-фазовая характеристика УПТ

18.2. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

Принцип построения усилителей постоянного тока прямого усиления заключается в использовании цепей межкаскадных связей, полоса пропускания которых не ограничена со стороны нижних частот, т. е. цепей, не содержащих разделительных конденсаторов или трансформаторов. Элементами гальванической связи являются те элементы, которые обладают проводимостью для

сколько удобно медленно изменяющегося тока: резисторы, диоды, стабилитроны и т. д. Если в качестве такого элемента используется проводник, то такую связь приять называть непосредственной (рис. 18.2). В данной схеме напряжение сигнала с коллектора предыдущего транзистора поступает на базу последующего. При проектировании усилителей постоянного тока с гальваническими связями необходимо согласовать относительно большой потенциал коллектора (особенно анода лампы) с сравнительно низким потенциалом базы транзистора или отрицательным потенциалом управляющей сетки электронной лампы. В транзисторных усилительных каскадах такое согласование осуществляется тем, что падение напряжения на эмиттерном сопротивлении каждого последующего транзистора берут выше, чем предыдущего, настолько, чтобы выполнялось равенство

$$U_{R_{\text{э}02}} + U_{B\text{э}02} = U_{R_{\text{э}01}} + U_{K\text{э}01}.$$

Резисторы $R_{\text{э}1}$, $R_{\text{э}2}$, $R_{\text{э}3}$ в схеме осуществляют стабилизацию токов покоя транзисторов за счет отрицательной обратной связи по току, однако эти резисторы создают в каждом каскаде отрицательную обратную связь и для полезного сигнала, за счет чего снижается коэффициент усиления усилителя. Поскольку сопротивление каждого последующего резистора, включенного в цепь эмиттера, возрастает, то особенно сильная обратная связь получается в последнем каскаде. Коэффициент усиления данного каскада может быть меньше единицы, если $R_{\text{э}3} > R_{\text{к}3}$. В связи с этим непосредственную связь между каскадами (нерадиально выполнять в усилителях, имеющих число каскадов больше трех).

В отсутствие напряжения сигнала на входе усилителя напряжение на выходе усилителя должно быть равно нулю. Для компенсации постоянной составляющей на выходе (напряжения на коллекторе оконечного транзистора) вводят компенсирующий делитель R_3 , R_4 , т. е. нагрузку включают в мост, плечи которого состоят из резистора $R_{\text{э}3}$, сопротивления $R_{\text{к}3}$, транзистора VT_3 и делителя R_3 , R_4 . Делитель напряжения R_1 , R_2 компенсирует падение напряжения, поступающего на источник сигнала с делителем R_1 , R_2 , и сохраняет смещение на входе транзистора VT_1 при включении или выключении источника сигнала. Таким образом,

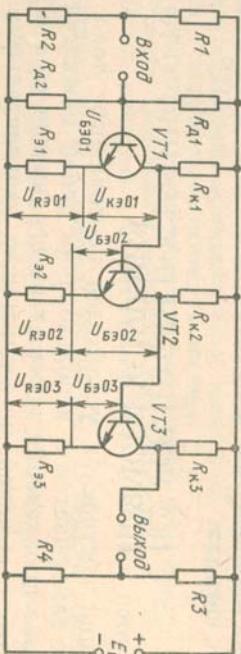
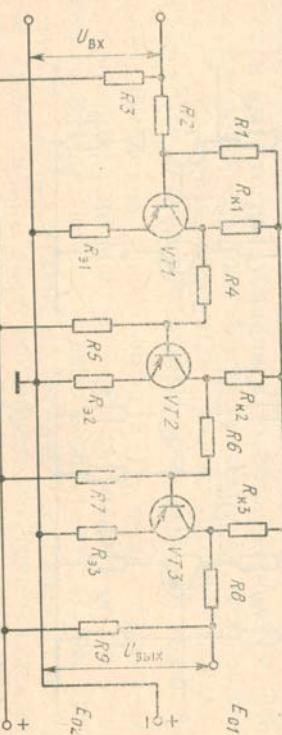


Рис. 18.2. Многокаскадный УПТ с непосредственными связями между каскадами

падение напряжения на резисторе R_2 должно быть равно напряжению на базе первого транзистора по отношению к общему проводнику. Недостатком несимметричного варианта схемы усилителя постоянного тока с прямой межкаскадной связью, кроме низкого усиления второго и третьего каскадов, является отсутствие общего провода между входной и выходной цепями, который необходим, если источник сигнала и нагрузка имеют общую точку («землю»). Указанные недостатки могут быть устранены при использовании усилителей с потенциометрической межкаскадной связью (рис. 18.3). Здесь входная и выходная цепи имеют общий провод, а питание осуществляется от двух источников постоянного тока — источника питания коллекторов транзисторов и дополнительного источника, с помощью которого происходит компенсация излишнего напряжения, поступающего с коллекторов предыдущих транзисторов на базу последующих, т. е. за счет дополнительного источника и делителя напряжения осуществляется необходимый сдвиг уровня постоянного напряжения. По данной схеме строят не только транзисторные, но и ламповые каскады.

Для стабилизации режима работы каскадов можно применять как индивидуальную, так и многополупериодную обратную связь, охватывающую несколько каскадов. При потенциометрической схеме (рис. 18.3) сопротивление резисторов в эмиттерной цепи может быть меньше, чем в схеме с непосредственной связью. Следует иметь в виду, что наличие потенциометрической связи между каскадами приводит к уменьшению коэффициента усиления усилителя, так как коэффициент передачи цепочки связи делителя $k_{\text{дел}} = R_5 / (R_4 + R_5)$ меньше единицы. Отсюда усиление каскада $K_{\text{общ}} = k_{\text{дел}} K$. Кроме того, наличие потенциометрической связи несколько ухудшает частотную характеристику в области верхних частот за счет увеличения падения напряжения на резисторе R_4 (R_6), вызванного наличием входной ёмкости следующего каскада.

Для увеличения коэффициента передачи можно использовать элементы, имеющие существенные различия сопротивлений постоянному и переменному току. Так, например, вместо резистора R_4 можно использовать полупроводниковые или газоразрядные ста-



билилтрансы, обладающие значительным сопротивлением постоянному току и малым дифференциальным сопротивлением (сопротивлением для переменного тока) (рис. 18.4). При использовании схемы рис. 18.4, а необходим дополнительный резистор R_6 , так как ток стабилизации стабилитрона обычно больше тока базы транзистора VT_2 , поэтому чаще используют схему рис. 18.4, б, где стабилитрон включен в цепь эмиттера последующего каскада. Падение напряжения на стабилитроне остается постоянным, поэтому все изменения напряжения на коллекторе транзистора (аноде лампы) под воздействием поданного на вход сигнала передаются на последующий каскад. Данные схемы могут применяться при сравнительно большом напряжении сигнала, так как процессы, происходящие в стабилитронах, приводят к увеличению внутренних шумов. Инерционность самих стабилитронов приводит к ухудшению частотной характеристики на верхних частотах, особенно при применении газоразрядных приборов.

Транзисторные каскады с непосредственной связью нашли широкое применение и в усилителях переменного тока. Достоинства таких усилителей — отсутствие переходных трансформаторов и конденсаторов большой емкости, что особенно важно при микроминиатюрном исполнении в гибридных и интегральных схемах. Источник сигнала и нагрузку в этом случае подключают через разделятельный конденсатор, что обеспечивает наличие общего провода между источником сигнала и нагрузкой. Для увеличения усиления можно использовать внешние конденсаторы, которые шунтируют эмиттерные сопротивления для устранения отрицательной обратной связи по переменному току. Кроме того, непосредственная связь, как было показано в гл. 17, повышает устойчивость усилителя на низких частотах.

