

А. И. ИЛЬЕНКОВ

(Новосибирск)

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ТОНКОПЛЕНОЧНЫМИ ТРИОДАМИ

Дается краткий обзор основных электрических характеристик тонкопленочных триодов с изолированным затвором и их преимуществ перед триодами с $p-n$ переходом. Приводятся сведения о входной емкости, инерционности, шумах и стабильности параметров триодов.

Рассматривается упрощенная модель механизма работы триода. Обсуждаются перспективы применения тонкопленочных триодов в измерительных устройствах.

С развитием науки и техники к измерительным устройствам предъявляются все более высокие требования по метрологическим характеристикам, надежности и портативности. Измерительная аппаратура на электровакуумных приборах обладает весьма хорошими метрологическими характеристиками, но недостаточно надежна и портативна. Применение обычных полупроводниковых приборов позволяет повысить надежность и уменьшить габариты устройств, но при этом часто возникают затруднения с обеспечением необходимой чувствительности, частотного диапазона и температурной стабильности.

Эти затруднения обусловлены тем, что обычные триоды типа $p-n-p$ или $n-p-n$ по сравнению с электровакуумными приборами имеют меньшее входное сопротивление и большую входную емкость, меньшую граничную частоту и больший коэффициент шумов, меньшую температурную стабильность. Эти недостатки стимулировали разработку новых полупроводниковых приборов, характеристики которых в большей степени приближаются к характеристикам электровакуумных приборов. К их числу относятся полевые полупроводниковые триоды с изолированным затвором, изготавливаемые на основе материалов как в монокристаллической, так и в тонкопленочной поликристаллической форме.

Улучшение метрологических характеристик связано, как правило, с усложнением измерительной аппаратуры, что приводит к увеличению ее габаритов и снижению надежности. Одним из возможных путей разрешения этого противоречия является использование достижений микроэлектроники. К числу новейших разработок в области микроэлектроники относятся тонкопленочные триоды с изолированным затвором, получаемые на основе поликристаллических тонких пленок полупроводниковых материалов.

Оценка перспектив построения измерительных устройств с тонкопленочными триодами представляет несомненный интерес. Ни в отече-

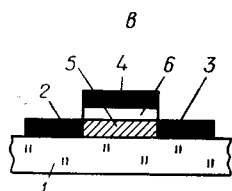
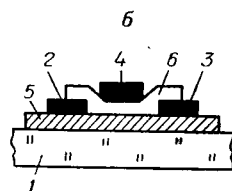
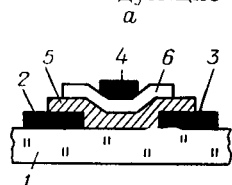
ственной, ни в зарубежной литературе, известной автору, этот вопрос еще не рассматривался. В настоящей статье сделана попытка предварительной оценки возможности применения тонкопленочных триодов с изолированным затвором в измерительной аппаратуре на основе пока немногочисленных сведений об их электрических характеристиках.

Механизм работы тонкопленочного триода

Одна из первых конструкций тонкопленочного триода с изолированным управляющим электродом (затвором), описанная Ваймером [1], схематически изображена на рис. 1, а. На изоляционную пластинку, например стеклянную, испарением в вакууме через маску наносятся полоски золота длиной 1—2 мм, служащие электродами «истока» и «стока». Расстояние между этими электродами, как правило, равно 5—15 мк. Затем наносится слой поликристаллического полупроводника CdS *n*-типа, поверх CdS — слой диэлектрика (SiO или CaF₂) и, наконец, тонкая полоска золота или алюминия (электрод «затвора»), симметричная относительно истока и стока и слегка перекрывающая их. Обычно толщина каждого слоя составляет около 1000 Å.

Полупроводниковые пленки после испарения в вакууме подвергаются термообработке. Вследствие этого нанесение электродов и полупроводниковой пленки проводится в отдельных вакуумных системах. При изготовлении триодов ступенчатой структуры (см. рис. 1, а) изоляционная подложка переносится из одной вакуумной системы в другую и обратно, что несколько усложняет технологию. С этой точки зрения, значительными преимуществами обладает копланарная структура (см. рис. 1, б), в которой все электроды расположены на одной стороне полупроводника [2]. Размеры электродов и расстояния между ними, а также толщина наносимых слоев одинаковы для обеих структур.

