

Приложение

1. Управляемые конденсаторы (трансформаторы емкости).

По аналогии с транзисторами (трансформатором сопротивлений) выходное сопротивление которых регулируется источником сигнала размещенным во входной цепи предлагается трансформатор емкости - прибор, величина выходной емкости которого регулируется сигналом, поданным на входную емкость.

В отличие от варикапа (варактора), являющегося двухполюсником, управляемая емкость является прибором с тремя выводами. И сфера применения управляемых емкостей по видимому будет превосходить сферу применения варикапов не меньше чем сфера применения транзисторов превосходит сферу применения диодов.

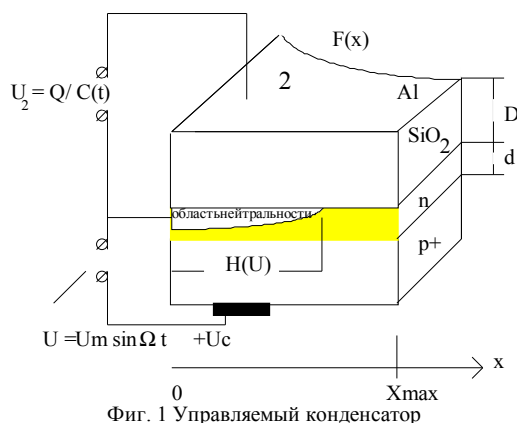
Управляемые емкости (трансформаторы емкостей) позволяют осуществлять усиление и частотное преобразование сигналов и имеют большое преимущество перед транзисторами по уровню передаваемых мощностей т.к. температурные ограничения снижены (емкость не нагревается) и отсутствует электронное ограничение по мощности связанное с пробоем полупроводниковых структур. (приводящее к квадратичному падению мощности п.п. приборов с частотой).

Управляемые емкости могут быть использованы в качестве трансформаторов, легко реализуемых в интегральном исполнении.

Емкостные трансформаторы являются более технологичными и экономичными по сравнению с индуктивными трансформаторами, и могут заменить индуктивные трансформаторы при применении в среднечастотной высокочастотной и СВЧ области.

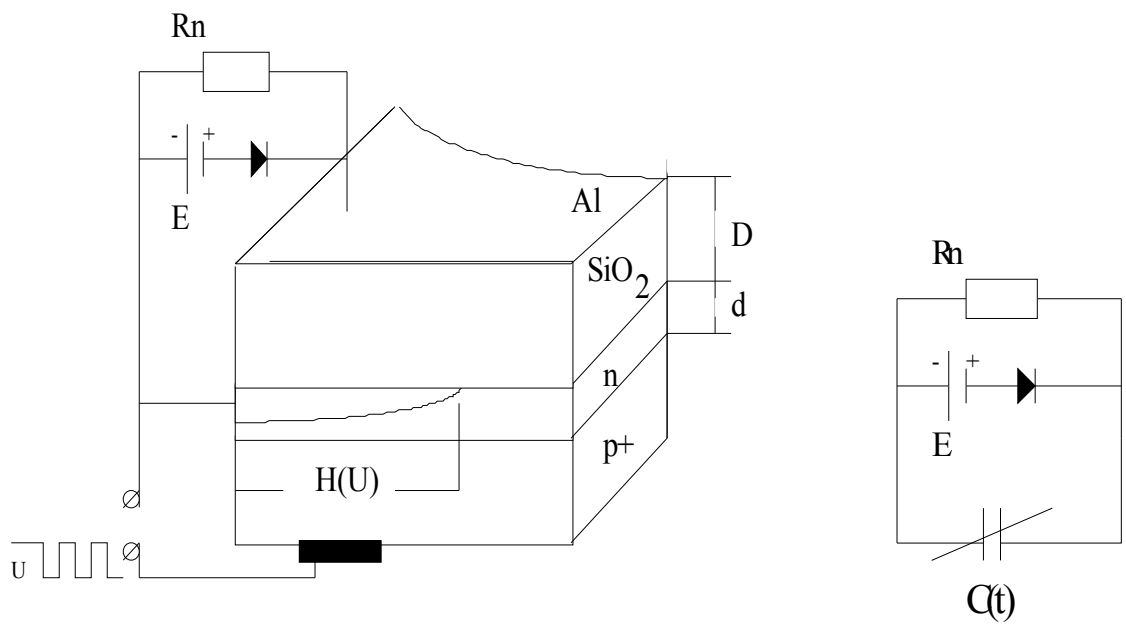
Упрощенный принцип работы управляемого конденсатора на примере управляемого конденсатора, который содержит р-п переход с неоднородным вдоль направления x профилем легирования. На поверхности р-п перехода сформирован слой диэлектрика 1, на поверхности диэлектрика нанесен металлический слой 2 (Фигура 1). р-п переход, содержащий сильнолегированную область p^+ типа с омическим контактом, на которой выполнена пленка n типа с другим омическим контактом. В пленке ($0 \leq x \leq X_{max}$, $0 \leq z \leq F(x)$, $y \leq d$) сформирован неоднородный профиль распределения донорной примеси $N_i(x, y)$, причем степень легирования возрастает от X_{max} к 0. По мере увеличения запирающего напряжения, подаваемого на р-п переход непрерывно уменьшаются размер области нейтральности $H(U)$ и эффективная площадь пластин управляемого конденсатора, образованного между областью нейтральности пленки и металлическим слоем 2.