Основная трудность, которая встречается при проектировании усилителей медленно изменяющихся сигналов, заключается в том, что такие усилители обладают большой нестабильностью, обусловленной усиливаемой постоянной составляющей. Это приводит к тому, что самопроизвольные изменения во времени напряжения источников питания, параметров усилительных элементов

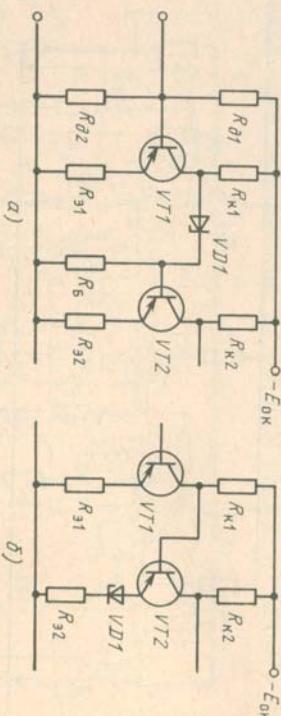


Рис. 18.4. Схемы свида уровня постоянного напряжения с помощью стабилитрона:

а — в цепи связи между каскадами, б — в эмиттерной цепи оконечного каскада

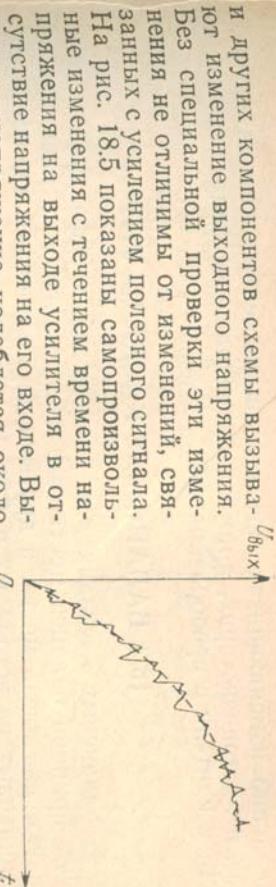


Рис. 18.5. Дрейф нуля УПТ

и других компонентов схемы вызывает изменение выходного напряжения. Без специальной проверки эти изменения не отличимы от изменений, связанных с увеличением полезного сигнала. На рис. 18.5 показаны самопроизвольные изменения с течением времени напряжения на выходе усилителя в отсутствие напряжения на его входе. Выходное напряжение колеблется около некоторого среднего значения (штриховая линия), которое, в свою очередь, изменяется с течением времени. Изменение среднего значения выходного напряжения или тока носит название дрейфа нулевого отсчета усилителя (дрейф нуля УПТ). Абсолютный дрейф нуля обычно определяют как максимальное изменение выходного напряжения при замкнутом входе за определенный промежуток времени. Приведенный ко входу дрейф усилителя вычисляют делением абсолютного дрейфа на коэффициент усиления усилителя: $U_{\text{вх}, \text{др}} = U_{\text{вых}, \text{др}} / K$.

Величина $U_{\text{вх}, \text{др}}$ ограничивает минимально различимый входной сигнал, т. е. определяет чувствительность усилителя. Например, в обычных ламповых вольтметрах постоянного напряжения, питаемых от сети переменного тока, если не применяют специальные меры, приведенный дрейф составляет 10...15 мВ/ч. Специальные меры позволяют уменьшить дрейф до значения порядка милливолт в час. Дрейф существенно ограничивает пороговую чувствительность усилителей медленно меняющихся сигналов. Кроме того, при длительной непрерывной работе усилителя напряжение дрейфа может оказаться сопоставимым с максимальным уровнем сигналов, на которые рассчитан усилитель. Поэтому дрейф ограничивает время, в течение которого усилитель может работать без контроля.

Относительно быстрые неупорядоченные колебания выходного напряжения около его среднего значения обусловлены усилием. Общий уровень шума усилителя с связями обычно выше, чем усилителя переменного тока при той же верхней частоте пропускания. Это объясняется тем, что мощность шума, обусловленная эффектом мерцания или избыточными шумами транзисторов, находится в низкочастотной области и не всегда попадает в спектр усилителей переменного тока.

Основная причина дрейфа нуля УПТ, выполненного на транзисторах, — изменение обратного тока коллектора и смешение входной характеристики при изменении температуры. Для УПТ на транзисторах желательно применять кремниевые транзисторы, которые имеют малое значение обратного тока коллектора. Из германевых транзисторов наименьшим дрейфом обладают высокочастотные транзисторы. Для уменьшения дрейфа усилителей

медленно изменяющихся сигналов, выполненных как на лампах, так и на транзисторах, применяют специальные балансные схемы или усилители с преобразованием.

18.3. БАЛАНСНЫЕ КАСКАДЫ УПТ

В балансных каскадах для уменьшения дрейфа нуля используют принцип баланса моста, где два усилительных элемента об разуют два плеча моста, а другими двумя плечами являются два одинаковых резистора R_3 и R_5 . Напряжение питания каскада подводится к вертикальной диагонали моста, а сопротивление нагрузки включается в горизонтальную диагональ (рис. 18.6). Помимо изменения напряжения питания каскада под воздействием температуры или старения теоретически не вызывают появление напряжения дрейфа. Однако в практических условиях из-за не полной симметрии схемы, а также неодинаковости изменения элементов при изменении внешних условий напряжение дрейфа оказывается не равным нулю, а лишь уменьшается примерно в де сятки раз по сравнению с обычным каскадом. Для того чтобы напряжение на выходе в отсутствие сигнала равнялось нулю, баланс моста осуществляется с помощью переменного резистора R_4 .

В балансных каскадах усилительные элементы можно включать либо последовательно друг с другом (рис. 18.6, а), либо параллельно (рис. 18.6, б). Параллельные балансные каскады удобнее для практического использования и в микроэлектронной технологии. Такие каскады позволяют иметь два входа, симметричных относительно общего провода (рис. 18.7), и называются дифференциальными каскадами.

Дифференциальный каскад можно использовать в нескольких режимах: 1) при подаче сигнала на симметричный вход точки 1 и 2; 2) при подаче сигнала на несимметричный вход 1—1' или

2—2'; 3) при снятии сигнала с симметричного выхода 3 и 4; 4) при снятии сигнала с несимметричного выхода 3—1' или 4—2'. Напряжение сигнала на выходе дифференциального каскада определяется разностью напряжений на входе и коэффициентом усиления усилителя $U_{\text{вых}} = K(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})$. Рассмотрим работу дифференциального каскада в следующих режимах:

1. Пользуясь эквивалентной схемой (рис. 18.8), определяем входное сопротивление дифференциального каскада при подаче двух напряжений $u_{\text{вх1}}$ и $u_{\text{вх2}}$, принимая $h_{12} \approx 0$; $Y_n > h_{22}$:

$$u_{\text{вх}} = i'_1 h'_{119} + (i'_1 + i'_1 h'_{219}) R_a = i'_1 [h'_{119} + (1 + h'_{219}) R_a] + i''_1 (1 + h''_{219}) R_a = i'_1 [h'_{119} + (1 + h''_{219}) R_a], \quad (18.1)$$

где $\delta' = i''_1 / i'_1$.

При одинаковых параметрах транзисторов и синфазном входном сигнале, т. е. при одинаковых по величине и фазе напряжениях на входе, входное сопротивление каскада

$$R_{\text{вх1}} = u_{\text{вх}} / i'_1 = h_{119} + 2(1 + h_{219}) R_a. \quad (18.2)$$

При одинаковых параметрах транзисторов и противофазном сигнале, когда $i'_1 = -i''_1$, входное сопротивление каскада $R_{\text{вх2}} = -h_{119}$, так как на сопротивлении R_a не возникает напряжение обратной связи из-за того, что переменные составляющие токов i'_1 и i''_1 в противофазе. При $R_n > R_a$ и синфазном сигнале

$$K_{\text{синф}} = K_{1 \text{ синф}} - K_{2 \text{ синф}}, \quad (18.3)$$

где $K_{1 \text{ синф}} = h'_{219} R_a / R'_{\text{вх}}$ — коэффициент усиления первого каскада, $K_{2 \text{ синф}} \approx h''_{219} R_a / R''_{\text{вх}}$ — коэффициент усиления второго каскада.

Тогда коэффициент усиления при синфазном сигнале

$$K_{\text{синф}} = \frac{h'_{219} R_a}{h'_{119} + (1 + h'_{219}) R_a + \delta' (1 + h''_{219}) R_a} - \frac{h''_{219} R_a}{h''_{119} + (1 + h''_{219}) R_a},$$

где $\delta'' = i''_1 / i'_1$.

