

УДК 681.586.69

Динамические и статические характеристики МОП-тиристоров, облученных электронами

Е. В. ЧЕРНЯВСКИЙ¹, В. П. ПОПОВ¹, Ю. С. ПАХМУТОВ², Ю. И. КРАСНИКОВ¹, Л. Н. САФРОНОВ¹¹Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: evgen@isp.nsc.ru

²ОАО “Ангстрем”, Южная промзона, Зеленоград, Москва 103460 (Россия)

Аннотация

Представлены результаты разработки и изготовления МОП-тиристоров. Изучены статические и динамические характеристики. Исследовано влияние облучения электронами на статические и динамические характеристики. Обнаружено, что облучение электронами существенно уменьшает время выключения МОП-тиристора, а также наблюдается увеличение плотности управляемого тока.

ВВЕДЕНИЕ

Новое поколение биполярно-полевых приборов силовой электроники с напряжением блокирования до 4.5 кВ в настоящее время бурно развивается. К таким приборам относятся МОП-управляемый тиристор (MOS Controlled Thyristor – MCT), тиристор с обрывом по эмиттеру (Emitter Switched Thyristor – EST), биполярно-полевой транзистор с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT), транзистор с улучшенной инжекцией (Injection Enhanced Gate Transistor – IEGT). Сочетание низких падений напряжения в открытом состоянии и преимуществ полевого управления выдвигают эти приборы в ряд наиболее перспективных в силовой электронике. В отличие от запираемого тиристора (Gate Turn-Off Thyristor – GTO-тиристор) для управления MCT и IGBT не требуются громоздкие цепи управления. Наиболее сложным для силовых приборов является процесс выключения, поскольку плотности токов достигают 100 А/см². При таких плотностях тока могут возникать локальные неоднородности, приводящие к шунтированию тока и, как следствие, выходу прибора из строя. Другим критическим параметром является время выключения, которое определяет рассеиваемую мощность в при-

боре при выключении. Основные методы уменьшения времени выключения – анодное шунтирование и регулирование времени жизни носителей путем введения рекомбинационных центров. Одним из методов введения рекомбинационных центров является облучение электронами. Данная технология успешно используется для уменьшения динамических потерь GTO-тиристоров. В биполярно-полевых приборах такое облучение ухудшает параметры управляющих МОП-транзисторов и может привести к уменьшению управляемого тока, а значит? и области безопасной работы прибора.

Цель данной работы – исследование возможности регулирования времени выключения МОП-тиристора с анодным шунтированием, а также исследование статических и динамических характеристик приборов с различными временами жизни носителей в N-базе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Структура анода

Для достижения напряжения пробоя 2.5 кВ в сочетании с низким падением напряжения в открытом состоянии в МОП-тиристоре был использован анодный буферный слой в сочетании с анодными шунтами, как в мощных

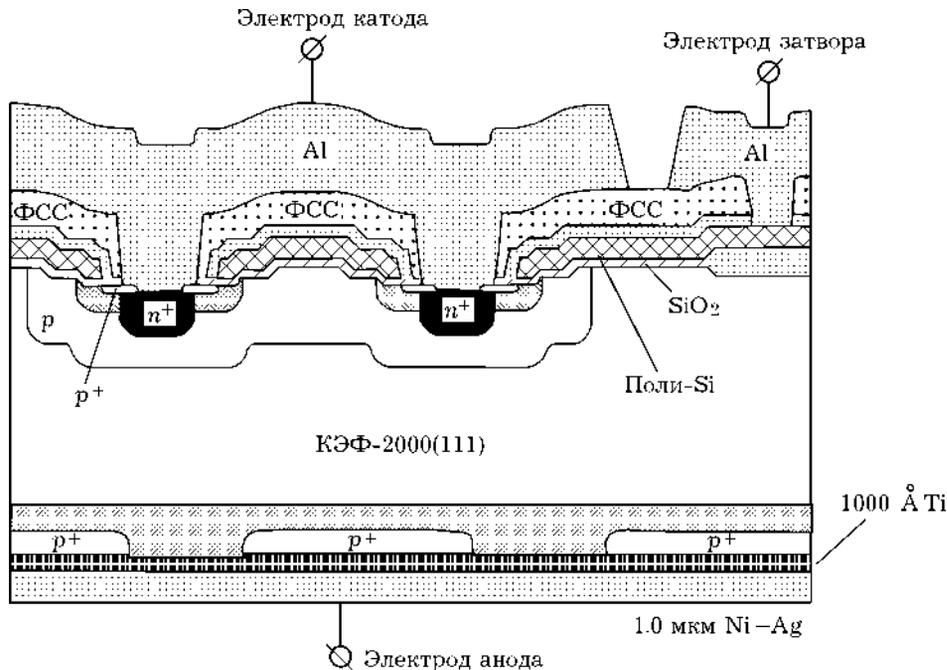


Рис. 1. Структура МОП-тиристора.

