

ВОПРОСЫ СТАБИЛЬНОСТИ И СХЕМНОГО ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРИОДОВ

П. Д. Токарев, М. С. Лурье
(Ленинград)

1. ВОПРОСЫ СТАБИЛЬНОСТИ

Пленочные полевые триоды с изолированным затвором (ППТ) изготавливаются последовательным напылением в вакууме на изолирующую подложку металлических электродов исток-сток, пленки полупроводника, диэлектрика и электрода затвора.

В зависимости от порядка чередования слоев может быть получена так называемая объемная конструкция, когда первыми наносятся электроды исток-сток, а затвор напыляется последним; обратная объемная конструкция — первым наносится затвор; планарная конструкция, прямая или обратная, когда все электроды расположены по одну сторону пленки полупроводника, а последняя осаждается соответственно на подложку или поверх всех электродов.

За исключением принципиального различия между объемной и планарной конструкциями, обусловленного наличием в первой внутренней отрицательной обратной связи, создаваемой участком пленки полупроводника между электродом истока и активной областью — индуцированным каналом проводимости, все перечисленные выше варианты расходятся в основном лишь по возможностям технологии их изготовления. Можно утверждать, что изложенные ниже некоторые положения, связанные с вопросами стабильности ППТ планарной конструкции, остаются справедливыми для всех видов приборов этого класса.

Как показали исследования, наиболее важные для выяснения причин нестабильности ППТ результаты, могут быть получены при работе приборов в области насыщения выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ), т.е. когда ток стока практически не зависит от напряжения на стоке.

В этой области основные параметры ППТ достаточно удовлетворительно следуют уравнениям:

$$I_d = \frac{\mu_3 C_g}{2L^2} (V_g - V_0)^2, \quad (1)$$

$$S = \frac{\mu_3 C_g}{L^2} (V_g - V_0), \quad (2)$$

где I_d - ток стока,

μ_3 - эффективная подвижность носителей тока,

C_g - емкость затвора,

L - длина зазора исток-сток,

V_g - напряжение на затворе,

V_0 - пороговое напряжение,

S - крутизна характеристики.

В свою очередь величина порогового напряжения, определяемая наличием начального заряда в пленке полупроводника, равна

$$V_0 \approx \frac{n_0 q}{C_g}, \quad (3)$$

где n_0 - количество начальных единичных зарядов в области канала,

q - величина единичного заряда.

Наконец, быстродействие ППТ может быть определено из выражения

$$k \Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{S}{C_g}, \quad (4)$$

где k - коэффициент усиления,

Δf - ширина усиливаемой полосы частот.

Как видно из представленных уравнений, изменение главных параметров, а с ними и усилительных свойств приборов, принципиально может вызываться различными факторами.

Проводимые нами, как и рядом других исследователей, работы

показали, что эксплуатационные изменения эффективной подвижности носителей и емкости затвора незначительны, практически необратимы и заканчиваются в период тренировки приборов. Все дальнейшие изменения сводятся к вариации исходной величины порогового напряжения, т.е. связаны с изменением начального заряда в области канала.

Последний определяется с одной стороны наличием и заполненностью ловушек в пленке полупроводника и поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик, а с другой - наличием и характером объемного заряда в диэлектрике и материалом затвора.

Всякое изменение электрических полей, возникающих в приборе под воздействием приложенных к электродам напряжений, способно изменять как заполнение ловушек и поверхностных состояний, так и объемный заряд в диэлектрике. К сожалению, эти процессы бывают достаточно продолжительными, в результате чего изменение тока в приборе после приложения к нему напряжений может не совпадать с законом, представленным уравнением (I).

С формальной точки зрения можно различать два процесса:

- быстрые изменения тока ППТ в первые минуты после включения постоянных напряжений,
- изменения, протекающие в течение десятков и сотен часов непрерывной работы.

Быстрые изменения носят характер релаксационных процессов и полностью обратимы. При этом релаксация тока может быть как положительной, так и отрицательной. Величина релаксационного изменения различна для различных типов приборов и, в зависимости от технологии и режима включения, может составлять от нескольких до сотен процентов к начальному значению тока. Длительные изменения проявляются чаще в постепенно замедляющемся падении тока и крутизны ППТ, хотя при определенных условиях может наблюдаться и рост тока.

Чаще всего после нескольких сотен часов работы наступает стабилизация параметров. Однако даже и в этом случае после выключения приборов на достаточно длительный срок (десяtkи часов), изменения тока после повторного включения снова имеют место.

Обратимость, знак и величина медленных изменений тока, являющихся собственно нестабильностью, определяются в основном качеством исходных материалов и технологией изготовления

ППТ.