При $R_a / h_{219} > h_{119}$ и $h_{219} \gg 1$, что чаще всего имеет место;

$$K_{\text{синф}} \approx \frac{R_a}{R_a} \left(\frac{\frac{h'_{219}}{h'_{119} + \delta' h'_{219}} - \frac{h''_{219}}{h''_{119} + \delta'' h''_{219}}}{h''_{219} + \delta'' h'_{219}} \right) = \frac{R_a}{R_a} \gamma, \quad (18.4)$$

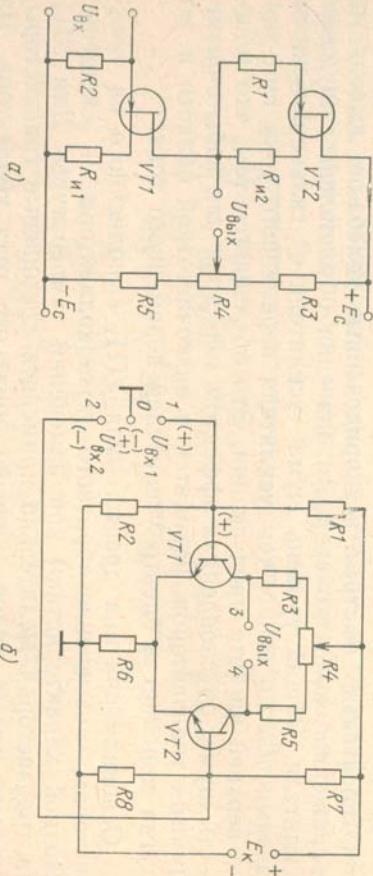


Рис. 18.6. Балансные каскады УПТ
а — последовательная балансная схема, б — параллельная балансная схема

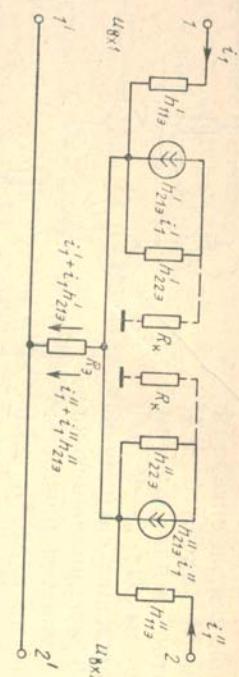


Рис. 18.8. Эквивалентная схема дифференциального каскада

где Y — коэффициент, учитывающий разброс параметров транзисторов VT_1 и VT_2 . При одинаковых параметрах транзисторов и одинаковых напряжениях синфазного входного сигнала коэффициент $Y=0$. Таким образом, выходное напряжение синфазного сигнала тем меньше, чем ближе параметры транзисторов и большее сопротивление резистора R_k . Следовательно, приходим к важному выводу, что при соответствующих условиях дифференциальный каскад подавляет напряжение синфазного сигнала. Данное свойство дифференциального каскада используют для подавления помех, действующей во входной цепи, так как в большинстве случаев помеха на входах каскада имеет одинаковую фазу. При подаче на вход напряжения противофазного сигнала выходное напряжение $U_{bx} = K(u_{bx1} - u_{bx2}) = Ku_{bx}$, где $u_{bx} = u_{bx1} - u_{bx2}$. Коэффициент усиления

$$K = h_{212} R_k / h_{112}.$$

Итак, коэффициент усиления дифференциального каскада при подаче противофазных напряжений соответствует коэффициенту усиления обычного каскада.

2. При несимметричном выходе и синфазном сигнале на входе выходное напряжение

$$U_{bx} = \frac{h_{212} R_k u_{bx}}{h_{112} + 2(1 + h_{212}) R_k} \approx \frac{R_k}{2R_k} u_{bx} \quad (18.5)$$

и не равно нулю, как при симметричном выходе. Однако при глубокой отрицательной связи, когда $R_k > R$, оно оказывается сравнительно небольшим. При несимметричном выходе и противофазном входном сигнале коэффициент усиления усилителя в два раза меньше, чем при симметричном выходе.

3. В практике может иметь место использование дифференциального каскада с несимметричным входом и выходом. При этом напряжение сигнала можно подавать на один вход (например: I, I'), а выходное напряжение снимать как с транзистора VT_1 ($3, I'$), так и с транзистора VT_2 ($4, I'$). Сигнал подается на вход I, I' и снимается с транзисторов VT_1 ($3, I'$). При этом переменная составляющая тока эмиттера первого транзистора, создавая падение напряжения на R_3 , вызывает изменение потенциала база — эмиттер транзистора VT_2 , так как $U_{B2} = U_B - U_3$, где

$U_{B2} = 0$. Следовательно, при увеличении тока эмиттера транзистора VT_1 происходит такое же уменьшение тока эмиттера транзистора VT_2 и напряжение отрицательной обратной связи равно нулю. Тогда

$$K = 0,5 h_{212} R_k / h_{112}.$$

При подаче входного напряжения на вход I, I' и снятии выходного напряжения с VT_2 ($4, I'$) коэффициент усиления $K_{ob} = K_{ok} K_{ob}$, так как первый каскад работает в режиме эмиттерного повторителя, второй каскад включен по отрицанию к первому по схеме с общей базой. При этом фаза выходного напряжения не меняется.

Несимметричный выход применяют при переходе с симметричного источника сигнала на несимметричную нагрузку. Для подавления синфазного сигнала (помехи) необходимо использовать глубокую отрицательную обратную связь, т. е. включать большое сопротивление в цепь эмиттера. При использовании обычного транзистора в цепи эмиттера его нельзя брать слишком большим, так как через эмиттерное сопротивление протекает ток покоя обоих усилительных элементов, что создает большое падение напряжения постоянной составляющей. Поэтому для подавления синфазной составляющей в качестве эмиттерного сопротивления используют элементы, которые обладают сравнительно малым сопротивлением для постоянной и большим сопротивлением для переменной составляющей, т. е. схемы стабилизаторов тока, которые будут рассмотрены подробнее в гл. 20. В усилительной технике они получили название генераторов стабильного тока. В схемах генераторов тока широкое применение получили транзисторы, включенные по схеме с общим эмиттером (истоком) с фиксированным напряжением на базе. Так, например, при токе коллектора 1 мА падение напряжения на транзисторе составляет около 5 В, т. е. сопротивление транзистора постоянному току составляет около 5 кОм, а его выходное сопротивление для переменной составляющей оказывается около 30...50 кОм.

Для повышения выходного сопротивления транзистора, используемого в схеме генератора тока, применяют отрицательную обратную связь по току, при этом $R_i = (1 + S R_k) / h_{222}$. Температурная компенсация осуществляется с помощью диода, включенного в цепь базы. Для компенсации постоянной составляющей между входными зажимами при несимметричном источнике сигнала питание дифференциальных каскадов подается от источника напряжения со средней точкой. Схема диффе-

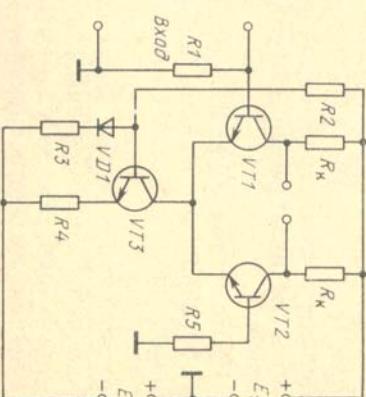


Рис. 18.9. Дифференциальный каскад с генератором стабильного тока

рнциального каскада при использовании питания со средней точкой и генератором тока в цепи эмиттера приведена на рис. 18.9. Подавление синфазной помехи с использованием генераторов стабильного тока в дифференциальных усилителях составляет около 60...80 дБ, т. е. она ослабляется по сравнению с обычным усилителем в 1000...10 000 раз.

Дифференциальные каскады нашли очень широкое распространение в интегральных усилителях, где они выполняются по более сложным схемам.

Выводы. 1. Усилители постоянного тока предназначены для усиления медленно изменяющихся во времени сигналов, частотный диапазон которых начинается от 0 Гц. 2. Для обеспечения полосы пропускания от 0 Гц в УПТ используют только гальванические связи. 3. Для уменьшения дрейфа УПТ с гальваническими связями применяют балансные каскады, где наибольшее распространение получили дифференциальные каскады. Основное достоинство дифференциального каскада в том, что он подавляет синфазный сигнал, а следовательно, и помеху, поступающую на вход усилителя, и может иметь как симметричный, так и несимметричный вход и выход.

Наилучшие качественные и количественные показатели обеспечивают дифференциальный каскад с симметричным входом и выходом. Дифференциальные каскады нашли широкое применение в усилителях, выполненных по интегральной технологии.

18.4. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

Из анализа работы усилителей постоянного тока прямого усиления видно, что основным их недостатком является дрейф нуля. Применение балансных схем и стабилизации источников питания позволяют снизить приведенный ко входу дрейф усилителей до сотен, в лучшем случае, до нескольких десятков микровольт. Наличие такого дрейфа УПТ не позволяет использовать их в чувствительных усилителях медленно изменяющихся во времени сигналов, где входные напряжения имеют один порядок с дрейфом усилителя.

Поэтому для усиления сигналов с входным напряжением ниже сотен микровольт используют усилители постоянного тока с преобразованием частоты. Структурная схема УПТ с преобразованием частоты приведена на рис. 18.10. Принцип действия УПТ с преобразованием частоты заключается в том, что напряжение медленно изменяющегося сигнала преобразуется в напряжение переменного тока, амплитуда которого изменяется пропорционально изменению входного сигнала. Усилитель переменного тока усиливает преобразованный сигнал. На выходе усилителя включает выпрямитель, который выпрямляет усиливаемый сигнал в соответствии с полярностью входного сигнала.

