

61-8
1846

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова-Ленина

Б. В. МАЛИН

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМАНИЕВЫХ
УНИПОЛЯРНЫХ ПРИБОРОВ.

Доклад по опубликованным работам, изобретениям
и научно-техническим отчетам на соискание уче-
ной степени кандидата технических наук.

Научный руководитель к.т.н. доцент

А. В. Краснов

Работа выполнена на предприятии п/я 281

Ленинград - Москва

1961 г.

61-8
1846

Решения исторического XXI съезда КПСС и Постановления правительства ставят перед промышленностью задачи широкого внедрения принципов автоматического регулирования на основе новейших достижений научных разработок, что невозможно при современном уровне техники без широкого внедрения разнообразных полупроводниковых приборов, способных все более широко заменять вакуумные лампы и другие электронные устройства в различных радиотехнических схемах контроля и управления.

В настоящее время разработано и внедрено в производство большое количество самых разнообразных полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, фото катодов и т.д. Исследование различных физических явлений в полупроводниках привели к возможности создания на полупроводниковых материалах типа германия транзисторов, которые по своему принципу действия аналогичны вакуумным усилительным лампам и обладают характеристиками, близкими к вакуумным пентодам. Эти транзисторы получили название униполярных. Эти транзисторы обладают всеми преимуществами вакуумных пентодов, а также имеют малые размеры, вес и экономичны. Униполярные транзисторы обладают высокими входными сопротивлениями и методика расчета радиосхем на них аналогична методике расчета на обычных радиолампах. Поскольку в униполярных транзисторах ток переносится только основными носителями, движущимися в электрическом поле, то время пролета носителей — электронов — мало. В обычных транзисторах ток переносится неосновными носителями, двигавшимися посредством диффузии в области практически свободной от электрических полей и время пролета велико. Время пролета в униполярных транзисторах не ограничивает частотного предела прибора, как это имеет место в обычных транзисторах и униполярные приборы, в принципе, являются более высокочастотными.

Необходимость на перспективность приборов, до настоящего времени опубликована по ограниченное количество работ, посвященных разработке приборов этого типа.



Из этих работ можно упомянуть работы, проведенные в СССР Гениным 1 Зубрицим /1,2/, а за рубежом - Шюкки /3/ и Девеем и Россом /4/. В Советском Союзе не проводилось технологических разработок униполярных транзисторов с целью их промышленного выпуска и разработки технологии, пригодной для серийного производства.

Ввиду широкого распространения вакуумных радиоламп было бы чрезвычайно желательно иметь полупроводниковые приборы, способные непосредственно заменить лампу в схеме. Обычные транзисторы невозможно ставить в схему без коренной ее перестройки, так как обычные транзисторы обладают низкими сопротивлением и являются приборами, построенными на принципе управления током. Вакуумные лампы и униполярные транзисторы работают фактически на одном принципе - принципе управления напряжением, поэтому возможна прямая замена их друг другом в радиосхемах без коренной перестройки схемы. Разница между вакуумными лампами и униполярными транзисторами заключается в том, что в лампе все физические процессы протекают в вакууме, а в униполярном транзисторе физические процессы протекают в объеме полупроводника, как бы замещающего вакуум, что значительно усложняет картину явлений и приводит к ряду побочных эффектов, которые до сего времени не нашли еще четкого отражения в исследованиях. Это приводит к тому, что интерпретация явлений в униполярных приборах во многих случаях значительно затруднена.

Наша задача состояла в разработке конструкций и технологии приборов униполярного типа, с помощью которых удалось бы стабильно получать эффект поля в объеме полупроводника, а также в проверке справедливости предположений, положенных в основу расчета приборов этого типа.

Необходимо было исследовать различные физические явления, протекающие в униполярных приборах. Надо было выяснить влияние различных параметров полу-

проводника на параметры униполярного транзистора и выяснить возможности, преимущества и недостатки этих приборов по сравнению с приборами существующих типов.

В течение 1957-1961 гг. диссертантом проведены разработки ряда типов униполярных полупроводниковых приборов и проведены исследования физических явлений, происходящих в этих приборах, описанные в отчетах по темам: "Термоядерный канальный триод", /8/, "Тарус" /7/ и "Триода /8/, статья: "Униполярный кристаллический триод", Вопросы радиоэлектроники, серия 2, вып. 1, 1960 г., стр. 22-35 /9/, и "Цилиндрическая конструкция униполярного триода" /находится в печати/ /10./ Предложен ряд оригинальных конструкций приборов, на которые выданы авторские свидетельства за №№ 13951 и 19735, /11,12/ а также в работе, зарегистрированной под № 19074 /13/.