То есть вместе с барьерной емкостью р-п перехода, на которую подается напряжение по мере изменения напряжения меняется другая емкость (управляемая) на которую напряжение не подается. Если $C(t)$ - зависимость величины управляемой емкости от времени, Q - заряд на управляемой емкости, то напряжение на управляемой емкости $U_2 = Q/C(t)$.



Пример 1. (Идея Максудова А.И.) Емкостной трансформатор с постоянным источником питающего напряжения и диодом (фиг. 1.1)

При подаче запирающего импульса на р-п переход управляемая емкость между металлом и p -областью уменьшается, потенциал на управляемой емкости увеличивается пропорционально ее уменьшению. Вследствие чего диод запирается, а управляемая емкость разряжается через нагрузку.

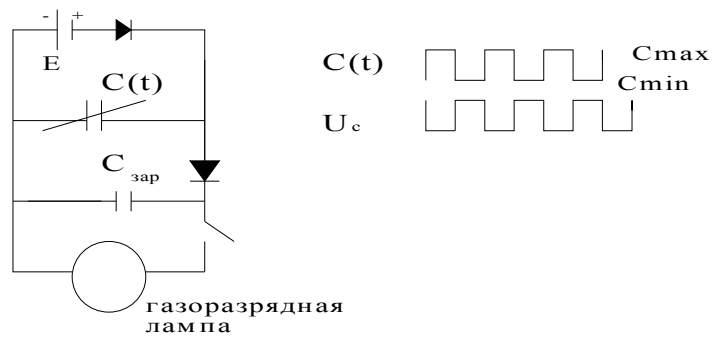


Фиг.1.1. Емкостной трансформатор.

Эквивалентная схема

На управляемой емкости $C(t)$ максимальное напряжение дается соотношением $U_c \approx E \cdot C_{max}/C_{min}$, где C_{max}/C_{min} отношение максимальной величины управляемой емкости к минимальной, E – величина напряжения источника питания.

Пример применения трансформатора в фотовспышке.



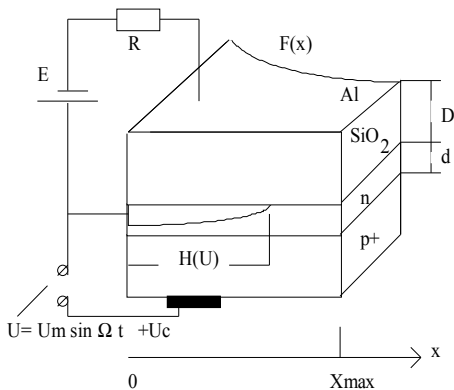
В результате подачи управляющего импульсного напряжения на полупроводниковый переход изменяется импульсно и величина управляемой емкости $C(t)$, что приводит к скачкообразным изменениям управляемой емкости, величина которой изменяется от C_{min} до C_{max} . Вследствие чего, на управляемой емкости напряжение изменяется от величины источника постоянного напряжения E до $E \cdot C_{max}/C_{min}$.

Импульсы напряжения заряжают зарядную емкость ($C_{зар}$) до величины $\approx E \cdot C_{max}/C_{min}$. Разряжаться через источник питания емкости не дает диод. Зарядная емкость разряжается при нажатии кнопки (замыкания ключа) через газоразрядную лампу. Аналогичное устройство нетрудно предложить в качестве альтернативы существующим системам зажигания с индуктивными трансформаторами у двигателей внутреннего сгорания.