Технология изготовления копланарных триодов значительно проще, поскольку после нанесения и обработки полупроводникового слоя все последующие операции выполняются в одной вакуумной системе.



Кроме того, одновременно с нанесением электродов триода можно наносить и слои, образующие пассивные элементы схемы на этой же подложке (сопротивления, конденсаторы, катушки индуктивности и соединения между активными или пассивными элементами).

Для выяснения механизма работы тонкопленочного триода (ТПТ) рассмотрим упрощенную модель, схематически показанную на рис. 1, в. Наблюдаемые характеристики ТПТ являются результатом изменения проводимости «канала» (полупроводника между истоком и стоком). По существу, канал вместе с диэлектриком и электродом затвора образует своеобразный конденсатор, у которого потенциал одной обкладки (канала) изменяется вдоль длины канала, а потенциал другой (затвора) — остается неизменным. Изменение потенциала вдоль канала обусловлено протеканием тока через него.

Рис. 1. Структура тонкопленочного триода:
а — ступенчатая; б — копланарная; в — упрощенная модель; 1 — подложка; 2 — исток; 3 — сток; 4 — затвор; 5 — полупроводник; 6 — диэлектрик.

Рассмотрим сначала случай, когда затвор соединен с заземленным истоком, на сток подается возрастающее положительное напряжение U_c , а полупроводник имеет проводимость n -типа. При подаче небольшого напряжения U_c ток протекает в направлении от стока к истоку, создавая падение напряжения в канале, которое равно нулю вблизи истока и максимально вблизи стока. Поскольку электрод затвора имеет нулевой потенциал, то разность потенциалов на конденсаторе (затвор — диэлектрик — канал) будет наибольшей вблизи стока, причем поверхностный слой канала в этом месте должен иметь максимальный нескомпенсированный положительный заряд. Этот положительный заряд получается в результате уменьшения концентрации основных носителей заряда (в данном случае электронов). При этом в приповерхностной части канала создается «обедненный» слой, сопротивление которого больше, чем сопротивление остальной части канала. В результате общее сопротивление канала возрастает и вольт-амперная характеристика приобретает нелинейный характер (рис. 2).

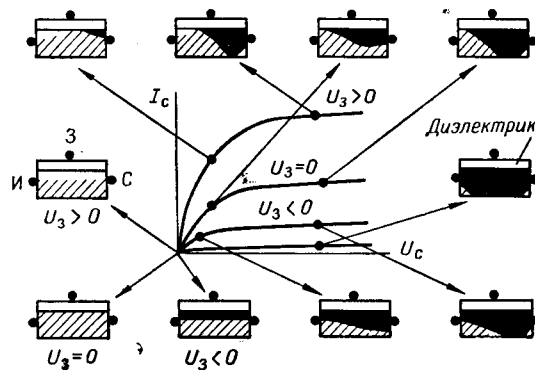


Рис. 2: Характеристики ТПТ и примерное расположение слоев в канале: незаштрихованная часть канала — обогащенный слой; зачерненная часть — обедненный слой; при $U_3 > 0$ — режим обогащения; при $U_3 < 0$ режим обеднения (канал n -типа).

С повышением напряжения стока толщина обедненного слоя возрастает, поскольку увеличивается разность потенциалов на конденсаторе, и сопротивление канала становится еще больше. При некоторой величине U_c обедненный слой вблизи стока распространяется на всю толщину канала, как бы перекрывая его. При дальнейшем повышении U_c ток стока I_c почти не возрастает, поскольку длина перекрытой части канала увеличивается и на ней падает все приращение напряжения. Таким образом, на характеристике имеется ярко выраженный участок насыщения.

Если на затвор подать отрицательное смещение, то даже при отсутствии напряжения на стоке приповерхностный слой канала будет обеднен. Естественно, что в этом случае насыщение наступает при меньших напряжениях на стоке, чем при заземленном затворе, и величина тока насыщения стока будет тоже меньше. Режим работы триода, когда слой канала обедняется под действием напряжения на затворе, принято называть режимом с обеднением.

