

УДК 621.382.33

В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук,

Д.Г. Мурзин, ст. преп.

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ПРЕДЕЛЬНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ МОЩНОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Получены выражения для определения максимального динамического блокирующего напряжения мощного биполярного транзистора с трехслойным коллектором.

Применение мощных биполярных транзисторов (МБТ) в мощных аналоговых и импульсных радиоэлектронных устройствах предъявляет повышенные требования к обеспечению области безопасной работы (ОБР) как в квазистатическом, так и динамическом режимах работы. Стационарная ОБР в основном определяется тепловыми свойствами конструкции прибора и увеличением теплового сопротивления с ростом напряжения коллектора, связанным с шнурованием тока эмиттера (коллектора). Динамическая ОБР лимитируется процессом шнурования тока (вторичный пробой (ВП), инициирующим механизм которого может быть тепловая неустойчивость и лавинная инжекция для токовой формы ВП). Выбор оптимальных конструкций для разработки МБТ определяется областью применения транзистора и его требуемыми основными электрическими параметрами; в большинстве случаев требуется компромиссное решение проблемы повышения устойчивости к ВП. В реально работающем транзисторе даже с учетом оптимального подбора известных конструкторско-технологических способов полной равномерности распределения рассеиваемой мощности по всей активной области транзистора достигнуть не удастся. Однако любое удачное техническое решение оправдывается повышением надежности транзисторов и изделий электронной техники на их основе, что в конечном счете сказывается на экономической целесообразности и определяет актуальность исследований, направленных на расширение ОБР как в квазистатическом, так и динамическом режимах работы. **Целью работы** является установление параметров блокирующего слоя коллектора для обеспечения динамической ОБР.

Механизм тепловой неустойчивости развития ВП в основном характерен при переключении транзистора из закрытого состояния в режим насыщения или активный режим работы. Лавинная инжекция инициирует ВП при переключении транзистора из открытого состояния в режим отсечки [1]. При выключении МБТ из режима насыщения обратным током базы процессы, происходящие в нем, имеют двумерный характер. Обратное смещение запирает внешнюю часть эмиттера, относительно базового контакта, в то время как центральная часть продолжает поддерживать ток коллектора в переходном режиме.

В результате эффективная площадь, через протекания тока уменьшается, увеличивается плотность тока, которая на порядок может превосходить плотность тока в активном режиме. Высокая плотность тока вытесняет поле к границе $n-p^+$ коллектора, на которой оно достигает значений $(1...4) \cdot 10^5$ В/см, достаточных для лавинной инжекции и поддержания локально открытой области эмиттера. При достижении значения $E_{кр}$ начинается лавинная инжекция, которая инициирует токовую форму ВП [2]. Повышенная концентрация дырок ($n-p-n$) приводит к увеличению обратного тока базы и дальнейшему сжатию тока коллектора, что в итоге приводит к катастрофическому отказу. В результате отказывают приборы, имеющие высокие пробивные напряжения в квазистатическом режиме, но низкое динамическое блокирующее напряжение коллектора в переходном режиме. В процессе шнурования тока его плотность возрастает с увеличением амплитуды, а также с уменьшением фронта внешнего запирающего базового тока. Такой режим деградации характерен для коллекторных нагрузок с индуктивным импедансом, поддерживающим в течение переходного процесса ток открытого ключа. Для установления связи между максимальным динамическим напряжением, параметрами структуры и режимом работы транзистора в ключевой схеме первоначально рассмотрим прибор с двухслойным коллектором (рисунок 1).

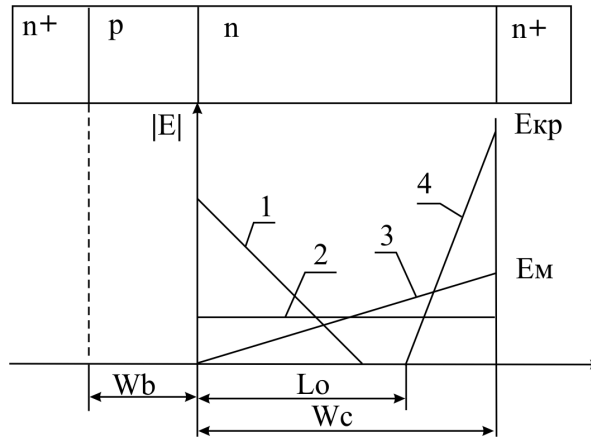


Рисунок 1 — Структура транзистора с двухслойным коллектором и распределение поля в нем: 1 — $j_c < j_k$, 2 — $j_c = j_k$, 3 — $j_c = j_{ko}$, 4 — $j_c > j_{ko}$

