

УДК 621.382.33

ПОВЫШЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С АНТИУМНОЖИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ

Гусев В.А., Темнов С.А., Мурзин Д.Г.

Проведен анализ глубины залегания антиумножительного слоя в структуре биполярного транзистора. Результаты анализа и экспериментальных исследований показали возможность повышения предельного напряжения транзистора в схеме с общим эмиттером до напряжения пробоя изолированного коллекторного перехода при сохранении малого напряжения открытого ключа.

Одной из основных проблем современной энергетической электроники является создание мощных транзисторов, способных коммутировать большие напряжения при значительных уровнях тока.

Для увеличения пробивного напряжения транзистора в схеме с общим эмиттером необходима стабилизация электрического поля по границе коллекторного перехода. Впервые прибор с перераспределением коллекторного потенциала был предложен в патенте США [1] – биполярный транзистор с запорным слоем. Транзистор представляет собой прибор с дополнительным слоем противоположной проводимости в коллекторной области. Модернизированный полупроводниковый тетрод эквивалентен каскадно включенным биполярному и полевому транзисторам.

По сравнению с обычным транзистором такой прибор имеет более высокие значения динамического выходного сопротивления, напряжения пробоя при всех уровнях тока и меньшую зависимость коэффициента усиления в схеме с общим эмиттером от напряжения. Наиболее отчетливо преимущества нового прибора проявляются при использовании его в схеме дифференциальных усилителей [2]. Однако подобная конструкция не может быть использована в качестве ключевого транзистора из-за недопустимо большой величины напряжения насыщения.

Для повышения рабочего напряжения и однородности токораспределения в структуре мощного биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером необходимо стабилизировать напряжённость поля в коллекторе непосредственно под эмиттером. Она не должна превышать значения, при котором коэффициент лавинного размножения равен обратной величине коэффициента передачи тока эмиттера. Конструктивно эта цель достигается введением ан-

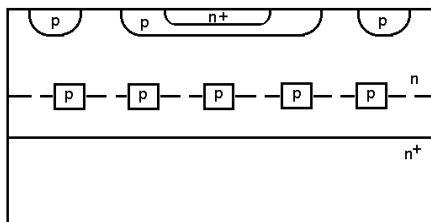


Рисунок 1 – Высоковольтный транзистор с антиумножительным слоем

тиумножительного слоя в квазинейтральную область высокоомного коллектора (рисунок 1). В отличие от известной конструкции антиумножительный слой представляет собой локальные области противоположного типа проводимости с регулярной структурой, расстояние между которыми не превышает удвоенной толщины области пространственного заряда при напряжении переворота тока базы U_{α} , а глубина залегания под коллекторным переходом не превышает толщину области пространственного заряда при этом напряжении. При обратном смещении коллектора антиумножительный слой распределяет напряжение между основным коллекторным переходом и переходом антиумножительный слой – коллекторная область аналогично действию делительных колец в планарных р-п переходах. Введение антиумножительного слоя приводит к увеличению сопротивления коллектора из-за уменьшения его эффективной площади. Однако в связи с тем, что в режиме насыщения проявляется модуляция проводимости коллектора, то это увеличение незначительно.

Глубина залегания антиумножительного слоя может быть определена из пробоя транзистора в схеме с общим эмиттером. Максимально допустимое напряжение U_{α} значительно ниже напряжения пробоя коллекторного перехода $U_{всв}$. Поскольку напряжение переворота фазы базового тока происходит при условии $\alpha M = 1$, то в структуре с антиумножительным слоем необходимо выполнить условие $\alpha M < 1$ за счет перераспределения коллекторного потенциала, где α - коэффициент передачи эмиттерного тока, M - коэффициент лавинного размножения.

При увеличении напряжения коллектора в структуре с антиумножительным слоем напряженность поля в плоскости металлургического р-п перехода растет линейно до напряжения смыкания с антиумножительным слоем. При превышении напряжения этого значения напряженность поля стабилизируется в связи с перераспределением избыточного потенциала между основным переходом и переходом антиумножительный слой-коллектор. При правильном расположении антиумножительного слоя напряженность поля в коллекторном переходе под эмиттером не превысит критического значения, определяемого инжектированными эмиттером носителями заряда.

Оценку максимально допустимого расстояния до антиумножительного слоя проведем из условия лавинного пробоя коллекторного перехода в присутствии динамического заряда инжектированных носителей. Воспользуемся ионизационным интегралом [3] в качестве критерия лавинного пробоя

$$\int_0^{\delta} \alpha_i dx = 1 - \frac{1}{M},$$

где α_i – коэффициент ударной ионизации инжектированных носителей заряда.

На границе коллекторного перехода под эмиттером должно выполняться условие $\alpha \cdot M < 1$.