ГТО [1–3] (рис. 1). В качестве исходного материала были выбраны пластины бестигельного зонно-плавленого (БЗП) кремния толщиной 420 мкм и удельным сопротивлением 2000 Ом·см. Буферный N-слой анода формировался диффузией фосфора на глубину 15 мкм, анодный p^+ -эмиттер – имплантацией бора через маску фоторезиста и последующей разгонкой на глубину 1 мкм. В слое анодного p^+ -эмиттера были оставлены окна для контакта металлизации анода к слою анодного буфера. Таким образом формировались анодные шунты. Отношение площади контакта анодного эмиттера S_{p^+} к площади контакта N-буфера S_n составило 100 : 1. Процедура изготовления анода описана в [4–6]. Металлизация анода – многослойная: первый слой состоит из Ti толщиной 1000 Å, далее нанесены слои Ni и Ag общей толщиной 1 мкм. Такая металлизация необходима для распайки кристалла в корпус на олово-свинцовый припой. Структура анода показана на рис. 1.

Структура катода

МОП-тиристор представляет собой биполярный прибор с полевым управлением. В связи с этим на планарной стороне МОП-тиристора размещены как N-канальные МОП-

транзисторы, используемые для включения тиристора, так и P-канальные, используемые для выключения тиристора.

Катод имеет вид матрицы элементарных ячеек 80×80 мкм, состоящих из 24 N-эмиттеров, расположенных в P-кармане. В центре элементарной ячейки находится колодец в N-базу, являющийся стоком включающего N-канального МОП-транзистора. Катодные эмиттеры представляют собой квадраты N⁺-слоя размером 10×10 мкм. По периферии эмиттера расположены P⁺-области, являющиеся истоками P-канальных выключающих транзисторов и выполненные в виде кольца. В центре эмиттера расположен контакт к металлизации катода. У кольцевых P⁺-истоков также имеется контакт к металлизации катода. Длина канала P-канальных МОП-транзисторов составляет 0,8 мкм. Стоком для него является P-карман. Расстояние между N-эмиттерами 6 мкм. N-эмиттеры изготавливаются имплантацией фосфора по самосовмещенной технологии через маску поликремния. P⁺-исток также имплантируется через маску поликремния. Поликремний одновременно является общим затвором для N- и P-канальных МОП-транзисторов. Поликремний легирован фосфором до сопротивления $R_s = 12$ Ом/кв. P-карман – общий для всех N-эмиттеров и имеет вид пря-

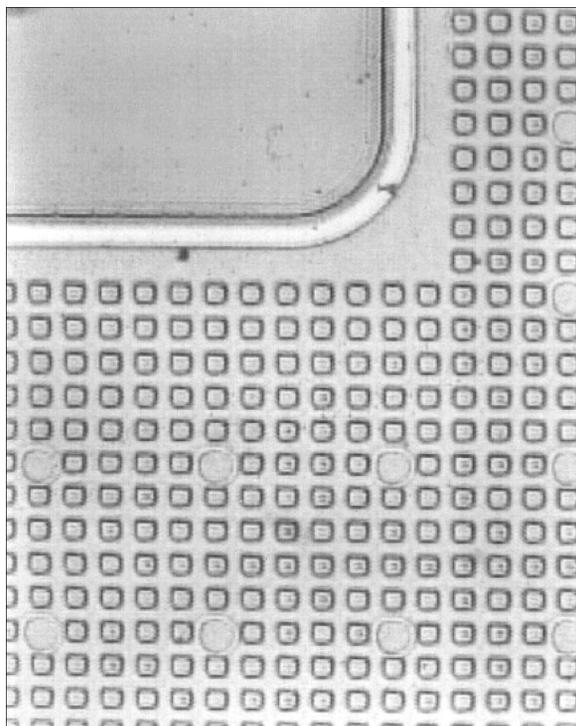


Рис. 2. Структура катода МОП-тиристора.

моугольника с размерами 7820×4820 мкм. Общее число N-эмиттеров составляет 144 042. Длина периметра эмиттера 40 мкм, следовательно, отношение W/L (где W – суммарная ширина канала, L – длина канала) для P-канальных МОП-транзисторов составляет 50. Суммарная ширина каналов всех P-канальных МОП-транзисторов составляет 5.76 м. Общее число N-канальных МОП-транзисторов равно 5901. Длина канала – 9 мкм, суммарная ширина $W = 0.354$ м. Контакт к поликремниевому затвору транзисторов находится на отдельной площадке. Межслойная изоляция алюминия катода и поликремния затвора изготовлена из фосфорно-силикатного стекла. Структура катода МОП-тиристора показана на рис. 1 и 2.

Принципиальная эквивалентная схема

Для упрощенного описания процессов, происходящих в МОП-тиристор, обратимся к принципиальной эквивалентной схеме, представленной на рис. 3. На этой принципиальной схеме биполярные транзисторы T1 и T2 представляют собой вертикальную NPN-структуру. Эта структура физически состоит из слоев МОП-тиристора: N^+ -эмиттер – P-

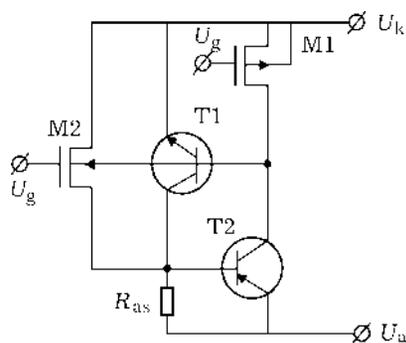


Рис. 3. Принципиальная эквивалентная схема МОП-тиристора.