Проведенные исследования позволили установить наличие двух основных процессов, вызывающих наблюдаемые изменения порогового напряжения:

1. Процесс захвата электронов на ловушки, приводящий в приборах с n -каналом к уменьшению тока.

2. Процесс изменения (формовки) поверхностного заряда на границе раздела полупроводника и диэлектрика.

Помимо изменения заселенности поверхностных состояний из-за общего изменения концентрации носителей в пленке полупроводника, вызываемого действием поля затвора, процесс формовки может иметь место в случае наличия в диэлектрике объемного заряда.

Последний обуславливается дефектностью структуры диэлектрика, отступлением от стехиометрического состава, наличием примесей и сорбированных паров воды.

Следует указать, что в ППТ дрейф объемного заряда в диэлектрике под действием отпирающего поля затвора независимо от знака этого заряда всегда будет вызывать увеличение тока во времени.

В то же время, если в диэлектрике расположено значительное количество разориентированных молекулярных диполей, то упорядочение их ориентировки под действием поля затвора должно вызвать снижение тока.

Исследованиями установлено, что сорбированная влага вызывает значительное снижение величины порогового напряжения. Такое же действие оказывают пары ряда других материалов, молекулы которых содержат гидроксильную группу "ОН". Очевидно, что пары веществ, молекулы которых содержат две симметрично расположенные группы "ОН" также изменяют первоначальную величину V_0 , но нестабильность под действием напряжения приборов, подвергнутых обработке такими веществами, меньше, чем после воздействия паров воды.

Отмечено также, что для приборов, напыленных без контакта с атмосферой помещения до полного завершения их изготовления, нестабильность заметна, а релаксация тока во много раз меньше, чем для ППТ, подвергавшихся между отдельными операциями воздействию неконтролируемой атмосферы.

В результате проведенных работ созданы лабораторные образцы ППТ, в которых устранены необратимые изменения, приводящие к быстрой гибели приборов, а оставшиеся обратимые нестабильности по величине сравнимы с температурной нестабильностью.

ностью германиевых транзисторов. Срок службы таких приборов измеряется тысячами часов. Имеется надежда на дальнейшее улучшение параметров.

П. ПЕРСПЕКТИВЫ СХЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Современные ППТ, если не усложнять чрезмерно технологию их изготовления, занимая на подложке площадь $1-3 \text{ мм}^2$, имеют крутизну характеристики порядка миллиампер на вольт и межэлектродные емкости, сравнимые с емкостями вакуумных триодов. Они имеют "пентодную" форму выходных ВАХ и способны работать от источников питания с напряжением 10-15 вольт и менее. Входные сопротивления ППТ превышают в хороших образцах 100 мом.

Приборы обладают на $1-2$ порядка большей радиационной стойкостью, чем биполярные транзисторы и в принципе могут работать до значительно более высоких температур.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что до сих пор большинство исследователей уделяли недостаточное внимание изготовлению интегральных схем, содержащих пленочные ППТ, хотя здесь предвидится ряд трудностей.

Основным недостатком ППТ при достигнутом уровне технологии, вероятно, следует считать не долговременную нестабильность, для борьбы с которой имеется ряд проверенных схемотехнических приемов, а наличие переходных релаксационных процессов. Из них наиболее опасными являются положительные релаксации, приводящие к задержке включения приборов в импульсных схемах, в силу чего становится невозможным достижение высокого быстродействия.

Приборы с отрицательными релаксациями, не превышающими 15-20%, могут быть с успехом использованы во многих импульсных схемах и схемах дискретного действия.

В то же время ППТ с положительными релаксациями, обладающие большей крутизной характеристики в установившемся режиме, более выгодны для линейных схем.

Наконец, следует упомянуть равную возможность изготовления ППТ на носителях р и n типа.

Все изложенное выше позволяет наряду с дальнейшими работами по изучению физики явлений и совершенствованию технологии изготовления ППТ рекомендовать разработку пленочных интегральных схем и специальных ППТ для ряда применений.

Среди последних хотелось бы в первую очередь указать на следующие:

1. Логическая ячейка "ИЛИ-НЕ" на 2-3 входа.

В такой ячейке целесообразно в качестве нагрузочного сопротивления также использовать ППТ, включаемый по схеме с общим затвором (рис. 1).