Совокупность этих работ является диссертантом на соискание степени кандидата технических наук.

В работе "Термоядерный канальный триод" /8/ изложены основы инженерного расчета параметров униполярного транзистора. По сравнению с сложными расчетами, даваемыми Шюкки /3/, формулы расчета напряжения отечки, крутизны, паразитных участков сопротивления канала, тока насыщения, частотного предела прибор, упрощены и приведены в виду, удобному для практического технического расчета в процессе производства приборов, что достигнуто путем выбора численных коэффициентов, соответствующих применяемому материалу. Это приводит например, формулы зависимости максимальной мощности рассеяния приборов к виду:

$$P = \frac{A^2 d^5}{3 \rho^2 L} \quad \text{по сравнению:} \quad P = C_0^{5/2} (L/a)^{-4} \epsilon^{5/2} E_0^{1/2} \left(\frac{1}{2uK} \right)^{3/2}$$

куда входят непосредственно только параметры, выбираемые в процессе производства прибора /удельное сопротивление, размер дана по ширине и по длине/, что значительно облегчает работу. Численные коэффициенты могут быть табулированы и применяться в процессе производства только по мере изменения технологиче-

слих условий или в процессе изменения требований к прибору. Проверка на практике показала, что такие изменения производятся не чаще одного раза в месяц, что оправдывает упрощение и упрощение этих промышленных расчетов. Проверка упрощенных норм на изготовленных образцах показала, что точность расчета по этим формулам больше, чем получаемая в процессе изготовления образцов в лаборатории и совпадение, например, напряжений отсечки расчетного и экспериментального достигает 5%-10%.

Согласно формулам ток насыщения $I_s = \frac{S \cdot U}{3}$ прибора при выбранном удельном сопротивлении материала 20 ом·см и его геометрических размерах: $L=0,5$ заданных на прибор, должен достигать около 700 мА. На практике полученные экспериментальные данные с расчетом получились хорошие, т.е. этот ток составил 800 мА.

Можно было ожидать, что в отличие от вакуумных ламп, в униполлярном транзисторе можно менять местами катод и анод без ущерба к его работоспособности. Это наблюдалось на практике. Заменяя также, что при этом так называемые могут отключаться в 2-3 раза из-за равной концентрации носителей в p-областях П-П+ переходов в катод и аноде.

Подтверждены обнаруженные другими исследователями /3,4/ явления отрицательного сопротивления управляющего электрода; возникновение колда на контакте анода имеется переход П-П+.

Впервые проведено обследование температурных характеристик приборов и показано, что при температурных -60°C и +60°C изменения тока происходит в одну и ту же сторону в сторону увеличения анодного тока, что объясняется зависимостью проводимости в германии от температуры.

Эквивалентная схема прибора обследована в диапазоне звуковых частот и показано, что в этом случае можно не учитывать влияние различных реактивных элементов /паразитных емкостей и индуктивностей/ и что эквивалентная схема прибора в виде сопротивлений и генератора тока для звуковых частот вы-

дается хорошим приближением. Показано, что прибор имеет практически емкостной вход по управляющему электроду, что подтверждается его импульсными характеристиками заряда-разряда входной емкости через сопротивление канала.

В работе "Исследование возможности создания германиевых униполлярных триодов" /7/ предлагается оригинальная конструкция униполлярного прибора. Отличительной особенностью конструкции от существовавших ранее заключается в том, что отсечка тока канала осуществляется на свободной поверхности германия, а ток канала течет в конструкции радиально от контактно-расположенного катода к аноду. Электрод и управляющий электрод выполнены в виде осевых выпуклых канальцев на противоположных плоскостях диска. Анод представляет собой внешнее периферическое кольцо. Кроме того в данной конструкции оба контакта - катод и анод, - представляют собой П-П+переходы. Преимуществом этой конструкции по сравнению с ранее описанными /см.3,4/ состоит в ее технологичности, так как осуществляется возможным механизировать процесс производства предлагаемой конструкции. На конструкцию, описанную в отчете "Парус" получено авторское свидетельство за № 19951 от 26 января 1959 г. Эта конструкция позволяет получать высокие параметры униполлярного прибора: крутизну до 1,5 мА/В, входное сопротивление не ниже 1 мегаом, выходное сопротивление не ниже 0,5 мегаом /несмотря на то, что отсечение тока канала осуществляется на свободной поверхности полупроводника между катодом и анодом/, частотный диапазон прибора до 100 мГц, и высокие коэффициенты усиления с каскада до 50 раз по напряжению на частотах до 10 мГц.