В транзисторах с диффузионным коллектором динамическая ОБР транзистора лучше, чем у транзисторов с коллектором, созданном с помощью эпитаксиальных слоев. Однако диффузионный процесс длителен и слабо воспроизводим по толщинам, а коллектор, сформированный диффузией примеси обладает большим омическим сопротивлением и, следовательно, большим падением напряжения на открытом ключе. Эпитаксиальные транзисторы в динамической области менее устойчивы, так как с ростом плотности тока начинается перераспределение поля в коллекторе.

Зависимость потенциала и напряженности электрического поля от координаты может быть определена из решения уравнения Пуассона с учетом динамического заряда

$$\frac{d^2 U}{d^2 X} = -\frac{q}{\epsilon} \cdot \left(N_c - \frac{j_c}{q \cdot V} \right),$$

где, $\epsilon = \epsilon_{si} \cdot \epsilon_o$. ϵ_o — абсолютная диэлектрическая проницаемость. q — заряд электрона. j_c — плотность тока коллектора. V — дрейфовая скорость электронов. N_c — уровень легирования коллектора.

Откуда следует

$$\frac{dU}{dX} = -\frac{q}{\epsilon} \left(N_c - \frac{j_c}{q \cdot V} \right) \cdot X + C, \quad (1)$$

где, C — постоянная интегрирования.

Рассмотрим решение уравнения Пуассона для разных значений j_c . Случай первый: $j_c < j_k$, $j_k = q \cdot N_c \cdot V$ — ток Кирка. Подставляя граничное условие $E(0) = E_m$, получаем:

$$\frac{dU}{dX} = -\frac{q}{\epsilon} \left(N_c - \frac{j_c}{q \cdot V} \right) \cdot X + E_m.$$

Интегрируя это выражение в пределах от 0 до W_c , находим

$$U = E_m \cdot W_c - \frac{1}{2 \cdot \epsilon \cdot V} (j_k - j_c) \cdot W_c^2.$$

При наступлении лавинного размножения напряженность поля достигает критического значения $E(0) = E_{кр}$. В этом диапазоне токов напряжение, при котором транзистор входит в токовую форму ВП, возрастает линейно до значений $E_{кр} \cdot W_c$ с ростом плотности тока вплоть до тока Кирка.

При превышении значения $j_c > j_k$ подставляя другие граничные условия $E(W_c) = E_m$, $E(0) = E$ и интегрируя в пределах от 0 до W_c , можно получить следующее соотношение:

$$U = E_m \cdot W_c - \frac{1}{2 \cdot \epsilon \cdot V} (j_c - j_k) \cdot W_c^2.$$

Из этого выражения видно, что при таких плотностях тока градиент поля меняет знак (кривые 3,4, рисунок 2), т.е. поле начинает перераспределяться. При этом следует линейное уменьшение допустимого напряжения на коллекторе с ростом плотности тока вплоть до величины, равной

$$U_M = \frac{E_{кр} \cdot W_c}{2}.$$

Начиная с этого момента, динамическая ОБР становится меньше статической и ограничивает допустимое значение напряжения коллектора. В случае, когда $E(0) = 0$ $E(w) = E_m$, а $U_c = \frac{E_M W_c}{2}$ (кривая 3,

рисунок 2) можно определить характеристическую величину плотности тока $j_{ko} = qNV + \frac{2U_c \epsilon V}{W_c^2}$, превышение которой приводит к расширению квазинейтральной базы (эффекта Кирка).

Рассмотрим случай, когда $j_c > j_{ko}$. При этом граничными условиями будут $E(L) = 0$, $E(W_c) = E_m$. Подставив их в выражение (1) и проведя интегрирование получим, что при достижении значений плотности тока выше j_{ko} происходит расширение квазинейтральной базы в коллектор на величину Lo

$$Lo = W_c \left[1 - \sqrt{\frac{j_{ko} - j_k}{j_c - j_k}} \right].$$

Дважды проинтегрировав уравнение Пуассона для случая $j_c > j_{ko}$ получим:

$$U = \frac{E_w(W_c - Lo)}{2}.$$

Следовательно, максимально допустимое напряжение при выключении транзистора определяется выражением