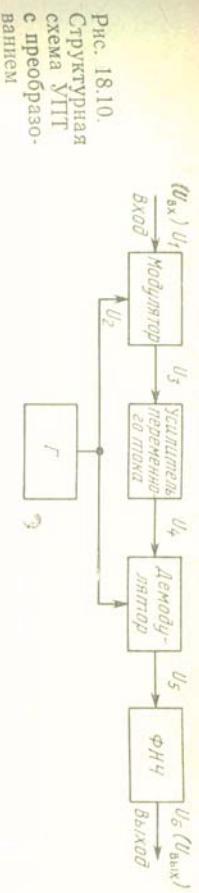


Рис. 18.10.
Структурная
схема УПТ
с преобразо-
ванием

Преобразование входного сигнала в напряжение переменного тока осуществляется с помощью преобразователя частоты — модулятора. Сигнал переменного тока преобразуется в исходный сигнал на выходе усилителя фазочувствительным выпрямителем — демодулятором. На модулятор и демодулятор от вспомогательного генератора подается напряжение синусоидальной или прямоугольной формы, которое называется напряжением несущей или опорной частоты. Фильтр низких частот (ФНЧ) на выходе демодулятора выделяет полезный спектр сигнала и не пропускает на выход побочные продукты преобразования, которые лежат по частоте выше верхней частоты исходного сигнала.

Временные диаграммы работы УПТ с преобразованием приведены на рис. 18.11. Для выделения исходного сигнала на выходе фильтра необходимо, чтобы частота генератора $f_{\text{оп}}$ была в десятки раз больше верхней частоты источника сигнала $f_{\text{в}}$. Можно показать, что при преобразовании частоты исходного сигнала на выходе преобразователя образуются две полосы частот $f_{\text{оп}} - f_{\text{в}}$ и $f_{\text{оп}} + f_{\text{в}}$, которые называются нижней и верхней боковой полосой частот. Таким образом, усилитель переменного тока должен иметь полосу пропускания, равную $2f_{\text{в}}$.

Дрейф усилителя постоянного тока с преобразованием частоты в основном определяется дрейфом модулятора, дрейф демодулятора оказывается значительно слабее, так как на его входе действует усиленный сигнал. Наименее дрейфом обладают специальные электромеханические преобразователи.

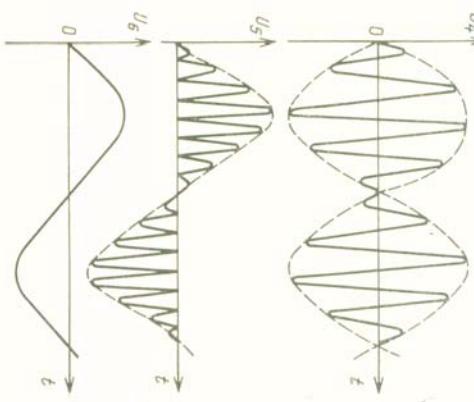


Рис. 18.11. Временные диаграммы УПТ с преобразованием при двух-тактом преобразовании частоты

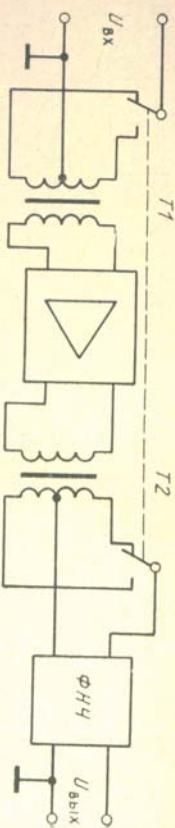


Рис. 18.12. Функциональная схема УПТ с электромеханическим преобразователем. Их дрейф может составлять сотые доли микровольта в час. Функциональная схема УПТ с электромеханическим преобразователем приведена на рис. 18.12.

Основной недостаток электромеханических преобразователей — их малая частота переключения, поэтому их используют при частотах входного сигнала до нескольких герц.

В период развития транзисторной техники широкое распространение получили транзисторные преобразователи, основанные на зависимости сопротивления эмиттер — коллектор от величины и знака напряжения между базой и одним из других управляющих электродов. Если к управляющему эмиттеру приложить отрицающее напряжение, то сопротивление r_{ak} составляет несколько ом для германцевых транзисторов и несколько десятков ом для кремниевых транзисторов. При закрытом управляющем переходе сопротивление r_{ak} составляет несколько мегом для германцевых и десятки мегом для кремниевых транзисторов, т. е. транзистор работает как переключатель цепи. Наилучшие результаты получаются при подаче напряжения опорной частоты между базой и коллектором, т. е. при инверском включении транзистора (рис. 18.13). Для уменьшения дрейфа модулятора используют схемы из двух одинаковых транзисторов, выполненных в интегральном исполнении, которые называются компенсированными ключами (рис. 18.14). Временной дрейф компенсированных транзисторных преобразователей составляет около 25...50 мкВ за 5000 ч, температурный дрейф — около 0,5 мкВ/град. В УПТ с преобразованием, выполненных по интегральной технологии, в схемах переключателей используют полевые транзисторы с изолированным затвором.

Модуляторы можно выполнять как по однотактной, так и по двухтактной схеме. В отличие от обычных выпрямителей в демодуляторах или фазочувствительных выпрямителях направление

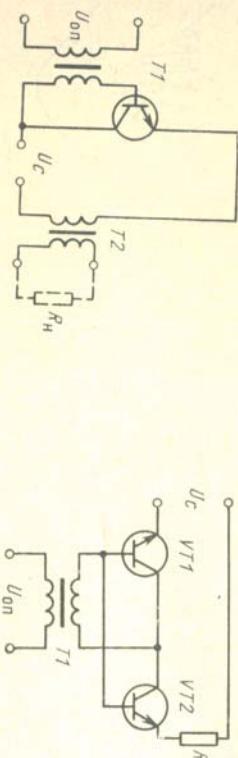
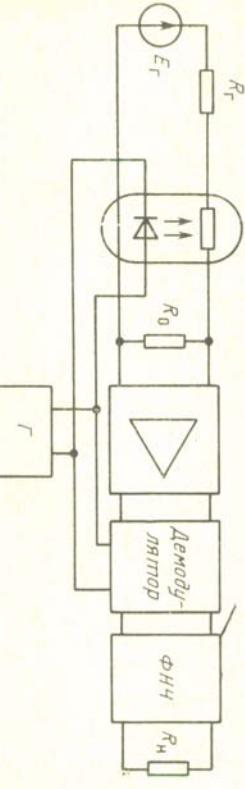


Рис. 18.13. Схема транзисторного модулятора УПТ



тока в нагрузке (полярность выходного напряжения) меняется на обратное при изменении фазы входного сигнала на 180°. Отличительной особенностью схем демодуляторов является наличие опорного напряжения, имеющего ту же частоту, что и выпрямляемое переменное напряжение.

Поэтому напряжение опорной или несущей частоты одновременно подается как на модулятор, так и на демодулятор. Демодуляторы могут работать как на дифференциальную нагрузку, так и на недифференциальную и могут быть выполнены по однополупериодной и двухполупериодной схемам. На рис. 18.15 приведена схема, работающая на дифференциальную нагрузку. Обычно амплитуду опорного напряжения берут выше, чем амплитуду напряжения сигнала, поэтому управление работой диодов осуществляется опорным напряжением. Если выходной сигнал равен нулю, то при полярности опорного напряжения, которое показано на рис. 18.15, диоды VD1 и VD2 открыты и в нагрузках протекает ток i_1 и i_2 . При симметрии схемы токи i_1 и i_2 равны, поэтому выходное напряжение равно нулю. Во второй полупериод опорного напряжения диоды закрыты, и выходное напряжение равно нулю. При наличии входного сигнала, напряжение на одном из диодов совпадает по фазе с опорным (например на VD1), на другом находится в противофазе. В этом случае на выходе появится напряжение, пропорциональное разности токов. При изменении фазы входного сигнала i_2 будет больше, чем i_1 , что приведет к изменению полярности выходного напряжения. При построении УПТ с преобразованием на дискретных элементах можно добиться наилучших показателей, однако, такие УПТ оказываются достаточно сложными и громоздкими.

Для увеличения надежности и уменьшения габаритных размеров разработаны УПТ с преобразованием в интегральном исполнении с использованием операционных усилителей. На смену кон-

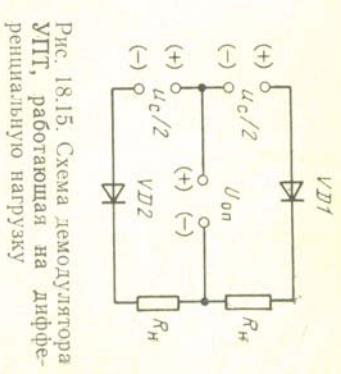


Рис. 18.16. Функциональная схема УПТ с преобразователем на оптроне

тактым и бесконтактным транзисторным преобразователям приходят устройства на оптронах (рис. 18.16).