Если же на затвор подать положительное смещение, то приповерхностный слой канала должен иметь нескомпенсированный отрицательный заряд при отсутствии напряжения на стоке. Этот заряд получается за счет увеличения концентрации электронов. Следовательно, сопротивление приповерхностного слоя будет меньше, чем сопротивление остальной части канала. С увеличением напряжения на стоке концентрация носителей заряда в слое канала уменьшается, особенно вблизи стока. При некотором напряжении U_c обогащенный носителями заряда слой исчезает вблизи стока, а затем появляется обедненный слой, который занимает все большую часть толщины канала по мере повышения U_c . Наконец, наступает перекрытие канала, т. е. насыщение тока стока.

В отличие от предыдущего случая рассмотренный сейчас режим работы триода принято называть режимом с обогащением.

Примерное расположение обедненных и обогащенных слоев в канале при различных напряжениях на стоке и на затворе показано на рис. 2. Необходимо отметить, что описанный механизм работы ТПТ является лишь весьма упрощенной моделью физических процессов, происходящих в ТПТ. Более строго механизм работы ТПТ можно объяснить с привлечением теорий энергетических зон и поверхностных состояний в полупроводниках.

Выше рассмотрен ТПТ, который может работать в режимах как обеднения, так и обогащения. Практически более удобным оказалось изготавливать триоды, работающие только в одном из упомянутых режимов. Триоды, предназначенные для работы в режиме обеднения, должны иметь канал с высокой начальной проводимостью, т. е. при отсутствии напряжений на электродах. В триодах с обогащением начальная проводимость канала мала. Если использовать полупроводник *p*-типа, то для триода с обеднением смещение затвора положительное, а для триода с обогащением — отрицательное.

Основные характеристики ТПТ

Рассмотрим теперь основные электрические характеристики ТПТ, позволяющие оценить перспективы применения ТПТ в измерительных устройствах.

Электрод затвора отделен от остальных электродов ТПТ слоем диэлектрика с большим сопротивлением. Этим объясняется тот факт, что при подаче на затвор как отрицательного, так и положительного смещения ток в его цепи очень мал. Входное сопротивление ТПТ на постоянном токе составляет 10^7 — 10^{12} ом и определяется в основном толщиной и качеством диэлектрика.

При нулевом смещении ток в цепи исток — сток очень мал в случае ТПТ с обогащением (это определяется конструктивными параметрами). При подаче положительного смещения ток увеличивается на несколько порядков. Типичное семейство вольт-амперных характеристик ТПТ с обогащением показано на рис. 3 [3]. При изменении напряжения затвора U_3 на 0,2 в ток стока изменяется на 2 ма, что соответствует крутизне около 10 ма/в. Динамическое выходное сопротивление, определяемое величиной наклона кривых в области насыщения, равно приблизительно 8 ком. Коэффициент усиления по напряжению, являющийся произведением крутизны на выходное сопротивление, равен 80.

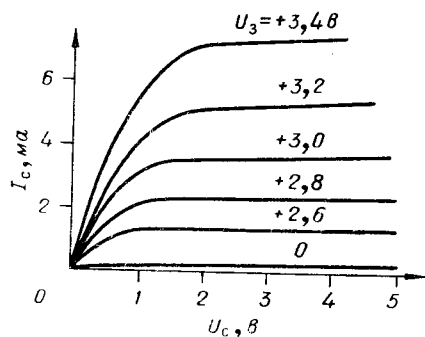


Рис. 3. Характеристики ТПТ с обогащением (CdS).

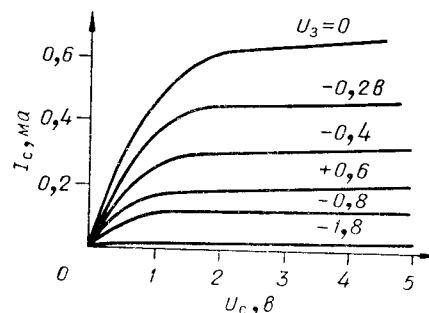


Рис. 4. Характеристики ТПТ с обеднением (CdSe).

В случае ТПТ с обеднением ток в цепи исток — сток при нулевом смещении затвора имеет значительную величину. При подаче отрицательного смещения ток уменьшается тоже на несколько порядков (рис. 4). Для образцов с затвором 5 мм получены значения крутизны до 25 мА/В, а с затвором 2 мм — до 12 мА/В при усилении по напряжению до 150 [4]. Напряжение на затворе, соответствующее появлению тока в цепи исток — сток, зависит от геометрии и технологии изготовления триода; были получены значения этого напряжения от $-2,0$ (режим обеднения) до $+2,4$ В (режим обогащения).