В процессе создания униполлярного транзистора основной трудностью является создание линейных контактов катода и анода, причем желательно, чтобы контакт анода был слабо индифферентным или совсем не индифферентным. Создание линейных контактов на полупроводнике является достаточно трудной задачей. В

работе показано, что необходимо иметь на контакте катода анода переходы типа П-П+. Эти контакты не являются линейными. Они обеспечивают в приборе сильную эксклюзию, а также большую нелинейность начального участка пентодной характеристики. Для получения таких контактов лучше всего использовать метод диффузии-Римса того же типа, которая входит во вновь исходной пластине германия. Создание катодного и анодного переходов типа П-П+ обеспечивает лучшую температурную стабильность прибора по сравнению с конструкцией с допонициальным четвертым электродом, как это сделано в работе /2/. Кроме того, введенное четвертое электрода усиливает конструкцию прибора. Различия и механизм температурной стабилизации. В предлагаемой конструкции она осуществляется за счет явления эксклюзии, а в литературе /2/ за счет явления экстракции. Явление экстракции захватывает только приконтактные области, в то время как явление эксклюзии распространяется на весь объем канала.

Для получения рабочих областей катода и управляющего электрода в работе применено струйное электрохимическое травление лунки в германии спонной структуры П+П. Скорость травления германия зависит от его удельного сопротивления и тем больше, чем больше концентрация дырок в материале. При травлении спонной структуры наблюдались четко видимая граница между спонем с более низким удельным сопротивлением и спонем с более высоким удельным сопротивлением в виде ступеньки на границе раздела спонев, что можно объяснить получаемым токораспределением тока травления по достижении этой границы. Наличие такой ступеньки позволило ввести оптический контроль глубины травления и фиксировать время достижения границы спон П+П.

Исследовалось локальное электрохимическое травление вокруг контакта катода. При таком локальном травлении при подаче положительного потенциала на катод по отношению к электроду наблюдалась протравливание канавки вокруг катода и образование участка активной области канала, на которой осуществ-

за счет резкого токораспределения в области контакта катода при помещении всего прибора в электролит. Исследовались режимы травления и состав электролита, которые позволяют получать высокое качество поверхности канавки активной области канала. Качество этой поверхности играет существенное значение для характеристик прибора.

Проведено исследование по созданию контроля при электрохимическом локальном травлении вокруг контакта катода. Идея метода состоит в том, что бы остановить процесс травления в момент достижения области протравливаемого заряда управляющего электрода, на который подано расчетное запирающее напряжение. Отмечено, что при достижении области, лежащей близко к области протравливаемого заряда, наблюдается изменение обратного тока управляющего электрода, который плавно увеличивается. Однако четкого контроля таким методом достичь не удалось из-за трудности фиксации момента начала роста обратного тока. Методом с применением контроля были получены образцы приборов, измерения которых показали, что напряжение отсечки этих приборов выше расчетного примерно в 1,5-2 раза. Это объясняется тем, что контроль по изменению поверхности при травлении в электролите не достаточно чувствителен, а также тем, что на границе электролит-германий, вероятно, образуется дополнительный слой большой толщины с интенсивной генерацией дырок, ведущих на реакцию электрохимического растворения германия.

Была обследована методика получения лунки под контакт катода с помощью локального травления плоскости, на которой располагается катод, в электролите. Травление этой плоскости осуществляется тогда, когда на управляющий электрод подается положительное смещение. Дырки на управляющем электроде при большой плотности тока диффундируют к поверхности плоскости катода и в месте контакта электролита при большой концентрации дырок идет более быстрое раство-

ренте терманки, вытравливается пунка, в которую в дальнейшем помещается катод. Методика хороша тем, что не требуется строгих соотношений между, как при обычном струйном травлении. Соосное расположение электродов выполняется уже при выпаривании управляющим электродом, что значительно облегчает процесс изготовления прибора.