Принцип действия преобразователя на оптронах заключается в изменении сопротивления фотодиода на оптронах под воздействием светового потока, который получает фотодиод под воздействием напряжения генератора опорной частоты. Поэтому сопротивление фотодиода, расположенного внутри оптрона, колеблется с частотой $f_{\text{оп}}$. При действии на входе напряжения сигнала в цепи внешнего резистора связи R_0 протекает переменный ток, амплитуда которого зависит от напряжения входного сигнала. Падение напряжения на сопротивлении R_0 усиливается усилителем переменного тока и детектируется в балансном модуляторе. Полоса пропускания УПТ с оптроном может достигать десятки мегагерц.

Выходы. 1. Применение балансных каскадов в усилителях постоянного тока в ряде случаев не обеспечивает необходимый дрейф на выходе. 2. УПТ с преобразованием частоты имеют ряд преимуществ перед УПТ с непосредственной связью: малый дрейф и высокую чувствительность к сигналу; низкую чувствительность к изменениям температуры и напряжения питания; простоту регулировки и введения цепей обратной связи; гальванически не связанный вход и выход. 3. Недостаток УПТ с преобразованием частоты — более сложное построение схемы по сравнению с обычными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему нельзя усилить медленноизменяющиеся во времени сигналы с помощью усилителя переменного тока?
2. Как изменяется коэффициент усиления каждого последующего каскада УПТ на транзисторах с непосредственной связью?
3. Какие меры применяют в УПТ с гальванической связью между каскадами?
4. За счет чего возникает дрейф нуля УПТ?
5. Какие каскады с непосредственной связью имеют уменьшенный дрейф нуля и почему?
6. Почему дифференциальный каскад при симметричном выходе подавляет синфазный сигнал?
7. Какие меры необходимо выполнить в дифференциальном каскаде для подавления синфазного сигнала при несимметричном выходе?
8. Какими элементами определяется дрейф нуля УПТ с преобразованием частоты?
9. Перечислите основные преимущества УПТ с преобразованием частоты по сравнению с усилителями с гальванической связью.
10. Какими достоинствами обладает УПТ с преобразованием частоты, где в модуляторе применен оптрон?

Глава 19. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

19.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основные понятия

Еще в ламповый период развития электроники уделялось большое внимание уменьшению габаритных размеров, массы, потребляемой энергии ламп, повышению их надежности. С этой целью были созданы так называемые пальчиковые лампы, комбинированные лампы, миниатюрные лампы. Создание в 1948 г. транзисторов и последовавшее за тем широкое внедрение различных полупроводниковых приборов в электронную аппаратуру были громадным шагом вперед на пути решения проблемы. Однако аппаратура продолжала усложняться, появлялись устройства, содержащие сотни тысяч электронных полупроводниковых элементов, поэтому и габаритные размеры, и масса, и потребляемая энергия возрастили, а надежность уменьшилась. Потребовалось новое коренное решение конструктивно-технологических, схемотехнических, физических проблем, чтобы решить противоречие между непрерывно возрастающей сложностью электронной аппаратуры и уменьшением ее габаритных размеров, массы, стоимости, увеличением ее надежности. Эти решения привели к появлению отрасли — микроэлектроники, которая охватывает проблемы разработки и применения новых электронных приборов — интегральных микросхем (ИМС).

Важнейшим понятием микроэлектроники является *интегральная схема*, заключающаяся в получении максимального числа функционально связанных электронных элементов и их соединений в едином комплексе технологических процессов и в едином конструктивном исполнении. *Интегральной микросхемой* называется микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и кристаллов, которое рассматривается как единое целое.

Элементом интегральной микросхемы является часть этой схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента. Выполнена она нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие. Под электрорадиоэлементом понимают транзистор, диод, резистор, конденсатор. Таким образом, интегральная микросхема обладает следующими особенностями:

- 1) состоит из множества элементов и выполняет определенную функцию — усиление, генерацию, выпрямление, отдельные логические операции или несколько функций. В этом, пожалуй, самое главное свойство ИМС. Ни один из рассматриваемых до сих пор приборов в отдельности не мог выполнять функций, напри-

мер, усиления, генерирования и т. д. В то же время с помощью ИМС реализуются сложнейшие электронные устройства. Напри-

мер, одна микросхема выполняет функцию микропроцессора, на основе которого строят микро-ЭВМ,

2) элементы интегральной схемы не являются дискретными: диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы и соединяющие их элементы составляют единое целое, собираются в едином технологическом процессе;

3) все элементы интегральной микросхемы заключены в один герметический корпус с выводами наружу всей схемы в целом.

Таким образом, новое в ИМС — не элементная база (транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы, хотя и здесь внесены многие интересные усовершенствования), а сами принципы создания и соединения ранее существовавших элементов.

Анализ схемных решений или, как принято говорить, схемотехники ИМС требует знаний, которые были получены при изучении усилительных устройств, так как изучаются не отдельные элементы ИМС, а вся функциональная схема в целом, этим и объясняется то, что изучение ИМС начинается после того, как закончено изучение усилителей на дискретных элементах. Следует отметить, что основные положения, которые относятся к свойствам дискретных полупроводниковых приборов и усилителей, остаются в силе для устройств на ИМС.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Интегральные микросхемы могут быть классифицированы по нескольким признакам:

конструктивно-технологическому, т. е. в зависимости от технологии и материалов, применяемых для изготовления микросхем; по степени интеграции. Степень интеграции является показателем сложности микросхемы и характеризуется числом содержащихся в ней элементов;

по функциональному признаку, т. е. в зависимости от функции, выполняемой микросхемой, — генерация, усиление, логические операции и т. д.;

по физическому принципу, т. е. в зависимости от типа транзисторов, — биполярных или МДП, на основе которых создана ИМС. Конструктивно-технологический признак — один из важнейших в создании ИМС, и поэтому ему уделяют больше внимания. В зависимости от технологии изготовления ИМС можно разделить на *полупроводниковые, пленочные и гибридные*.

Все элементы и межэлементные соединения полупроводниковой ИМС выполнены в объеме и на поверхности полупроводников. Основание, в объеме или на поверхности которого создают ИМС, называют *подложкой*.

Все элементы и межэлементные соединения пленочной ИМС выполнены в виде пленок. Частными случаями пленочных ИМС являются толстопленочные и тонкопленочные ИМС. Следует от-

метить, что создание транзисторов и диодов с помощью пленочной технологии до сих пор освоить не удалось, вследствие этого появился еще один вид ИМС — гибридные ИМС. Гибридные ИМС строят на основе пленочной технологии, но некоторые элементы ИМС навесные, т. е. являются самостоятельными приборами. Часть ИМС, реализующая функции какого-либо электрорадиоэлемента, которая может быть выделена как самостоятельное изделие, называют *компонентом ИМС*.

Совмещенные интегральные схемы созданы на основе совмещения в одной ИМС полупроводниковой и пленочной технологий. Совмещенная ИМС может быть изготовлена на основе полупроводниковой подложки, в которой создаются методами полупроводниковой технологии активные элементы — транзисторы и диоды, а пассивные элементы методами тонкопленочной технологии наносят на поверхность подложки. Это позволяет получить ИМС, сочетающие достоинства как полупроводниковой, так и пленочной технологий.

МЕТОДЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИМС

В ИМС с большим числом элементов одна из важнейших задач — изоляция элементов между собой, которую выполняют двумя способами: с помощью *PN*-перехода, включенного под обратное напряжение, и диэлектрической пленкой, в качестве которой может быть использована двуокись кремния.

Достоинство изоляции *PN*-переходом в том, что он технологически проще для создания, чем диэлектрическая пленка. Недостатки изоляции *PN*-переходом: наличие токов утечки в изоляции, т. е. токов неосновных носителей при обратном смещении, наличие паразитной барьерной ёмкости, которая создает паразитные обратные связи, уменьшает быстродействие схемы, зависимость тока утечки изоляции от температуры *PN*-перехода.

Достоинства диэлектрической изоляции по сравнению с изоляцией *PN*-перехода: более высокая степень изоляции за счет незначительных токов утечки, меньшие паразитные ёмкости, значительно большее пробивное напряжение. Недостаток — большая сложность создания, так как требуется увеличить число операций, а следовательно, возрастает стоимость.