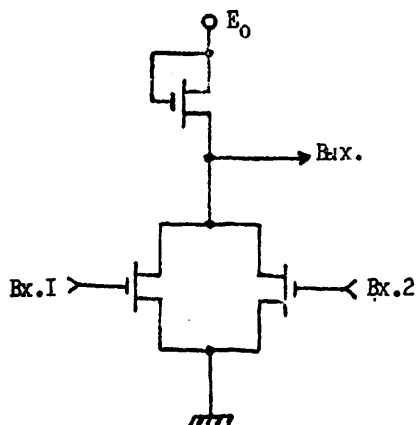


Рис. 1. Ячейка "ИЛИ-НЕ" на два входа

Благодаря подобию процессов, имеющих место в активном и нагрузочном элементах, общая нестабильность и влияние релаксаций в такой ячейке будут значительно меньше чем в каждом из элементов в отдельности.

2. Логический элемент "НЕ" на ППТ с дополнительными каналами. Этот элемент потребляет ток только в момент переключения и, в основном, на перезарядку выходной паразитной емкости. На

базе таких элементов может быть создана, например, схема запоминающей ячейки - триггера (рис.2) с ничтожным потреблением мощности.

3. Входные каскады транзисторных приемников, РС - генераторов, селективных усилителей и т.п. устройств, когда активный элемент должен иметь высокое входное сопротивление. В частности, для резонансных усилителей может быть получен значительный выигрыш за счет использования полной связи ППТ с контуром вместо слабой трансформаторной (автотрансформаторной и т.п.) связи, обуславливаемой токовым характером возбуждения биполярных транзисторов.

Для усилителей радиочастоты, нагружаемых на колебательный контур, может быть рекомендована разработка пленочных полупроводниковых триодов (рис.3), в которых проходная емкость затворосток снижается до значений, характерных для вакуумных пентодов. В то же время в таких конструкциях могут быть получены

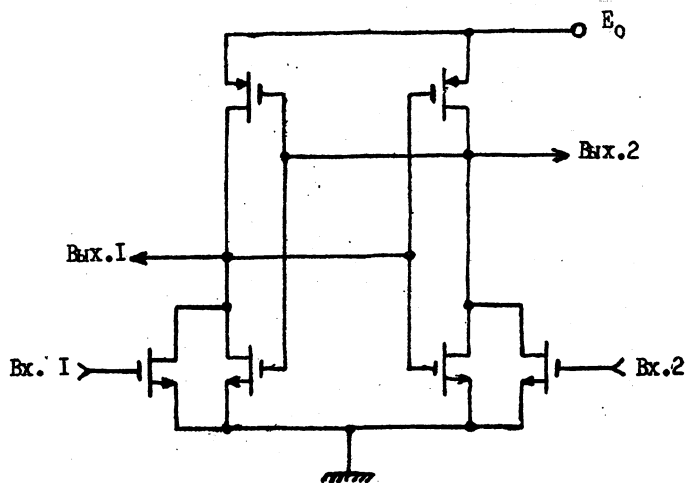


Рис. 2. Запоминающая ячейка на ППТ с каналами
р и п типа

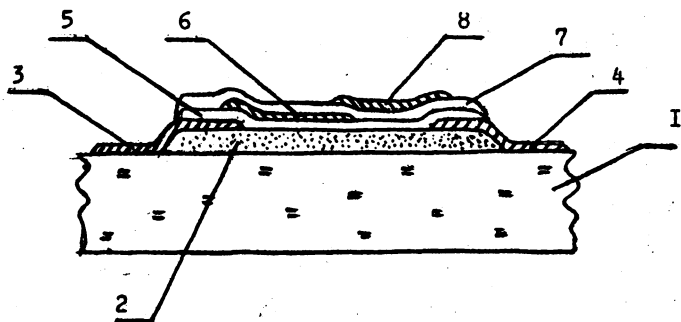


Рис. 3. Пленочный полевой триод

1 - подложка, 2 - пленка полупроводника, 3 - исток,
4 - сток, 5 - первый слой изоляции, 6 - затвор,
7 - второй слой изоляции, 8 - экранирующий электрод.

величины выходных напряжений до 100 вольт и более, что делает возможным их использование в каскадах передающих устройств.

Если говорить о более отдаленных перспективах, то нужно обратить внимание на возможность получения полупроводниковых пленок с подвижностью носителей, превышающей на порядок и более подвижность носителей в кремнии. Это позволит создать ППТ с производением усиления на ширину полосы частот порядка гигагерц и логические ячейки с наносекундной задержкой. Вероятно также, что ППТ с р и n каналом удастся напылять на одной подложке. Это позволит проектировать, например, устройства памяти с ничтожным потреблением мощности и плотностью упаковки до сотен двоичных единиц в одном см². Наконец, следует отметить принципиальную совместимость технологии ППТ с технологией изготовления фотоприемников и люминесцентных конденсаторов, что может оказаться весьма удобным при разработке устройств прямого считывания информации и устройств зрительной индикации, включая так называемый плоский экран.