

УДК 621.382.33

В.А. Гусев, проф., д-р техн. наук;

Д.Г. Мурзин, ст. преп.; Е.Ю. Владыко, магистр

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОБЛАСТЬ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ОБЪЕМНЫМ ДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ В КОЛЛЕКТОРЕ

Проведен анализ и экспериментальные исследования по расширению области безопасной работы (ОБР) мощных биполярных транзисторов. С этой целью в структуру коллектора биполярного транзистора вводится объемный делительный слой. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение объемного делительного слоя наряду с другими конструктивными методами повышения предельных характеристик, позволяет использовать преимущества каждого из них и получить транзистор с максимальной площадью ОБР.

Современная энергетическая электроника предъявляет высокие требования к полупроводниковым приборам по обеспечению работоспособности в условиях воздействия повышенных электрических и тепловых нагрузок. Повышение надежности электронной аппаратуры предполагает улучшение предельно-допустимых параметров мощных биполярных транзисторов. Одной из важнейших характеристик для них является область безопасной работы (ОБР), в которой транзистор может работать без разрушения или деградации электрических параметров. Расширение этой области является крайне актуальной задачей.

Высоковольтный режим работы транзистора с прямым смещением эмиттера подвержен как тепловой неустойчивости, так и электронному механизму сжатия тока. Этому способствует появление отрицательного дифференциального сопротивления в локальной области за счет лавинного размножения носителей заряда. При этом дополнительный ток будет вызывать дальнейшее шнурование тока в переходе, что приводит к тепловой форме вторичного пробоя. В этой связи в работе [1] был предложен универсальный критерий оценки предельной плотности мощности для ОБР биполярного транзистора, который обусловлен явлением лавинной инжекции. Для кремниевых транзисторов величина предельной плотности мощности составляет 200 кВт/см^2 . Аналогичный подход был использован в работе [2] для оценки предельной плотности мощности в биполярных транзисторах с изолированным затвором IGBT. Проведенный численный двумерный анализ уравнения Пуассона с учетом динамического заряда, при помощи пакета MEDICI показал, что, как и в случае биполярного транзистора, причиной отказа прибора является лавинная инжекция на границе дрейфовой об-

ласти $p-n^+$, которая вызывает неконтролируемое увеличение тока $p-n-p$ транзистора, приводящее к потере управляемости затвором IGBT. Экспериментальное значение критической плотности мощности составило 2000 кВт/см^2 , что на порядок превышает критическую плотность мощности биполярного транзистора. Повышенная устойчивость IGBT к перегрузкам по мощности объясняется квазиравномерным распределением электрического поля в дрейфовой n^- -области вследствие нейтрализации заряда электронов зарядом подвижных дырок сравнимой концентрации.

В биполярном транзисторе подавление заряда подвижных носителей принципиально невозможно. Конструктивной мерой, направленной на снижение вероятности возникновения электрической формы вторичного пробоя в структуре мощного высоковольтного транзистора, может быть введение запасов по электрическим и тепловым параметрам. Целесообразным для этих целей является ограничение физических процессов, приводящих к снижению предельного напряжения коллектора в схеме с общим эмиттером U_a , а также устранение участка отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ, которое является непосредственным признаком неравномерного токораспределения в структуре мощного высоковольтного транзистора, за счет снижения напряженности электрического поля и повышения критической плотности тока коллектора в транзисторной структуре. Повышение однородности распределения поля в переходных процессах при наличии динамического заряда может быть достигнуто с помощью встраивания дополнительной более легированной области коллектора (трехслойный коллектор $p-n-p^-$ -типа), либо введением объемных делительных (антиумножительных) слоев (ОДС) в квазинейтральную область высокоомного коллектора, перераспределяющих внешнее напряжение коллектора между металлургическим $p-n$ переходом и переходом ОДС- p -область коллектора [3].