$$U_{MAX} = \frac{E_{kp}^2}{2} \cdot \frac{\epsilon V}{j_c - j_{k1}}.$$

При этих плотностях тока U_{MAX} не обеспечивается толщиной $W_c > \delta(U_{BCB})$. Из этого выражения следует, что динамическое предельное напряжение обратно пропорционально плотности тока коллектора, и для транзисторов с двухслойным коллектором при плотности тока $j_c > j_{ko}$ максимально допустимое значение напряжения при запираии становится меньше допустимого блокирующего напряжения U_{CEO} в стационарном режиме отсечки. При плотности тока коллектора выше j_{ko} блокирующее напряжение высокоомной области уже не определяется толщиной W_c и гиперболически падает с ростом тока.

Для повышения блокирующей способности транзисторов встраивают дополнительный n-слой толщиной H с большим уровнем легирования, который блокирует напряжение при высоких плотностях тока (трехслойный коллектор)[1] и обеспечивает на плотностях тока порядка j_{k2} добавку в блокирующем напряжении $E_{kp} \cdot H$. Если эта добавка соизмерима с предельным напряжением U_{CEM} , переходной процесс не будет сказываться на предельных характеристиках МБТ.

Структура и распределение поля в транзисторе с трехслойным коллектором изображена на рисунке 2.

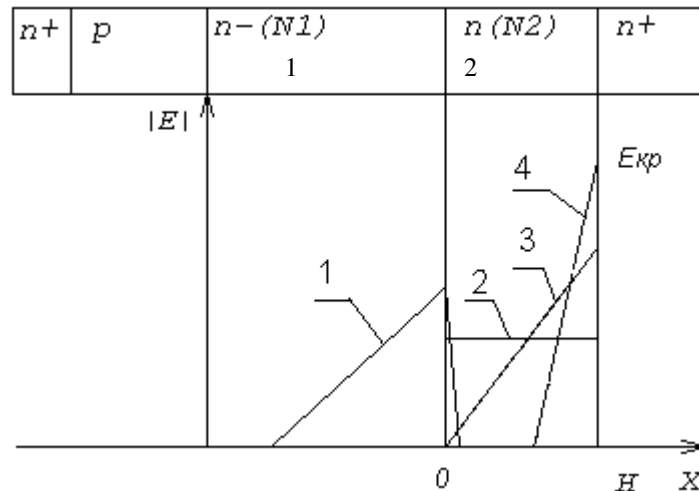


Рисунок 2 — Структура и распределение поля в трехслойном коллекторе:
1 — ($j_c > j_{ko1}$); 2 — ($j_c = j_{ko2}$); 3 — ($j_c = j_{ko2}$); 4 — ($j_c > j_{ko2}$)

Как видно из рисунка 2, вместо переходной области диффузионного коллектора в эпитаксиальном присутствует слой H , в котором концентрация выше, чем в области n^- .

Зависимость предельного напряжения от тока коллектора для данного случая находим из решения уравнения Пуассона

$$\frac{d^2 U_1}{dX^2} = -\frac{q}{\epsilon} \left(N1 - \frac{j_c}{qV} \right); \quad \frac{d^2 U_2}{dX^2} = -\frac{q}{\epsilon} \left(N2 - \frac{j_c}{qV} \right)$$

где $U_c = U_1 + U_2$.

Решив эти уравнения для случай, когда $j_{ko1} < j_c \leq j_{ko2}$ получим суммарное напряжение блокируемое коллектором:

$$U_{cem} = U_1 + U_2 = \frac{Em^2}{2} \frac{\epsilon V}{j_c - j_{k1}} + EmH - \frac{j_{k2} - j_c}{2\epsilon V} H^2. \quad (2)$$

При плотности тока коллектора выше j_{k02} суммарное блокирующее напряжение высокоомной коллектора становится равным:

$$U_{cem} = \frac{Em^2}{2} \frac{\epsilon V}{j_c - j_{k2}}.$$

Анализ (2) показывает, что U_{cem} является экстремальной функцией плотности тока и имеет минимум при

$$j_c \min = j_{k1} + \frac{\epsilon V E_{kp}}{H}. \quad (3)$$

При такой плотности тока (3)

$$U_{cem} = 2E_{kp}H - \frac{q}{2\epsilon V} (j_{k2} - j_{k1})H^2. \quad (4)$$

В свою очередь, U_{cem} (4) имеет максимум при

$$H_{opt} = \frac{2\epsilon V Em}{j_{k2} - j_{k1}}; U_{ce \min}^{\max} = H_{opt} E_{kp}. \quad (5)$$

Подставив значение H_{opt} в (2) получим $j_c \min = \frac{1}{2} (j_{k2} + j_{k1})$.