Проведенные измерения температурных характеристик анода прибора показали, что с увеличением и уменьшением температуры прибора максимальный ток стока увеличивается, а также несколько возрастает крутизна, что соответствует зависимости удельного сопротивления материала от температуры и от количества армически генерируемых носителей при плюсовой температуре. Исследовалась работа прибора на различных частотах и отмечается, что несмотря на петлюлине характеристики прибор ведет себя качественно вакуумному триоду и основным ограничивающим фактором является проходная емкость управляющей электрод - анод. Это наилучшим образом проявляется при измерении зависимости крутизны прибора от частоты. В литературе появились сообщения /5/, что у приборов униполлярного типа крутизна, якобы, растет с ростом частоты, что объясняется спонтанной конструкцией и физическим принципом работы прибора. Для проверки сообщения проведено исследование этого вопроса. Показано, что наблюдается рост прямой крутизны прибора, но одновременно возрастает и проходная емкость через сетку-анод. Это объясняется влиянием проходной емкости. Если учесть влияние проходной емкости, то зависимость крутизны от частоты является падающей по экспоненциальному закону функцией. Таким образом установлено, что результаты, приведенные в литературе /5/, являются ошибочными и не учитывают влияние проходной емкости.

В статье "Униполлярный кристаллический триод", опубликованной автором в сборнике Вопросы радиоэлектроники, серия 2, полупроводниковые приборы, выпуск 1, 1980 г /9/, проведен анализ работы П-П+ контактов катода и анода

и теоретическое исследование зависимости тока проводимости канала прибора при наличии таких контактов на катоде и аноде. Расчет проводится при допущении, что имеет место в канале движение электронов только под действием поля, пренебрегая их движением под действием градиента концентрации, и имеет место образование в области катода облака пространственного заряда электронов, которое ограничивается в некоторой степени ток канала. Показано, что в случае, когда задана является одномерной, то ток подчиняется закону степени $3/2$ при подвижности носителей, зависящей от поля. Аналогия в законе степени $3/2$ $J = \frac{5}{78\pi} (\frac{5}{3})^{1/2} \mu_0 \epsilon U^{3/2} / W^{5/2}$ с вакуумной лампой наблюдается только когда подвижность электронов в канале переменная. Показано, что при наличии П-П+ контактов в канале прибора наблюдаются также явления эксклюзии и аккумуляции носителей тока, что приводит к уменьшению напряжения отсекания и к более нелинейной зависимости тока анода от напряжения. Яркие эксклюзии связаны с наличием в цепи затвора отрицательного сопротивления. Если эксклюзии очень сильная, то участок отрицательного сопротивления в цепи затвора - очень мал, и исключается возможность самопроизвольных прыжков возникновения генерации прибора в схеме, а также повышается его стабильность работы. В работе описан также разработанный автором прибор со следующими основными параметрами: крутизна 1,5 ма/в, входное сопротивление около 1 мегаом, выходное сопротивление около 0,5 мегаом, диапазон рабочих частот до 25 мГц, мощность рассеяния 50 мвт, ток анода 2-4 ма, напряжения отсежки от 7 до 15 вольт.

В статье "Униполлярный триод цилиндрической конструкции" /находится в печати/ проведен полный расчет цилиндрической конструкции прибора. Показано, что напряжения отсежки получается в два раза ниже, чем в обычных приборах, и что это является следствием цилиндрической формы канала. Зависимость напряжения к потенциала в канале носит более сложный характер, чем в обычных приборах, в зависимости от величины области канала, занятой объемным зарядом.

Выведена аналитическая формула, дающая эту зависимость

$$W = V(b) = \frac{2}{4K} [(a^2 - b^2) + 2b^2 (ln b + ln a)]$$

Расчетная зависимость тока анода от толщины слоя, заряженного пространством над зарядом и показано, что в формуле незначительно отличаются члены и члены четвертой степени, в отличие от криволинейной в литературе формулы [3], выражающих эту зависимость

$$I = \frac{9 \cdot W_0}{L \cdot a^2} \left[\frac{1}{4} (b_k^4 - b_a^4) + b_a^4 b_k \frac{a}{2} - b_k^4 b_k \frac{a}{2} \right]$$

Проведено сравнение рассчитанных в работе формул с измеренными ранее, которое показало, что конструкция цилиндрического типа имеет меньшие абсолютные значения тока анода при размерах поперечных сечений 2а, 2а и кругом с радиусом "а". Проведено сравнение характера зависимости емкости различных конструкций и показано, что в цилиндрической конструкции зависимость емкости от напряжения носит более сложный характер. При расчете численных значений зависимости тока анода от напряжения в канале применен графический метод определения зависимости толщины области, занимаемой пространственным зарядом, в зависимости от напряжения в канале, поскольку эта зависимость имеет логарифмические члены и члены четвертой степени. Применение графического метода позволяет чистые расчеты при построении вольт-амперных характеристик (см. формулу $W = W_0 \left[1 - \frac{b^2}{a^2} (1 - 2bh - 2ha) \right]$).