Несомненный практический интерес представляет входная емкость ТПТ, или емкость затвора C_3 . Величина этой емкости зависит от напряжений на затворе и на стоке, поскольку эти напряжения изменяют конфигурацию и толщину обедненного слоя, который является в определенной мере диэлектриком. Следовательно, с изменением напряжений изменяется расстояние между действующими обкладками конденсатора и эффективная диэлектрическая проницаемость получающегося составного диэлектрика.

Зависимость емкости C_3 от напряжения U_3 при различных напряжениях на стоке показана на рис. 5 для триода с обеднением [3]. При $U_c = 0$ емкость с увеличением U_3 плавно возрастает. При больших значениях U_c емкость достигает максимума и затем уменьшается. Наличие максимума характерно для триодов как с обеднением, так и с обогащением; причем максимум всегда наблюдается при таких значениях U_3 , когда ток стока составляет 5—10% тока насыщения. Приведенные кривые получены на частоте 100 кГц; измерения на частотах до 200 кГц показывают небольшое уменьшение емкости.

Поскольку ТПТ является прибором, работа которого зависит только от одного типа носителей заряда, то в нем не происходит явлений накопления и рассасывания носителей при переключении. Скорость переключения полностью определяется постоянной времени емкости затвора C_3 , перезаряжающейся через сопротивление канала. При низкоомном выходе управляющего генератора время переключения может составить, по-видимому, доли наносекунды. В работе [2] приводится измеренное время переключения 30 нсек для тока 2 мА, но не сообщается достаточных сведений о параметрах измерительной цепи и геометрических размерах триода. При работе ТПТ в ключевом режиме ток стока изменяется от 10^{-9} — 10^{-8} до 10^{-3} А при напряжении стока 5—10 В [2].

В обычных триодах с $p-n$ переходами основным источником шумов являются генерационно-рекомбинационные шумы, связанные с потоком неосновных носителей заряда. В тонкопленочных триодах главным источником шумов является тепловой шум. На высоких частотах наличие емкости обратной связи сток — затвор вызывает переход теплового шума в цепь затвора с последующим усилением. Однако полезный сигнал по цепи обратной связи тоже переходит в затвор и усиливается, поэтому отношение сигнал/шум в первом приближении можно считать неизменным. Конкретных сведений о шумах ТПТ в литературе пока нет. Для приближенной количественной оценки шумов ТПТ можно воспользоваться данными о шумах полевых триодов с изолированным затвором, изготавливаемых на основе монокристаллических полупроводников. В [5] сообщается, что были получены шумовые характеристики полевых

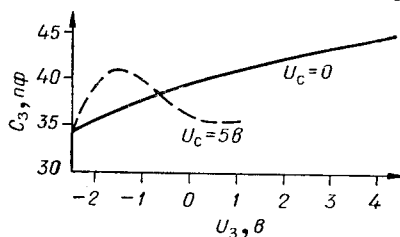


Рис. 5. Зависимость емкости затвора от напряжения на нем.

триодов, сравнимые с характеристиками малошумящих вакуумных ламп на частотах свыше 50 Мгц. Коэффициент шума полевого триода при входном импедансе 1 Мом составляет 0,5 дб, а *p-n-p* триода — 3,0 дб при импедансе 0,1 Мом [6].

Следует отметить, что приведенные выше конкретные значения электрических параметров зависят от геометрических размеров ТПТ и физических свойств полупроводника и диэлектрика. Выражения, описывающие такие зависимости параметров, приводятся в ряде работ, например, в [7, 8].

С точки зрения практического применения еще одной важной характеристикой ТПТ является стабильность параметров во времени при воздействии различных внешних факторов. Сведений о стабильности параметров ТПТ пока еще очень мало. Наибольший интерес представляет работа [9], в которой рассматривается влияние влажности, температуры и электрической нагрузки. Установлено, что параметры незащищенных триодов очень чувствительны к воздействию влаги. В атмосфере сухого аргона при комнатной температуре параметры практически не изменялись в течение шести месяцев. При периодическом изменении температуры от 50 до 120° С в атмосфере сухого аргона крутизна оставалась почти неизменной, имея незначительную тенденцию к повышению. Напряжение затвора при постоянных напряжениях и токе стока увеличивалось только в течение нескольких первых дней, оставаясь затем неизменным. При электрической нагрузке поведение параметров было аналогичным, за исключением того, что увеличение напряжения затвора продолжалось около 20 дней.