Если подставить это значение в общее уравнение для U_{cem} (1), то получим

$$U_{cem}(j_c \min) = H_{opt} E_{kp}.$$

Следовательно, несмотря на то, что в некотором диапазоне $j_c > j_c \min$ U_{cem} будет иметь более высокое значение, токовая форма ВП будет развиваться при более низком напряжении U_{CEmin} . Так, при $j_c = j_{k2}$ из (2) следует

$$U_{cem} = \frac{E_{kp}^2}{2} \frac{\epsilon V}{j_{k2} - j_{k1}} + E_{kp}H = \frac{5}{4} H_{opt} E_{kp},$$

но вход в ВП произойдет при $U_{cem} = H_{opt} E_{kp}$ вплоть до плотности тока

$$j_c = j_{k02} = j_{k2} + \frac{E_{kp} \epsilon V}{H_{opt}}.$$

Для того, чтобы динамическое напряжение U_{CEM} не ограничивало стационарной ОБР, необходимо обеспечить условие $U_{CEM} > U_{CE0}$. Величина H_{opt} должна обеспечить максимальное напряжение U_{ceo} коллектор—эмиттер. Из этого условия следует ограничение на H_{opt} , т.е.

$$H_{opt} \geq \frac{U_{CE0}}{E_{kp}}.$$

Если в коллекторе используется минимально возможная концентрация N_1 , соответствующая максимально допустимой температуре перехода T_j , то для обеспечения U_{CB0} толщина должна определяться как

$$W_c = 2 \frac{U_{Bcb}}{E_{kp}}.$$

Отсюда следует оценочное соотношение:

$$\frac{W_c}{H} = 2 \frac{U_{Bcb}}{U_{ceo}}.$$

Если в транзисторном ключе используется глубокая шунтировка эмиттерного перехода ($U_{ceR} = U_{Bcb}$), то $\frac{W_c}{H} = 2$ и концентрация примесей в n слое может быть оценена из первого выражения (5).

$$N_2 = N_1 + \frac{2\epsilon E_{kp}}{qH}.$$

На рисунке 3 показана зависимость напряжения лавинной инжекции от плотности тока при различной ширине H слоя с трехслойным коллектором.

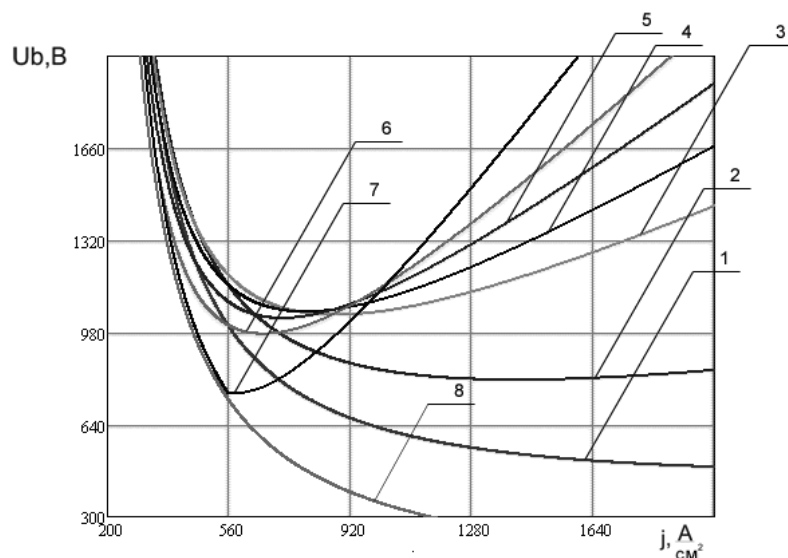


Рисунок 3 — Зависимость напряжения лавинного пробоя от плотности тока трехслойного коллектора при различных толщинах H области:
 1 — $H = 10$ мкм; 2 — $H = 20$ мкм; 3 — $H = 35$ мкм; 4 — $H = 40$ мкм;
 5 — $H = 45$ мкм; 6 — $H = 50$ мкм; 7 — $H = 60$ мкм; 8 — двухслойный коллектор

Для анализа влияния ширины N области на динамическую ОБР были использованы следующие физико-конструктивные параметры: концентрация примеси в n^- области составляет 10^{14} см^{-3} , концентрация примеси в n -области (N) составляет 10^{15} см^{-3} . Как показали результаты моделирования, максимальное динамическое блокирующее напряжение для такой структуры обеспечивается при толщине $H = 45$ мкм, при более высокой толщине H слоя наблюдается провал напряжения лавинной инжекции.