Объемный делительный 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_a , а глубина залегания под коллекторным переходом не превышает толщину области пространственного заряда при этом напряжении. Область пространственного заряда элементов объемного делительного слоя при оптимальном построении будет модулироваться в зависимости от приложенного внешнего $U_{се}$. При обратном смещении коллектора антиумножительный слой распределяет напряжение между основным коллекторным переходом и переходом антиумножительный слой – коллекторная область, аналогично действию делительных колец в планарных $p-n$ переходах.

Для экспериментального подтверждения расширения ОБР были проведены исследования различных модификаций конструкций биполярного

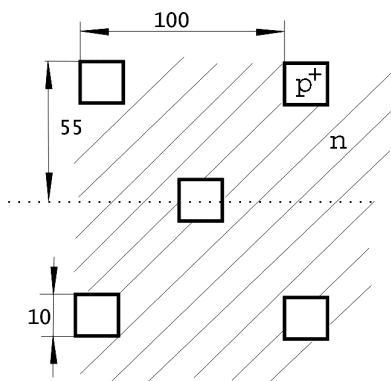


Рисунок 1 – Топология элемента фотошаблона для формирования объемного делительного слоя в виде сетки, размеры приведены в мкм

транзистора на базе кристалла мощного биполярного $n^+ - p - n^+$ транзистора КТ-841.

Основные технические характеристики прибора: $P_{C \max} = 50$ Вт; $U_{BCB} = 600$ В; $U_{CE \text{ отр}} = 350$ В. Приборы изготавливались по эпитаксиально-планарной технологии. Объемный делительный слой был сформирован в виде сплошной сетки ячеек под всей областью структуры размером 10×10 мкм (рисунок 1).

Поперечные разрезы структур транзисторов, используемых в эксперименте, показаны на рисунке 2. Для снижения вероятности «сжатия» тока в процессе включения и выключения

транзистора использовалась конструкция с балластными стабилизирующими резисторами. В этом случае центральная часть эмиттера легирована слабее, чем периферия; таким образом, коэффициент инжекции в центре пренебрежимо мал по сравнению с периферией. Слаболегированная часть здесь играет роль балластного сопротивления, что дает дополнительное по-

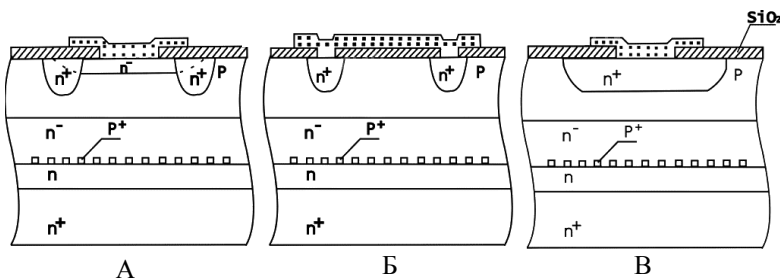


Рисунок 2 – Поперечные разрезы структур транзисторов с объемным делительным слоем используемых в эксперименте: А – с балластными стабилизирующими резисторами; Б – конструкция полого эмиттера; В – обычная конструкция

вышение устойчивости транзистора ко вторичному пробую. Кроме этого, такая конструкция снижает время спада, за счет того, что заряд накапливается вблизи базовых контактов. Вариант «полого» эмиттера, предотвращает накопление заряда в центре его в период выключения.

Результаты измерений значений параметров транзисторов каждого типа, приведены в таблице 1. На рисунках 3 и 4 изображены зависимости тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер и коллектор-база и пря-

мые ОБР в статическом режиме транзисторов с объемным делительным слоем и базового транзистора. Начало вторичного пробоя фиксировалось по моменту образования «горячих пятен» в транзисторе, критерием которого служило значение термочувствительного параметра U_{be} – прямое импульсное падение напряжения на переходе база–эмиттер.