Поскольку в предельном случае $M = \frac{1}{\alpha}$, $\alpha = \frac{B}{B+1}$, следовательно $1 - \frac{1}{M} = \frac{1}{B+1}$, где B – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером.

С учетом усилительных свойств транзистора условие пробоя транзистора в схеме с общим эмиттером приводится к виду:

$$\int_0^{\delta} \alpha_i dx \leq \frac{1}{B+1}.$$

Используя уравнение Пуассона для коллекторного перехода с равномерным легированием

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qN_C}{\epsilon \epsilon_0},$$

решение для максимального значения поля

$$Em = \frac{qN}{\epsilon \epsilon_0} \delta$$

и аппроксимацию коэффициента ионизации [3] в виде

$$\alpha_i(E) = 1.8 \cdot 10^{-35} \cdot E^7,$$

получаем выражение для определения максимального расстояния до антиумножительного слоя

$$\delta = \left(\frac{4.44 \cdot 10^{35}}{B+1} \right)^{\frac{1}{8}} \cdot \left(\frac{\epsilon \epsilon_0}{qN_C} \right)^{\frac{7}{8}},$$

где ϵ – относительная диэлектрическая постоянная; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; N_C – концентрация примеси в коллекторе.

Зависимость максимального расстояния до антиумножительного слоя от

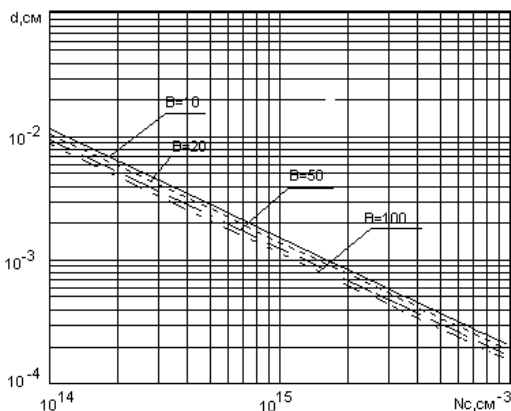


Рисунок 2 – Зависимости максимального расстояния до антиумножительного слоя от концентрации примесей и коэффициента усиления

концентрации примесей в коллекторе при различных значениях коэффициента усиления изображена на рисунке 2.

Из полученных результатов следует, что с увеличением концентрации примеси в коллекторе и для транзисторов с более высоким коэффициентом усиления расстояние до антиумножительного слоя уменьшается.

Для подтверждения полученных результатов были проведены экспериментальные исследования. С этой целью были изготовлены две партии транзисторов с топологией транзистора p^+-n-p^+ - типа 2Т881. Одна из партий была контрольной, вторая содержала антиумножительный слой, залегающий на глубине $7 \cdot 10^{-6}$ м с расстоянием между ячейками сетки антиумножительного слоя, равным $20 \cdot 10^{-6}$ м. Геометрия антиумножительного слоя была выбрана по результатам проведенного анализа для концентрации примеси в коллекторе 10^{15} см^{-3} и $V=100$. Приборы изготавливались по эпитаксиально-планарной технологии. На рисунках 3 и 4 показаны гистограммы распределений предельного напряжения $U_{сео}$ и напряжения насыщения $U_{сeсAT}$ для контрольной (а) и тестовой (б) партий приборов.

Как показали исследования характеристик транзисторов с антиумножительным слоем, среднее значение напряжения насыщения увеличилось на 0,013 В, предельное напряжение в схеме с общим эмиттером увеличи-

а) б)
Рисунок 3 – Гистограммы распределения предельного напряжения $U_{сео}$ для контрольной (а) и
) партии

а) б)
Рисунок 4 – Гистограммы распределения напряжения насыщения для контрольной (а) и
опытной (б) партий приборов

лось примерно в два раза по сравнению с контрольными и достигло значений $U_{\text{всв}}$. При этом устранился участок отрицательного дифференциального сопротивления на выходной вольтамперной характеристике.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что структура транзисторов с антиумножительным слоем значительно повышает предельное рабочее напряжение в схеме с общим эмиттером при практически неизменном остаточном напряжении открытого ключа. Предложенный метод перераспределения потенциала обратно смещенного р-п перехода может быть использован в других приборах, в частности, в приборах с барьером Шоттки.

Библиография

1 Пат. 4972247 США. МКИ⁵ Н 01 L 29/72. Semiconductor device/R.M. Warner (США)/Silicon systems, Inc /США/. — №142269; Заявл. 30.11.64; Оpubл. 20.01.67; НКИ 357-34. — 3 с., 2 л. ил.

2 R. M. Warner, B.L. Grung A bipolar lock-layer transistor // Solid State Electronics. — 1975. — V.18. — № 4. — P. 323 – 325.

3 Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / Пер. с англ.; Под ред. И.В. Грехова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 250 с.

Поступила в редакцию 14.04.2000 г.