Проведенное уточнение формул канала показало, что изменение формы канала происходит, в общем, в цилиндрической конструкции более резко, чем в обычных приборах. Изменение и распределение потенциала вдоль канала также носит более резкий характер.

Проведенное исследование эквипотенциальной поверхности анода от точки отсчета и показано, что эта поверхность находится на расстоянии 1,0а - 1,8а от точки отсчета, в то время как у Шекли эта плоскость располагается на расстоянии 1,0-1,1а от точки отсчета. Отсюда можно заключить, что влияние анода в цилиндрической конструкции несколько более ослабленное, чем в других конструкциях приборов.

Разработана технология получения приборов цилиндрической конструкции, заключающаяся в студном электрохимическом травлении цилиндра германия при

вращении цилиндра, и в осаждении из электролита при струйном травлении цилиндра. При этом образуется также поверхность-барьерный управляющий электрод сетки. Отмечено сильное влияние плотности дислокаций в германии на качество цилиндра, получаемого при травлении. Использовались контакты П-П+, Получены приборы с крутизной 0,1 ма/в, анодным током 1,4 ма, напряжением отсечки 50в и рабочей частотой около 22 мГц. Наблюдалось явление экранировки при 4,6в. Обследование полученных экспериментальных цилиндрических приборов показало, что полученные параметры приборов соответствуют расчету. В работе

"Триода" разработана технология, внедренная автором в опытный кехе завода, и по этой технологии /8/ заводом была выпущена опытная партия приборов в количестве около 500 штук. Было проведено обследование этой партии, которое показало, что возможно производство униполярных транзисторов с достаточно высокими характеристиками. Средние характеристики заводской партии: крутизна 0,2-0,3 ма/в, входное сопротивление не ниже 1 мегама, выходное сопротивление не хуже 100 ком, частотный диапазон до 10 мГц. Наилучшие результаты, полученные на заводской партии: крутизна 1 ма/в, входное сопротивление выше 1 мегама, выходное сопротивление выше 0,5 мегама и частотный диапазон до 100 мГц.

В работе "Исследование возможности создания германиевого униполярного триода" /8/ проведено исследование в направлении получения образцов приборов с большим значением крутизны, так как эта характеристика прибора является наиболее существенной. Основным направлением было получение больших периметров каналов с помощью струйного электрохимического травления копел на германии. Кольцевые канавки вытравливались на дисках германия на одной из его плоскостей при вращении диска. Испробован метод выпаления на пластинках со струйной кристаллографической ориентацией /11/ кольцевых управляющих электродов. Выпаление производилось с торца никелевого цилиндра, на который на пипетерного раствора производилось осаждение электрохимическим методом металла-

чаского индия. Диаметр цилиндра определяет периметр канала. Для получения топологии канала, достаточной для перекрытия объемным зарядом, использован метод локального электрохимического травления противоположной стороны диска за счет низкого давления до контролируемого управления электроду в растворе электролита. Таким методом получались также каналы активных областей записывающего канала с хорошим качеством поверхности. Таким методом удалось получить приборы с крутящей до 2 м/в и мощностью рассеяния до 1 ватта.

Проводилась разработка конструкции униполярных приборов различных конфигураций с целью выяснения, как влияет конструкция на параметры прибора. В частности, одним из интересовавшихся вопросов являлся вопрос зависимости крутящего момента от напряжения. Ход крутящего момента определяет работоспособность прибора в различных схемах. Наиболее желательным является линейная зависимость крутящего момента от напряжения с целью применения в усилительных линейных схемах. Сравнение приборов различных конструкций показало, что приборы типа "Парус" и кольцевых конструкций обладают резко нелинейной крутящей с сильной степенью управления с помощью управляющего электрода - сетки. В этом отношении они напоминают лампы "вакьюм" с переменкой крутящей. В некоторых схемах это является весьма желательным. Приборы типа Шокки и цилиндрической и торoidalной конструкции обладают зависимостями крутящей от напряжения близкими к линейной и с меньшей степенью управления. Следовательно, в зависимости от конструкции можно получить те или иные зависимости от прибора характеристики. С этой целью для получения больших крутящих и отличного характера изменения крутящей в зависимости от напряжения проводилось исследование возможности создания торoidalной конструкции с диффузионным управляющим электродом и активной областью канала, полученной методом локального электрохимического травления. Этим методом были получены лабораторные образцы торoidalных конструкций со значительным крутящим до 1,5 м/в.