На рисунке 4 изображена зависимость напряжения лавинной инжекции от плотности тока при различном уровне легирования N слоя для транзистора с трехслойным коллектором. При этом для моделирования были использованы следующие физико-конструктивные параметры: концентрация примеси в n^- области составляет 10^{14} см^{-3} , толщина n области (H) составляет 45 мкм.

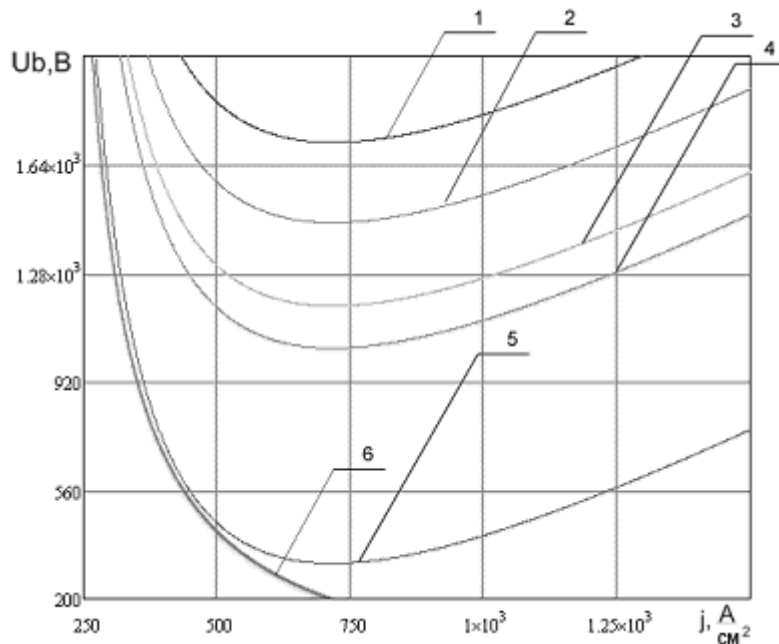


Рисунок 4 — Зависимость напряжения лавинного пробоя от плотности тока трехслойного коллектора при различных значениях концентрации примеси N области:
 1 — $N_2 = (5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3})$; 2 — $N_2 = (7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3})$; 3 — $N_2 = (9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3})$; 4 — $N_2 = (1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3})$;
 5 — $N_2 = (1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3})$; 6 — двухслойный коллектор

Результаты моделирования показали, что при повышенной концентрации примеси в N слое в принципе происходит увеличение блокирующего напряжения при более высоких плотностях тока. Однако при увеличении плотности тока блокирующее напряжение низколегированного слоя коллектора падает

значительно быстрее и в результате, при выключении транзистора и меньшей по амплитуде величине плотности тока, наблюдается провал напряжения лавинной инжекции.

Выбор толщины и уровня легирования буферного слоя является определяющим для обеспечения максимального предельного динамического напряжения при больших плотностях токов. Так, использование неоптимальной толщины Н слоя (рисунок 3) или завышенной концентрации примеси (рисунок 4) в n слое, значительно уменьшает динамическое напряжение пробоя.

Таким образом, в работе проведен анализ динамической ОБР и представлена модель, позволяющая целенаправленно изменять параметры конструкции транзистора с трехслойным коллектором для получения максимального динамического блокирующего напряжения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на определение максимальной плотности тока в переходном процессе выключения и требований к структуре эмиттера высоковольтного транзистора.

Библиографический список

1. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / А. Блихер. — Л.: Энергоатомиздат. 1986 г. — 248 с.
2. Kwang-Hoon Oh. A Simulation Study on Novel Field Stop IGBTs Using Superjunction/ Kwang-Hoon Oh, Jaegil Lee, Kyu-Hyun Lee, Young Chul Kim, and Chongman Yun // IEEE Transactions on Electron Devices. — april 2006. — V. 53. — P. 884 — 890.

Поступила в редакцию 21.04.2008 г.