Перспективы применения ТПТ в измерительных устройствах

Тонкопленочные триоды обладают весьма привлекательными характеристиками с точки зрения использования их в измерительной аппаратуре. Большое входное сопротивление и малые шумы позволяют создавать высококачественные измерительные устройства. Сообщений о таком применении ТПТ пока еще нет, но для оценки перспектив можно опять взять в качестве примера полевой триод. В [10] описано устройство для измерения токов порядка 10^{-12} а, во входных каскадах которого используются полевые триоды.

ТПТ являются очень маломощными приборами, поэтому они будут применяться в основном во входных устройствах электронной аппаратуры. В последующих каскадах целесообразно использовать обычные полупроводниковые триоды. Такое сочетание имеет определенные преимущества в отношении температурной стабильности, поскольку ТПТ и обычные *p-n-p* триоды имеют разные знаки температурных изменений параметров [10]. Следовательно, появляется возможность создавать измерительную аппаратуру с хорошей температурной стабильностью.

ТПТ с обогащением представляют интерес с точки зрения применения их в микроминиатюрных измерительных цепях, поскольку работа при положительном смещении допускает непосредственную связь между последовательно включенными каскадами. Практическая возможность такой связи между каскадами подтверждается созданием полностью тонкопленочного трехкаскадного усилителя [1]. ТПТ с обеднением найдут применение там, где желательно нулевое смещение (входные каскады, детекторы и др.).

ТПТ могут найти применение и в устройствах логической обработки измерительной информации. В этом случае привлекательной является возможность создания ТПТ, например, с несколькими затворами.

Один такой триод может выполнять функцию либо логической схемы «И», либо «ИЛИ» в зависимости от расположения затворов, причем сопротивление нагрузки может быть составной частью триода [1]. Нет сомнения в том, что будут разработаны конструкции ТПТ, выполняющие более сложные функции логических схем.

Зависимость параметров ТПТ от геометрических размеров позволяет выбирать такую конструкцию триода, параметры которой наиболее соответствуют оптимальным условиям построения измерительной цепи. Создание измерительных устройств на основе сочетания ТПТ с тонкопленочными пассивными элементами обеспечит реализацию преимуществ микроминиатюризации электронной аппаратуры.

Таким образом, рассмотренные специфические особенности ТПТ позволяют сделать вывод, что ТПТ относятся к числу весьма перспективных элементов, предназначенных для построения измерительной аппаратуры высокого качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. K. Weimer. The TFT — a new thin-film transistor.— Proc. IRE, 1962, v. 50, N 6, part 1, p. 1462—1469.
2. P. K. Weimer, F. V. Shallcross, H. Borkan. Coplanar-electrode insulated-gate thin-film transistors.— R. C. A. Rev., 1963, v. 24, N 4, p. 661—675.
3. H. Borkan, P. K. Weimer. An analysis of the characteristics of insulated-gate thin-film transistors.— R. C. A. Rev., 1963, v. 24, N 2, p. 153—165.
4. F. V. Shallcross. Evaluation of cadmium selenide films for use in thin-film transistors.— R. C. A. Rev., 1963, v. 24, N 4, p. 676—687.
5. F. P. Heiman, S. R. Hofstein. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors.— Electronics, 1964, v. 37, N 30, p. 50—61.
6. J. M. Cohen. How to measure FET noise.— Electronics, 1964, v. 37, N 30, p. 62—63.
7. C. Feldman. The future of thin-film active devices.— Electronics, 1964, v. 37, N 4, p. 23—26.
8. W. A. Gutierrez, H. L. Wilson. An analysis of CdS thin-film triode as a current limiter.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1964, v. ED—11, N 10, p. 466—470.
9. K. K. Reinhardt and oth. Aging characteristics of field effect thin-film active devices.— IEEE Trans. on Component Parts, 1964, v. CP—11, N 2, p. 27—33.
10. R. M. Bird. Drift free solid state electrometer amplifier for space flight applications.— Semicond. Prod. and Solid State Technology, 1964, v. 7, N 10, p. 18—24.

*Поступила в редакцию
30 июля 1965 г.*