В работе / 8 / проведены измерения и обследование эксплуатационных

характеристик униполярных транзисторов. Обследование приборов проведено так же в работе 7. Получены следующие результаты. При проведении температурных испытаний двухкаскадного усилителя на униполярных приборах в диапазоне до +90°С коэффициент усиления не менялся до температуры +90°С, а при температуре +90°С падает в два раза. Было проведено испытание приборов в схемах генераторов и опробована стабильность частоты таких генераторов. При изменении напряжения анода частота колебаний меняется на 10^{-4} от относительных величин.

Для улучшения стабильности необходимо уменьшить проводную емкость сетки анода и увеличить крутящую. Использование в резонансных усилителях позволяет работать на частотах до 25-50 мГц с полосой пропускания около 2в мГц. Обеспечение приборов в качестве усилителей низкой частоты показало, что характеристика такого усилителя практически линейна в диапазоне от 50 гц до 15 кГц. В работе "Препарат" было проведено уточнение параметров приборов и их частотных зависимостей к выборки окончательная эквивалентная схема прибора, которая представляет собой емкостного характера входные цепи прибора, которая представляет собой емкость сетки-анод, наличие генератора тока в цепи анода и чисто емкостного характера сопротивления в цепи катод-катод. Был проведен расчет зависимости крутящей прибора от частоты согласно предлагаемой эквивалентной схеме и проведено сравнение с данными полученными из опыта. Показано, что в обоих случаях характер зависимости один и тот же, - крутящая прибора падает с увеличением частоты катод-анодной проходной емкости. Измерение шумовых характеристик приборов показало, что коэффициент шума прибора зависит от режима питания прибора и при оптимальном значении тока через прибор и оптимальном значении крутящего коэффициент шума имеет минимум на характеристике, что соответствует результатам полученным в вакуумных лампах. В области минимума шума режим прибора является наиболее выгодным с точки зрения получения наибольшего усиления от транзисторов. В этом является одно из существенных отличий прибора от обычных транзисторов.

Наиболее важным вопросом, исследовавшимся в работе "Триграда", являлся вопрос верхнего частотного предела униполлярного транзистора. Установлено, что время пролета электронов на участке катод-анод не ограничивает работу прибора. Основным ограничивающим фактором является проходная емкость сетка-анод. С целью доказательства этого положения проводились импульсные измерения прибора в схеме с заземленной сеткой и измерения максимальной частоты генерации униполлярных транзисторов. На опытной заводской партии приборов частота генерации лежит в пределах 10-20 мГц. У лабораторных образцов приборов и у отдельных приборов заводской партии частота генерации достигает 100 мГц. Импульсные измерения показали, что импульс проходит без искажений фронта участок катод-анод, имея завыл менее 0,01 мксек. В случае нечеткой реализации проходной емкости возможно использовать приборы на частотах до 100 мГц. В резонансной схеме усилителя на частоте 50 мГц коэффициент усиления был получен порядка 7. На нагрузках порядка 120 ком можно получить амплитуду усиленного сигнала порядка 7 вольт. На частоте порядка 50 мГц ширина полосы усилителя составляет около 0,1-0,3 мГц.

Описанные результаты по теме "Триграда" зарегистрированы как выполненные и сданы в Госкомиссии Комитетом по делам Изобретений и Открытий при Совете Министров СССР по представлению Госкомитета Совета Министров СССР по радиоэлектронике за № 19074 и внесены в книгу Государственной регистрации с приоритетом 29 июня 1980 г. Цилиндрическая конструкция униполлярного транзистора описана в авторском свидетельстве за № 19788 с приоритетом 13 октября 1958 г.

Результаты проведенных работ

1. Разработана серия униполлярных полупроводниковых приборов оригинальной конструкции с параметрами: крутизна 1,5-2 мА/В, входное сопротивление

порядка 1 мегаом, выходное сопротивление порядка 0,5 мегаом, частотным диапазоном до 100 мГц и мощностью рассеяния от 50 мВт до 1 ватта.