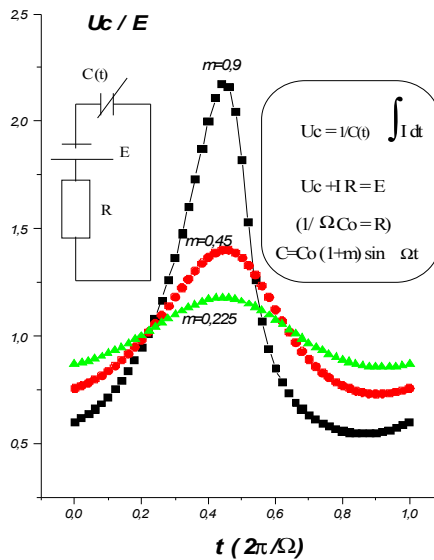
Пример2. Емкостной трансформатор с постоянным источником питающего напряжения.

Изменяется величина емкости между омическим контактом к пленке n-типа и проводящим участком 2 к которым подключен через нагрузку источник питающего напряжения с большим номиналом при помощи относительно небольшого питающего напряжения, поданного на p-n переход (Фигура 2.1). Расчетная зависимость величины напряжения на управляемой емкости от степени ее модуляции представлена на фигуре 2.2.

Источник питания может быть заменен заряженным конденсатором.



Фиг. 2.1. Трансформатор



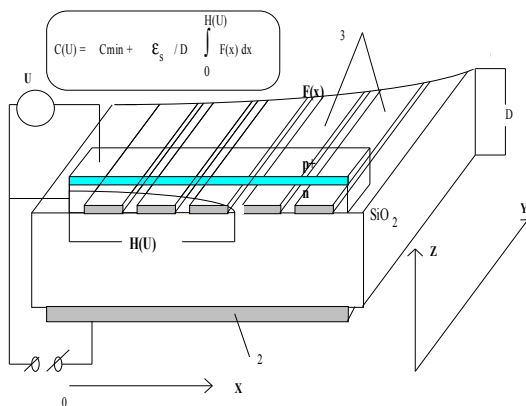
Фиг.2.2. Напряжение на управляемой емкости.

Пример3 . Управляемого конденсатора с любой наперед заданной зависимостью управляемой емкости от напряжения. Прибор содержит p-n переход с неоднородным вдоль направления x профилем легирования. Причем p-n переход, содержащий сильнолегированную область p+ типа с омическим контактом, на которой выполнена пленка n типа с другим омическим контактом выполнен поверх проводящих полосок 3. Проводящие полоски сформированы на поверхности диэлектрика. На другой поверхности диэлектрика сформирован металлический слой 2. (Фигура 3.1). Проводящие полоски выполнены на рабочем участке $(0 \leq x \leq X_{max}, 0 \leq z \leq F(x))$. В пленке ионным легированием создан неоднородный профиль распределения донорной примеси $Ni(x,y)$, причем имплантационная доза возрастает от X_{max} к 0. По мере увеличения запирающего напряжения на переходе область пространственного заряда (ОПЗ) постепенно заполняет рабочий участок пленки, при этом размер области нейтральности $H(U)$ и эффективная площадь пластин управляемого конденсатора, образованного между проводящими полосками 3 и металлическим слоем 2 непрерывно уменьшаются. Для исключения нежелательного влияния емкостной связи между областями 2 и p+ область p-n переход (барьер Шоттки) сформирован над незначительной частью полосок 3. Выбором формы рабочего участка $F(x)$ можно обеспечить необходимую зависимость емкости от напряжения, которая определяется уравнением:

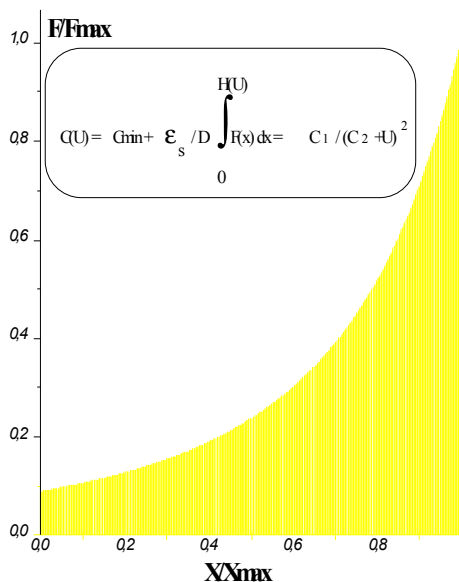
$$C(U) = C_{min} + \epsilon_s / D \int_0^{H(U)} F(x) dx$$

где величина C_{min} определяется размерами омического контакта к пленке n - типа.