Таблица 1 – Сравнительные результаты измерения параметров транзисторов различной структуры

Тип конструкции	Виды и разброс электрических параметров							
	$U_{cesat},$ В	$U_{besat},$ В	$U_{cesat},$ В	$U_{besat},$ В	$\tau_{вкл},$ мкс	$\tau_{расс},$ мкс	$\tau_{спада},$ мкс	$f_{гр},$ МГц
Без объемного делительного слоя								
А	0,25	0,99	0,45	0,88	0,085	2,2	0,65	20
Б	0,35	1,0	0,55	0,89	0,083	1,3	0,088	20
В	0,37	0,91	0,6	0,89	0,082	1,7	0,15	35
Объемный делительный слой с размером ячейки 10×10 мкм,								
А	0,3	0,9	0,48	0,88	0,085	2,2	1,0	35
Б	0,36	1,0	0,7	0,99	0,085	1,3	0,2	35
В	0,4	1,0	0,72	0,99	0,082	1,7	0,25	40
КТ 841	0,5	1,1	–	–	0,88	2,1	0,35	10
Режимы измерения электрических параметров.	$I_c=5A$ $I_b=1A$	$I_c=5A$ $I_b=1A$	$I_c=6A$ $I_b=0,6A$	$I_c=6A$ $I_b=0,6A$	$U_{ce}=200B,$ $I_c=5A,$ $I_b=1A,$ $Q \geq 100,$ $\tau_{изм}=15мкс$ $I_{b1}-I_{b2}=1A$	То же	То же	$U_{cb}=10B$ $I_e=0,2A$ $f_{изм}=1МГц$

Из данных таблицы 1 следует, что введение объемного делительного слоя в структуру мощного биполярного транзистора не привело к ухудшению основных электрических параметров. Применение конструкции эмиттера с добавочными балластными сопротивлениями в эмиттере и варианта полого эмиттера позволило предотвратить накопления заряда в центре эмиттера и тем самым снизить время рассасывания и время спада в транзисторах с ОДС, т.е. снизить влияние одного из основных недостатков такой конструкции с ОДС.

При анализе ВАХ $I_c(U_c)$ (рисунок 3) видно, что введение объемного делительного слоя в виде сетки позволяет повысить граничное напряжение U_{CEO} до значения U_{BCB} . Наряду с этим, следует отметить отсутствие участка отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ $I_c(U_{CE})$, что

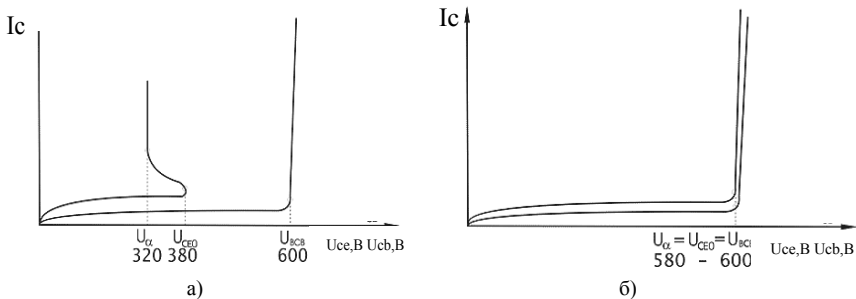


Рисунок 3 – $I_c(U_{CB})$ и $I_c(U_{CE})$ для транзисторов без объемного делительного (а) и с объемным делительным слоем (б)

свидетельствует об устранении одного из инициирующих механизмов неравномерности токораспределения в транзисторной структуре при больших значениях напряжения на коллекторе.

Анализ ОБР различных конструкций транзисторов (рисунок 4) показывает, что введение объемного делительного слоя в структуру транзистора позволяет значительно увеличить площадь ОБР для всех типов конструкций эмиттера.