Выводы. 1. Создание ИМС вызвано необходимостью увеличения надежности, уменьшения габаритных размеров массы, стоимости сложной электронной аппаратуры. 2. ИМС выполняет определенную функцию, имеет высокую плотность размещения элементов. Все элементы ИМС рассматриваются как единое целое. 3. По конструктивно-технологическим признакам ИМС делятся на полупроводниковые, пленочные, гибридные. 4. Изоляция элементов ИМС производится двумя способами: с помощью *PN*-перехода, включенного под обратное напряжение, и с помощью диэлектрической пленки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается принципиальное различие между ИМС и такими же приборами, собранными на дискретных полупроводниковых приборах?
2. Почему надежность ИМС выше, чем у схем на дискретных полупроводниковых приборах?
3. В чем сущность изоляции элементов в ИМС с помощью PN -перехода?
4. В чем заключается основной недостаток изоляции элементов ИМС с помощью PN -перехода, включенного под обратное напряжение?

19.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Основным материалом, на основе которого изготавливают полупроводниковые ИМС, является кремний, так как на его основе можно получить пленку двуокиси кремния с высокими показателями и сравнительно простыми способами.

Кроме того, следует иметь в виду и другие достоинства кремния по сравнению с германием: большая ширина запрещенной зоны, и, следовательно, меньшее влияние температуры, меньшие обратные токи неосновных носителей заряда; меньшая диэлектрическая проницаемость, следовательно, меньшие барьерные емкости при прочих равных условиях.

Для придания кремнию определенного типа проводимости в кристалл вводят донорные и акцепторные примеси, в результате чего в каждой области P - или N -кремния имеются основные и неосновные носители заряда. Движение носителей заряда в полупроводниковых структурах ИМС происходит как обычно: либо в виде диффузии за счет разности концентрации носителей заряда, либо в виде дрейфа под действием сил электрического поля. В образующихся PN -переходах происходят обычные явления, описанные ранее.

Основная технология изготовления полупроводниковых ИМС — планарная. Свойства ИМС во многом определяются технологией их создания.

Методы планарной технологии описаны в гл. 3. Рассмотрим только некоторые особенности ее применения при изготовлении ИМС.

Очистка поверхности. Следует иметь в виду, что любые загрязнения поверхности подложки отрицательно скажутся на свойствах ИМС и ее надежности. Необходимо учитывать и то, что размеры элементов ИМС сопоставимы с малейшей пылинкой. Отсюда и необходимость в самой тщательной очистке поверхности. Очистка производится с помощью органических растворителей, для более тщательной очистки применяют ультразвуковые методы, так как выбрация ускоряет растворение загрязняющих примесей. На заключительном этапе пластины кремния отмывают дегидратированной водой.

Термическое окисление поверхности. Оно проводится для создания на поверхности пластины защитного слоя, предохраняя поверхность от воздействия окружающей среды в процессе создания ИМС. В ИМС, созданных на основе

МДП-транзисторов, полученная путем окисления пленка служит диэлектриком для затвора.

Литирование. Это — введение примесей в чистый кремний для получения переходов с целью создания диодных и транзисторных структур. Есть два способа легирования — с помощью диффузии и внедрением ионов примеси.

В самое последнее время широко используют метод ионного внедрения, благодаря ряду его достоинств, в первую очередь более низким температурам по сравнению с методом диффузии.

Сущность метода заключается во внедрении в пластину чистого кремния примесных ионов, которые занимают места в узлах кристаллической решетки. Ионы примеси создаются, ускоряются, фокусируются и отклоняются в сплошных установках и, попадая на поверхность пластины, бомбардируют ее, внедряясь в кристаллическую структуру решетки. Отклонение производится в магнитном поле. Напомним, что радиус отклонения при этом зависит от массы заряженных частиц. Поэтому если в сфокусированном пучке имеются постоянные ионы, они отклоняются по другим траекториям и отделяются от основного пучка донорной или акцепторной примеси. В этом еще одно достоинство данного метода — высокая чистота примесей.

Фотолитография. Позволяет получить заданное расположение элементов и является одним из наиболее характерных технологических процессов создания ИМС. Напомним, что фотолитография основана на использовании светочувствительных свойств особых материалов, называемых фотогравитами. По мере развития техники ИМС все более существенными становятся недостатки, присущие данному способу: возможности получения минимальных размеров рисунка на фотопластине и механический контакт фотопластина с пластиной полупроводника приводят к искажениям рисунка.

В последнее время разработан метод электронной литографии. В основе его лежит перемещение сфокусированного электронного луча по поверхности пластины, покрытой резистом. Ток луча управляемся напряжением, которое меняется в зависимости от того, на каком участке поверхности находится луч. Если требуется получить окно, ток луча максимален, на тех участках, которые должны оставаться без изменения, ток луча близок к нулю.

Металлизация для создания внутрисхемных соединений в ИМС. Внутрисхемные соединения в ИМС выполняют с помощью тонких металлических пленок, нанесенных на окисле кремния, который является изолятором. Наиболее соответствующим основным требованиям к соединительному элементу для ИМС оказался алюминий, имеющий большую удельную проводимость, отсутствие коррозии, допускающий возможность сварных контактов с внешними выводами.

Создание нужного рельефа металлических соединений происходит методом фотолитографии. На поверхность окиси кремния наносится стеклянная пленка алюминия. Пленку покрывают фотогравитом, над ним располагают фотопластину, а затем вытравливают алюминий, оставляя только полоски, создающие соответствующие контакты со слоями подложки в ранее сделанных окнах, которые были созданы для получения нужной структуры слоев в ИМС.

Анализ основных операций показывает, что все они сводятся к трем основным — термической обработке, химической обработке и фотолитографии. Создание пленки двуокиси кремния, которая

запищает переходы от окружающей среды в процессе создания ИМС, является важным фактором, обеспечивающим стабильность параметров и надежность ИМС.

Изменением рисунка фотошаблона и режима термической обработки можно создавать различные схемы ИМС. Основными структурами для изготовления элементов ИМС являются биполярные и МДП-транзиоры.

ЭЛЕМЕНТЫ ИМС НА БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ

Биполярные транзиоры. В ИМС структура транзиора определяет структуру всех остальных элементов — диодов, конденсаторов, резисторов.

Основным типом биполярного транзиора является *NPN*-транзиор, так как подвижность электронов почти в 2 раза выше подвижности дырок, что повышает частотный предел применения этих транзиоров. Будучи в базе неосновными носителями, электроны гораздо быстрее проходят *P*-базу на пути к коллектору, чем дырки *N*-базу при прочих равных условиях. Повышенная концентрация примеси *N⁺* в эмиттере позволяет получить большой коэффициент передачи тока h_{21B} . В ИМС имеются и *PNP*-транзиоры, например, для создания комплементарных пар.

Одна из конструктивных особенностей биполярного транзиора ИМС, созданного на основе планарной технологии, состоит в том, что эмиттер и коллектор расположены по одному сторону подложки. Вследствие этого создается довольно длинная траектория дрейфования коллекторного тока от эмиттера к коллектору, а с дальнейшим увеличением коллекторного тока и сопротивление коллектора. Большое сопротивление коллектора особенно нежелательно в режиме насыщения, так как приведет к большому падению напряжения на коллекторе. Чтобы уменьшить это сопротивление, достаточно было бы увеличить концентрацию примеси в коллекторе, но это привело бы к сужению *PN*-перехода, уменьшилось бы значение допустимого напряжения на коллекторном переходе, увеличились бы паразитные емкости.

Чтобы устранить нежелательные явления и понизить коллекторное сопротивление, на границе коллектора и подложки создается скрытый слой *N⁺* с большой концентрацией примеси (рис. 19.1). Скрытый слой создается только в тех ИМС, где транзи-

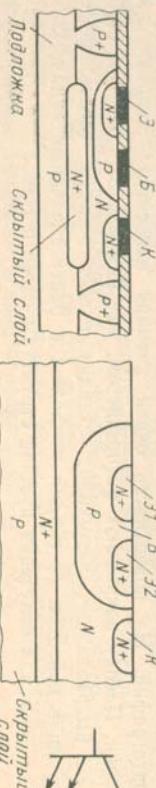


Рис. 19.1. Структура *NPN*-транзиора (а) и его условное обозначение (б)

ры работают в ключевых режимах, в ИМС, которые используются для усиления сигналов транзиора и работают в активном режиме, скрытый слой *N⁺* не требуется.