На фигуре 3.2 приведена расчетная форма рабочего участка управляемого конденсатора, который в LC контуре может быть использован в качестве идеального частотного модулятора $(C(U)=C_1/(C_2+U)^2)$ при отношении $C_{max}/C_{min}=5$, причем при линейно спадающей вдоль направления x степени легирования n области $(H(U) \sim X_{max} (1-U/U_{max}))$.



Фиг. 3.1 Управляемый конденсатор с задаваемой зависимостью емкости от напряжения.

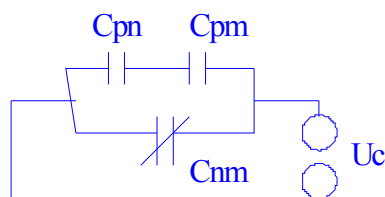


Фиг. 3.2. Расчетная форма полюсок

Теперь кратко остановимся на важном с нашей точки зрения вопросе: почему у управляемых емкостей, в отличие от других полупроводниковых приборов, можно обойти электронное ограничение по мощности? Электронное ограничение по мощности связано с тем, что при приложении напряжения в полупроводниках образуется область пространственного заряда (ОПЗ). Если мы хотим снять максимально большую мощность с полупроводникового прибора, то напряжение на выходной цепи полупроводникового прибора, например в коллекторной цепи биполярного транзистора, должно меняться в максимально возможных пределах. Т.е. необходимо, чтобы за 1 период могла реализоваться ситуация от полного обеднения коллекторной области до полной ее нейтральности. Но скорость насыщения носителей заряда (V_s) позволяет это сделать не быстрее, чем за определенное время. Отсюда следует что эффективная длина выходного элемента полупроводникового прибора (размер ОПЗ полупроводника, на которой падает переменное напряжение), ограничивается величиной порядка V_s/F . Если, например, транзистор имеет длину коллектора больше этого размера, то это приводит только к дополнительным омическим потерям. Максимальное напряжение на нагрузке определяется напряжением пробоя. Максимальная мощность, выделяемая в нагрузку при этом порядка $-(E_s V_s / F)^2 / R$, F - частота, E_s - пробойное поле, R -сопротивление нагрузки. Это и есть электронное ограничение по мощности, справедливое для любых других полупроводниковых приборов.

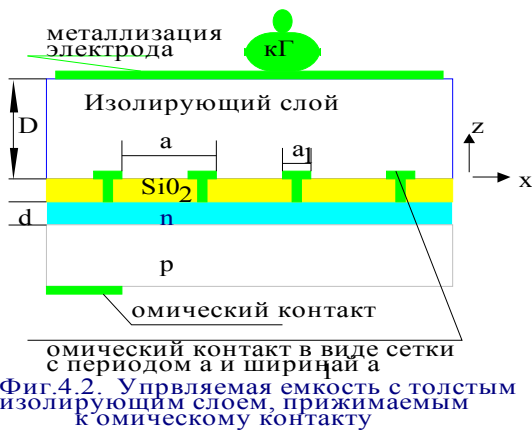
У управляемых емкостей таких ограничений **по выходной** цепи нет, и величина выходной мощности определяется только добротностью системы. И можно мощные низкочастотные сигналы, которые легко реализуются на обычных полупроводниковых приборах, подавая в выходную цепь, преобразовывать в мощные высокочастотные сигналы, что по-нашему мнению, недоступно никакими другими средствами полупроводниковой электроники.

На предлагаемых управляемых конденсаторах могут быть построены генераторы усилители и смесители большой мощности, поскольку нет ограничений присущих другим полупроводниковым приборам (транзисторы, диоды), связанных с пробоем достаточно тонкой области пространственного заряда и нагревом. Однако чтобы на практике воспользоваться этим достоинством следует учитывать что параллельно управляемой емкости всегда включен p-n переход последовательно соединенный с емкостью образованной металлом и подложкой (p+-типа в рассмотренном случае, см. фиг.1). Простейшая эквивалентная схема управляемой емкости приведена на фиг. 4.1, где C_{pn} – емкость p-n перехода, C_{pm} – емкость подложка- металл на изолирующем слое, C_{nm} – емкость n-область- металл на изолирующем слое, U_c - внешнее напряжение на управляемой емкости.