Для транзисторов без объемного делительного слоя в коллекторе применение конструкции эмиттера с добавочными балластными сопротивления-

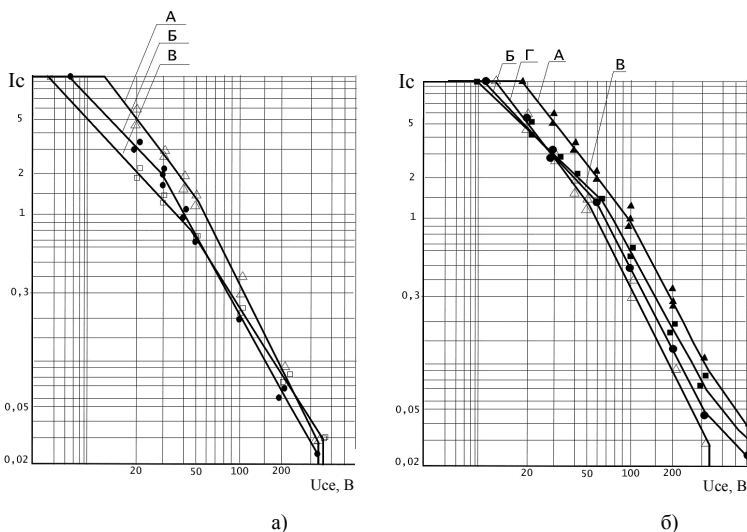


Рисунок 4 – Прямые ОБР в статическом режиме для транзисторов без ОДС (а) и с ОДС (б) при разных типах эмиттеров (А – эмиттер с балластными сопротивлениями; Б – полый эмиттер; В – обычный эмиттер; Г – ОБР транзистора без скрытого слоя с балластными сопротивлениями в эмиттере)

ниями в эмиттере и полого эмиттера также расширяет прямую ОБР. Наибольший эффект у транзисторов достигается при использовании конструкции с эмиттерными балластными сопротивлениями. Применение полого эмиттера позволило увеличить ОБР на участке больших токов и малых напряжений. Это объясняется ослаблением эффекта оттеснения эмиттерного тока к периферии. Балластное сопротивление улучшает однородность распределения тока, что повышает устойчивость транзистора к тепловой форме вторичного пробоя. Введение ОДС в коллекторную структуру позволило еще более расширить ОБР транзисторов в области больших значений напряжения за счет снижения напряженности электрического поля в объеме коллектора. Таким образом, совмещение в одной конструкции с объемным делительным слоем структуры полого эмиттера с балластными сопротивлениями и применение трехслойного коллектора n^+n-p -типа позволяет использовать преимущества каждого из этих элементов и получить транзистор с максимальной площадью ОБР.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что структура транзисторов с ОДС значительно повышает прямую ОБР транзисторов в схеме с общим эмиттером в высоковольтном режиме. При этом применение конструкции полого эмиттера с балластными стабилизирующими резисторами позволило повысить устойчивость к тепловой форме вторичного пробоя, что положительно влияет на расширение ОБР в области больших токов, и, кроме этого, уменьшить сравнительно высокое время рассасывания и время спада в транзисторах с ОДС. С целью улучшения характеристик работы биполярного транзистора с объемным делительным слоем в импульсном режиме дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение времени рассасывания и времени спада путем радиационно-термической обработки структуры.

Библиографический список

1. Porst A. The transistor behavior in a circuit with a shorted load / A. Porst, H. Herberg, G. Miller // IEEE Trans. Ind. Appl. — 1992. — V. 35. — P. 681–686.
2. Hagino H. An experimental and numerical study on the forward biased SOA of IGBT's / H. Hagino, I. Yamashita, A. Uenishi // IEEE Trans. El. Dev. — 1996. — V. 43. — P. 490–499.
3. Гусев В.А. Повышение предельного напряжения биполярного транзистора с антиумножительным слоем / В.А. Гусев, С.А. Темнов, Д.Г. Мурзин // Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2001. — Вып. № 31. — С. 59–63.

Поступила в редакцию 5.02.2004 г.