Рассмотрим биполярный транзиор с изоляцией *PN*-переходом, находящимся под обратным напряжением. Обратите внимание (см. рис. 19.1), что подложка *P*, коллектор *N* и база *P* основного транзиора образуют структуру паразитного транзиора *PNP*. При работе основного транзиора в активном режиме паразитный транзиор работает в режиме отсечки, так как на его коллекторный и эмиттерный переходы подаются обратные напряжения. Тем не менее, как уже указывалось, и в этом случае создается паразитная барьерная емкость коллектор — подложка и течет обратный ток.

При работе основного транзиора в режиме насыщения паразитный транзиор переходит в активный режим работы, так как его переход эмиттер — база, являющийся переходом база — коллектор основного транзиора, открывается. В этом случае подложка *P* будет отводящей часть тока базы основного транзиора, уменьшая ток насыщения основного транзиора.

В транзиорах ИМС с диэлектрической изоляцией все элементы схемы изолируются между собой и от подложки слоем двуокиси кремния. Естественно, что это уменьшает значительно токи утечки по сравнению с обратными токами *PN*-переходов, а также паразитную емкость по сравнению с барьерной емкостью *PN*-перехода. Однако, несмотря на указанные достоинства все же изолюцию *PN*-переходом широко применяют благодаря тому, что ее выполнение при изготовлении ИМС требует меньшего числа технологических операций, чем при изоляции диэлектриком.

Многоэмиттерный транзиор — устройство, которое не имеет дискретного аналога. В нем при наличии одного коллектора и одной базы может быть от двух до пяти — десяти эмиттеров (рис. 19.2). Такие транзиоры нашли применение в логических устройствах. В этих транзиорах есть возможность подключения нескольких входных напряжений при одном выходе для выполнения логических операций. Как видно из рис. 19.2, каждая пара рядом лежащих эмиттеров *N⁺* вместе с разделяющим их слоем базы *P* образует паразитный транзиор *N⁺PN*. Для того чтобы устранить транзиорный эффект в этой структуре, расстояние между эмиттерами должно превышать диффузионную длину носителей в базовом слое. Благодаря этому почти все электроны рекомбинируют в этом базовом слое.

Многоколлекторный транзиор по своей структуре не отличается от многоэмиттерного. При включении многоколлекторного транзиора *N*-область становится эмиттером, а области *N⁺* — коллекторами. Принцип действия как многоэмиттерных, так и многоколлекторных транзиоров не отличается от обычных дискретных транзиоров.

Супербета транзиор — транзиор с очень малой шириной базы (0,2...0,3 мкм). При такой ширине базы вероятность рекомбинации

бинации в ней очень мала, благодаря чему коэффициент усиления тока базы $\beta(h_{21s}) \approx (3 \dots 6) \cdot 10^3$ (сверхкоэффициент бета). Следует отметить, что создание этих транзисторов связано с большими технологическими трудностями. Естественно, что при обратных напряжениях на коллекторный переход более 2 ... 3 В проходит смыкание переходов. Эти транзисторы применяются во входных усилительных каскадах при небольших уровнях сигнала.

Диоды. Для получения диода достаточно создать один PN -переход. Однако практически в ИМС используют для получения диодов транзисторные NPN -структуры, так как это технологически проще, чем специальное формирование отдельных PN -переходов. В зависимости от назначения диода в схеме используется тот или иной PN -переход транзистора. При этом возможны пять вариантов:

- 1) включается эмиттерный переход, коллекторный переход замкнут ($U_{KB} = 0$),
- 2) включается коллекторный переход, эмиттерный переход замкнут ($U_{EB} = 0$),
- 3) включаются оба перехода, но эмиттер соединен с коллектором ($U_J = 0$),
- 4) включается эмиттерный переход, коллекторный переход разомкнут,
- 5) включается коллекторный переход, эмиттерный переход разомкнут.

Естественно, что при включении коллекторного перехода (варианты 2 и 5) достигается высокое напряжение пробоя, свойственное коллекторным переходам. Так как площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, то в этих же вариантах 2 и 5 можно получить гораздо большие прямые токи.

В варианте 3 оба перехода параллельно включены между собой, прямой ток большой, но увеличивается общая емкость переходов.

Варианты 1 и 4 характеризуются малым напряжением пробоя, небольшими допустимыми прямыми токами, но имеют малые обратные токи за счет меньших площадей перехода.

Вариант 1 обладает наименьшим временем переключения, при переходе из открытого состояния в закрытое происходит быстрое рассасывание носителей заряда в тонкой базе.

Резисторы. Для того чтобы не усложнять технологию изготовления ИМС дополнительными операциями для создания резисторов в полупроводниковых ИМС в качестве резистора используют одну из областей транзисторной структуры, полученной в результате нескольких этапов диффузии примесей.

Как известно, основные показатели резистора — это омическое сопротивление, температурный коэффициент, мощность рассеяния.

Эмиттерная область N^+ имеет самую большую концентрацию примеси, за счет чего температурный коэффициент сопротивления достаточно мал, но при этом большая концентрация повышает удельную проводимость, сопротивление этой области мало и, как известно, составляет единицы ом.

Коллекторная область имеет сравнительно небольшую концентрацию, но все же большую, чем базовая область. Поэтому в основном для создания резисторов в полупроводниковых ИМС используется базовая область, которая обеспечивает самое высокое удельное сопротивление из всех областей и вполне приемлемый температурный коэффициент.

Диффузионные резисторы (рис. 19.3) на основе базовой области с сопротивлением до 1 кОм имеют прямоугольную конфигурацию (а), при больших сопротивлениях зигзагообразную (б). При этом максимальное сопротивление составляет до 50 кОм, для получения больших сопротивлений резистор должен занимать на поверхности подложки слишком большую площадь.

Разновидностью базовых диффузионных резисторов являются пинч-резисторы (сжатые резисторы). У них поверх базового слоя методом диффузии наносится эмиттерный слой. Образованный PN -переход включен под обратное напряжение. Так как концентрация примеси в базе значительно меньше, чем в эмиттере, при обратном включении сечение базы значительно уменьшается (сжимается), а удельное сопротивление при этом увеличивается. Максимальное сопротивление пинч-резисторов может достигать 250 ... 300 кОм даже при простой прямолинейной конфигурации и небольшой длине.

Недостатки: разброс номиналов из-за большого влияния на сопротивление малейшего изменения толщины базового слоя, сравнительно большой температурный коэффициент из-за малой концентрации примеси в базовом слое.

Наряду с диффузионными резисторами в настоящее время широкое внедрение резисторы, для образования которых используют ранее рассмотренный метод ионного внедрения. Благодаря применению данной технологии можно получить значительно меньшую толщину базового P -слоя, обеспечить достаточно низкую концентрацию и высокую чистоту примеси, обеспечивает получение больших номиналов сопротивлений и небольшого их разброса.

Конденсаторы. В полупроводниковых ИМС для создания конденсаторов используют обратносмешенные PN -переходы — коллекторный или эмиттерный, либо оба PN -перехода, включенные параллельно. Емкости таких конденсаторов могут быть как постоянными, так и переменными. Основными показателями конденсаторов являются:

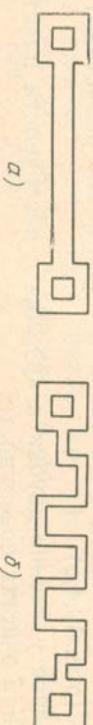


Рис. 19.3. Структура диффузионных резисторов

дленсаторов является: их емкость и допустимое напряжение пробоя.

Емкость конденсаторов, образованных на основе PN -переходов, зависит от приложенного обратного напряжения, степени концентрации примесей, а также от площади перехода.

Емкости образуются в едином технологическом процессе наряду с созданием транзисторов, поэтому концентрация примесей определяется в зависимости от показателей соответствующих транзисторов, которые собраны на этой же подложке. Этим и определяются возможные значения емкости. Таким образом, увеличения емкости добиваются увеличением поверхности PN -перехода и уменьшением приложенного напряжения смещения.

Эмиттерный переход обладает большой емкостью за счет большой концентрации примеси в эмиттере N^+ , но низким допустимым напряжением пробоя.

Коллекторный переход имеет гораздо большее допустимое пробивное напряжение, но удельная емкость его ниже. Так, удельная емкость эмиттерного перехода для типовой структуры ИМС при $U_{обр} = 2$ В составляет $C_{уд} \approx 1000 \text{ пФ/мм}^2$, а $U_{доп\,проб} = 7$ В, $U_{доп\,проб} = 50$ В. Основное достоинство данных конденсаторов в их большой экономичности, благодаря тому, что они создаются в едином технологическом процессе наряду с транзисторами и резисторами.