2. Проведено теоретическое обоснование конструкций предлагаемой формы и явлений, происходящих в приборах. Уточнена форма канала по сравнению с данными Шокли в применении к цилиндрической конструкции, уточнен характер распределения потенциалов в канале, положение точки отсечки тока и положение эквипотенциальной плоскости анода и показано, что эквипотенциальные поверхности лежат на расстоянии 1,6-1,8 "а" от точки отсечки, в то время как у Шокли эти расстояния равны 1,0-1,1 "а".

Проведено исследование и расчет явлений на контактах П-П+ катода и анода и показано, что в случае переменной подвижности ток начинает завысываться от напряжения по закону степени 3/2. Проведен инженерный расчет униполлярных приборов, дающий упрощенные формулы расчета основных параметров прибора. Проведено сравнение нормированных крутизны приборов различных конструкций и показано, что разработанные приборы типа "Парус" обладают резкой нелинейностью крутизны. Показано также, что конструкцию прибора надо выбирать в зависимости от желаемого хода крутизны.

3. Проведено экспериментальное исследование разработанных образцов различных конструкций приборов, которое подтвердило теоретические расчеты и наличие физических явлений, предполагаемых в приборе. Подтверждено явление отщипления и показано его влияние на работу прибора. Наблюдается явление отщипления при сопротивлении на анодных характеристиках прибора. Исследованы зависимости крутизны конструкций от напряжения и выявлены конструкции, которые обладают резкой нелинейностью крутизны, а также конструкции, имеющие зависимость, близкую к линейной. Показана возможность усиления на частотах до 100 мГц. Выявлен действительный ход зависимости крутизны от частоты и частотная зависимость параметров прибора. Показано, что основным огра-

начением приборов является наличие проходной емкости сетка-анод. Обозначены шумовые характеристики приборов и показано, что имеется минимальное значение уровня шумов.

4. Разработаны технологические методы производства униполярных приборов и впервые применены для производства этих приборов методы струйного электролитического травления, а также методы травления с вращением образца, методы локального электрохимического травления активной области каната с исследованием возможности установления контроля по обратному току управляющего электрода. Разработаны также технологические методы производства приборов в условиях опытного цеха завода, и выпущена опытная партия приборов в количестве 800 шт.
5. Уточнена система параметров униполярного прибора и показано, что целесообразно принять систему параметров характеристических проводимостей, разработанная уточненная эквивалентная схема прибора и проведено ее сравнение с характеристиками, получаемыми на реальных приборах, причем получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных величин. Разработана лабораторная аппаратура и методы испытания униполярных приборов. Подробно исследовано поведение униполярных приборов в различных усилительных и генераторных схемах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пеня Н.А., Якунина К.В. Физические основы полупроводниковых приборов, сб. Полупроводниковые приборы и их применение. Сов.Радио, вып. 1, стр.48, 1956 г.
2. Л.А.Зубрицкий. Влияние инъекции несбалансированных носителей на входное сопротивление кристаллического канального триода, Известия Вузов МВО-Радио-техника, № 4, 1958 г. стр.44б.
3. В.Шюкли. Униполярный полевой транзистор. Проблемы Современной физики, полупроводниковая электроника, №2, ИЛ.1955 г. стр.151.
4. Дейси и Росс. Униполярный полевой транзистор. Проблемы Современной физики, полупроводниковая электроника, №2, ИЛ.1955 г. стр.175.
5. *Electronique Industrielle* N 19, *Sept-avril 1958*, p.35.
6. Технический отчет "Германиевый канальный триод" п/я 281. 1957 г.
7. Технический отчет по теме "Исследование возможности создания германиевых униполярных триодов", п/я 281, 1958 г. (шифр "Парус")
8. Технический отчет по теме "Исследование возможности создания германиевого униполярного триода", п/я 281, 1959-1960гг. (шифр "Траград").
9. Е.В.Малин. Вопросы радиоэлектроники. сер.2. вып.1.1960 г. стр.22-35. "Униполярный кристаллический триод".
10. Е.В.Малин. "Цилиндрическая конструкция униполярного триода" (находится в печати).
11. Авторское свидетельство № 19951.
12. Авторское свидетельство № 19758.
13. Свидетельство о регистрации № 19074.

8P-15650
03 1961 г.
Акт № 113