Фиг.4.1. Эквивалентная схема управляемой емкости

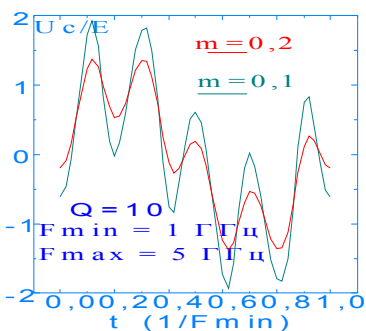
Часть внешнего напряжения сосредоточенная на р-п переходе должна быть меньше напряжения пробоя (U_i): $U_c / (1 + C_{pn}/C_{pm}) < U_i$ или если требуется хорошая развязка между входом (контакты р-п перехода) и выходом (контакт к р-области и металл) часть внешнего напряжения сосредоточенная на р-п переходе должна быть много меньше управляющего напряжения подаваемого на переход: $U_c / (1 + C_{pn}/C_{pm}) \ll U$. То есть почти всегда следует стремиться отношение C_{pn}/C_{pm} делать большим. Что реализуется либо включением параллельно р-п переходу дополнительной емкости либо увеличением толщины изолирующего слоя либо комбинацией того и другого.



Толстые изолирующие слои имеют большое пробойное напряжение и позволяют подавать и снимать с управляемой емкости большую мощность. Создание толстых (>10 мкм) изолирующих слоев для планарной технологии не простая задача, но очень толстые изолирующие слои приводят к непомерному снижению изменения величины управляемой емкости. На фиг. 4.2 приведена конструкция управляемой емкости с сеточным омическим контактом к n-области с периодом a и шириной a₁, и изолирующим слоем. С целью уменьшения сопротивления растекания и увеличения добротности прибора омический контакт к р-области имеет смысл выполнять в виде сетки. Приграничный слой SiO₂ и n-области легирован примесями р-типа. Изолирующий слой выполнен отдельно и прижимается металлизацией электрода к остальной части прибора, выполненной по планарной технологии. Конструкция приводит к снижению коэффициента перекрытия по емкости при относительно больших толщинах изолирующего слоя (Приложение 4).

Пример Расчет управляемой емкости для преобразователя частоты с 1 Гц в 5 Гц мощностью 200 Вт. (при варакторном преобразовании частоты максимальная мощность на два порядка ниже). На р-п переход подается сигнал с частотой $F_{max} - F_{min} = 4$ Гц, на управляемую емкость $F_{min} = 1$ Гц и колебательным контуром выделяется частота $F_{max} + F_{min} = 5$ Гц. Определение параметров управляемой емкости (фиг.4.2).

1. Период сетки (a) удовлетворяет соотношению: $a < V_s / (F_{max} + F_{min}) = 1e5 (м/сек) / 5e9 (Гц) = 20$ мкм. V_s - скорость насыщения электронов в кремнии. Положим $a = 7$ мкм, при $a_1 = 1$ мкм.
2. Изолирующий слой выполняем из кварца (электрическая прочность 10^9 В/м) толщиной 100 мкм., 3. Горизонтальные размеры n-области (a_x) выбираем из условия $a_x = \lambda / 20 = c / 20 F_{max} \epsilon_{отн кв}^{1/2} \approx 1,5$ мм., при этом максимальная емкость равна: $C_{max} = 2\epsilon a_x^2 / D = 1,5 e-12$ Ф.
4. Параметры легирования n-области могут меняться в широких пределах, для определенности положим толщину n-области равной 1 мкм при уровне легирования $6e15$ см⁻³.
5. Найдем максимальное напряжение на управляемой емкости и минимальное значение емкости $C_{//}$, включенной параллельно р-п переходу (из условия, что часть напряжения в цепи управляемой емкости приходящаяся на р-п переход ≈ 1 В.). $U_c = (2 P Q / F_{min} (0,5 C_{max}))^{1/2} \approx 1000$ В при $Q=10, P=200$ Вт., $C_{//}=0,5 C_{max}$
 $U_c / 1В \approx 7,5 e-10$ Ф.



Фиг. 4.3. Зависимость напряжения управляемой емкости от времени при преобразовании частоты в последовательном колебательном контуре

На фиг.4.3 приведена расчетная зависимость напряжения на управляемой емкости от времени в последовательном колебательном контуре при различной степени модуляции управляемой емкости (E – амплитуда низкочастотного сигнала, m-коэфф. модуляции). Более подробно принцип работы и способы практического создания управляемых напряжением конденсаторов представлен в приложении 4.

Возможно, Вы ничего и никогда не узнали бы о новых полупроводниковых приборах. Их просто бы не было. Если бы не помощь оказанная Иоффе В.М. в непростое время, причем без его просьб людьми, вызывающими его уважение и признательность Колесниковым Владимиром Ильичем, Луневым Анатолием Семеновичем, Корневым Александром Георгиевичем, Старцевым Александром Ивановичем и Максutowым Асхатом Ибрагимовичем.