По сравнению с дискретными конденсаторами, они имеют существенные недостатки: ограниченные параметры (емкости и допустимые обратные напряжения) и необходимость в обратном смещении.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ИМС НА БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ

Анализ основных технологических операций, применяемых при создании ИМС на биполярных структурах, а также основных элементов — транзисторов, диодов, резисторов и конденсаторов, создаваемых на основе этих структур, позволяет рассмотреть последовательность и содержание технологических процессов при создании простейшей ИМС на этих структурах:

1. Пластина кремния P -типа очищается и полируется методом термического окисления.
2. Создается слой двуокиси кремния на поверхности пластины
3. Первая фотолитография для получения окон в слое окиси, чтобы создать скрытый слой N^+ в коллекторных областях транзисторов (рис. 19.4, а).
4. Полное удаление двуокиси кремния с поверхности пластины и повторная очистка поверхности.
5. Нарашивание эпикаксиального слоя N .

6. Снова создается слой двуокиси кремния на поверхности слоя N (рис. 19.4, б).

7. Вторая фотолитография для получения окон с целью проведения диффузии через эти окна.

8. Диффузия акцепторной примеси в слой N , в результате чего участки этого слоя под окнами приобретают P^+ -проводимость. Так создаются коллекторные N^-P^+ -области, изолированные P^+ -областями (рис. 19.4, в).

9. Третья фотолитография для создания окон с целью образования базовых областей.

10. Диффузия акцепторной примеси и образование базовых P -областей (рис. 19.4, г).

11. Четвертая фотолитография для создания эмиттерных N^+ -областей.

12. Диффузия донорной примеси и создание эмиттерных N^+ -областей, а также контактов N^+ к коллекторным N -областям (рис. 19.4, д).

13. Нанесение пленки алюминия для внутрисхемных соединений.

14. Пятая фотолитография для создания нужной схемы соединений.

15. Удаление алюминия с тех участков поверхности, где не должно быть соединений, методом травления (рис. 19.4, е).

ЭЛЕМЕНТЫ ИМС НА МДП-СТРУКТУРАХ

Анализ свойств полевых транзисторов в дискретном исполнении показал их большие преимущества по сравнению с биполярными транзисторами. Естественно, что при создании полупроводниковых ИМС возникло стремление получения их на основе полевых транзисторов.

МДП-транзисторы ИМС. Их изготавливают по планарной технологии, однако при этом технология изготовления МДП-транзисторов

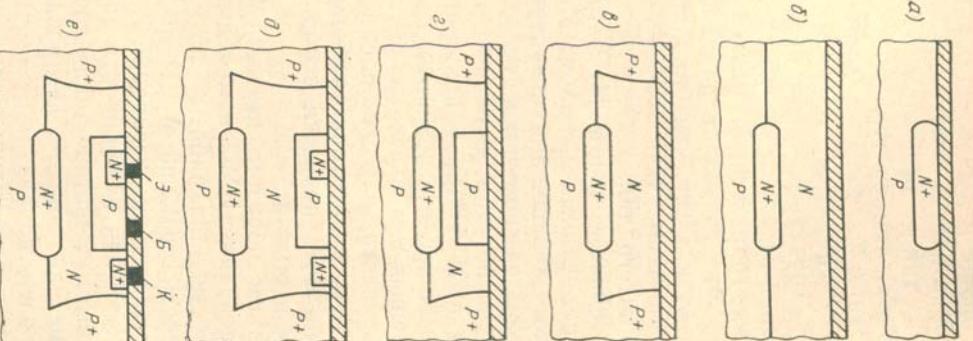


Рис. 19.4. К пояснению последовательности технологических операций по созданию биполярного транзистора ИМС

ров проще и дешевле технологии изготовления биполярных транзисторов как за счет уменьшения числа требуемых при этом операций, так и за счет уменьшения числа операций, связанных с высокими температурами.

Одним из больших достоинств МДП-структур является отсутствие специальных операций для создания изоляций, так как в МДП-структурках такая изоляция не требуется — затворы транзисторов отделены от подложки диэлектриком, истоки и стоки соседних транзисторов разделены обратносмещенными $P-N$ -переходами. Это позволяет размещать МДП-транзисторы гораздо ближе друг к другу, чем биполярные и, следовательно, на той же поверхности получить значительно больше элементов, повысить степень интеграции.

Основным типом МДП-транзисторов ИМС является МДП с индуцированным каналом. Имея большую преимущества по сравнению с биполярной структурой, МДП-транзисторы уступают им в таком важном показателе, как граница частота, связанная с быстродействием. Основные причины, ограничивающие быстродействие МДП-ИМС — наличие паразитной емкости затвор — канал и время пролета основных носителей через канал. Напомним, что у полевых транзисторов нет таких явлений, ограничивающих быстродействие, как накопление и рассеивание неосновных носителей, так как в основе работы полевого транзистора лежит принцип прямого переноса основных носителей по каналу между истоком и стоком.

Таким образом, именно МДП-транзисторы являются основой для создания ИМС с максимальной степенью интеграции. Этому способствовали работы по усовершенствованию МДП-ИМС, в частности, создание МДП-транзисторов с N -каналом вместо преимущественно выпускавшихся ранее МДП-транзисторов с P -каналом (так как подвижность электронов выше подвижности дырок, то и быстродействие таких транзисторов выше), а также применение метода ионного легирования, благодаря которому удалось уменьшить паразитные емкости, а следовательно, паразитные обратные связи, которые увеличиваются при большей скорости движения носителей.

Вторым направлением усовершенствования МДП-транзисторов ИМС является уменьшение напряжения отсечки, т. е. напряжения $U_{\text{зи}}$, при котором $I_c = 0$, что способствует уменьшению рабочих напряжений, а следовательно, и рассеиваемой мощности, и, в свою очередь, создает предпосылки для еще большего увеличения степени интеграции. Этого добиваются применением в качестве затвора слоя поликристаллического кремния вместо металлического алюминиевого затвора. Уменьшение напряжения отсечки в этом случае объясняется тем, что затвор и подложка созданы на основе одного и того же материала — кремния, и поэтому контактная разность потенциалов между ними равна нулю, а следовательно, нет необходимости ее компенсировать, чтобы получить ток в канале.

Другой способ уменьшения порогового напряжения заключается в увеличении удельной емкости затвор — канал, что способствует увеличению крутизны характеристики транзистора, т. е. его управляемого действия, так как чем больше эта емкость, тем больше заряд наводится в канале с помощью напряжения затвора при прочих равных условиях. Замена диэлектрика SiO_2 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,5$ на диэлектрик Si_3N_4 (нитрид кремния) с $\epsilon \approx 7$ и дает возможность получить большую удельную емкость и снизить напряжение отсечки.

МДП-резисторы. В ИМС на основе МДП-транзисторов в качестве резистора используется сам транзистор, т. е. его выходное сопротивление. В этом случае сопротивление резистора зависит от схемы включения транзистора — резистора, от соотношения между напряжением $U_{\text{зи}}$ и $U_{\text{си}}$.

МДП-конденсаторы. В этих конденсаторах использована обычная МДП-структура. Верхняя обкладка — затвор, диэлектрик — двуокись кремния, нижняя обкладка — полупроводник.

Следует отметить специфические особенности МДП-конденсатора по сравнению с конденсатором с двумя металлическими пластины. Наличие полупроводника в качестве одной из обкладок создает зависимость между емкостью МДП-конденсатора и приложенным напряжением, так как в отличие от металла, где заряд сосредоточен на его поверхности, в слое полупроводника под действием приложенного напряжения будет меняться концентрация носителей в слое у поверхности диэлектрика.

Рассмотрим МДП-конденсатор (рис. 19.5) с N -полупроводником в качестве обкладки. Если поданное напряжение имеет плоскость затвора, то возникшее электрическое поле притянет электроны к поверхности диэлектрика, резко повысится концентрация основных носителей в приповерхностном слое, т. е. возникнет режим обогащения. Это позволяет рассматривать полупроводниковую обкладку конденсатора по своим свойствам близкой к металлической и расчет удельной емкости вести по обычной формуле $C_0 = \epsilon/d$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, d — его толщина.

Если приложить напряжение минусом на затворе, возникает режим обеднения, электроны будут отталкиваться от поверхности диэлектрика в глубь полупроводника и под этой поверхностью образуется слой, в котором будут отсутствовать электроны, а рядом положительного знака будет образован неосновными носителями — дырками. Таким образом, в отличие от диффузионных конденсаторов в биполярных структурах, работающих только при одной полярности напряжения смешения, МДП-транзисторы

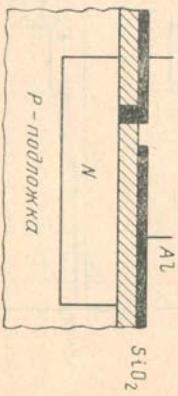


Рис. 19.5. Структура МДП-конденсатора