карман – N-подложка – P-анод. Она моделируется составным NPN-PNP-транзистором, у которого база транзистора T1 соединена с коллектором транзистора T2. N-канальный МОП-транзистор M2 предназначен для включения тиристора. При подаче положительного напряжения на затвор транзистор M2 впрыскивает носители в N-подложку, являющуюся стоком для транзистора M2, при этом образуется положительная обратная связь по току между транзисторами T1 и T2 и тиристор включается. Для выключения тиристора необходимо разорвать эту положительную обратную связь. В МОП-тиристор это достигается путем открывания P-канала в МОП-транзисторе M1, стоком которого является P-карман. Ток дырок стекает по каналу в P^+ -исток, который соединен металлизацией с N^+ -эмиттером. Таким образом появляется обводной канал, по которому избыточные носители стекают в катод и тиристор выключается. Способность тиристора к выключению критическим образом зависит от параметров выключающего P-канального МОП-транзистора. Сопротивление R_{as} , включенное между базой и эмиттером транзистора T2, представляет собой сопротивление анодных шунтов.

Статические вольт-амперные характеристики МОП-тиристора

МОП-тиристор с анодным шунтированием представляет собой униполярный прибор. Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП-тиристора приведены на рис. 4. При положительном напряжении на аноде и отрицательном или нулевом напряжении на затворе МОП-тиристор блокирует ток ка-

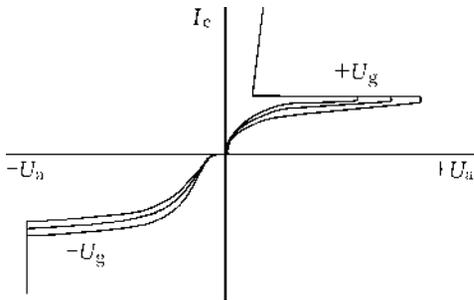


Рис. 4. Статические вольт-амперные характеристики МОП-тиристора с анодным шунтированием. Напряжения на затворе U_g (1–15 В) положительны для прямой ветви и отрицательны (–5...–20 В) – для обратной.

тод-анод. При подаче положительного напряжения на затвор (относительно катода) наблюдается семейство характеристик включающего МОП-тиристор N-канального МОП-транзистора. При достижении тока катода, равного току удержания тиристора, происходит защелкивание. На этом участке ВАХ ток катода определяется динамическим сопротивлением тиристора $R_{ds(on)}$. Рассмотрим обратную ветвь характеристики при отрицательном напряжении U_a и отрицательно (относительно катода) напряжении затвора $-U_g$. Поскольку анод тиристора изготовлен с анодным шунтированием, то переход анодный P^+ -эмиттер – N^+ -буфер не является блокирующим. В этом случае ток катода протекает через канал выключающего P-канального МОП-транзистора, прямосмещенный переход P-карман – N-база и через сопротивление анодных шунтов – в анод. На ВАХ при $U_a < 0$ наблюдается падение напряжения на прямосмещенном переходе P-карман – N-база. Этот участок ВАХ нерабочий, однако позволяет контролировать важные параметры выключающего P-канального МОП-транзистора. На рабочем участке (при положительном U_a) и напряжении затвора $U_g \leq 0$ напряжение блокирования достигало 2500 В при токах утечки $I = 100\text{--}200$ мкА. Падение напряжения в открытом состоянии составило 2.8 В при токе, равном 32 А.

Динамические характеристики

Динамическая характеристика необлученного МОП-тиристора представлена на рис. 5. Ток анода нарастает до величины 19 А за

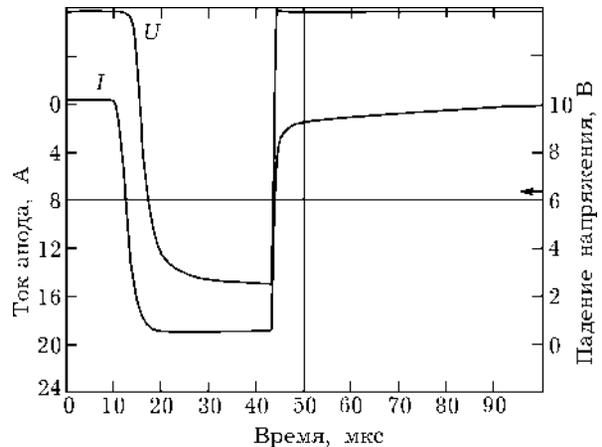


Рис. 5. Динамические характеристики необлученного МОП-тиристора.

3.5 мкс. Фронт закрывания состоит из двух фаз: быстрой и медленной. Во время быстрой фазы ток анода падает за 1.5 мкс до 10 % от максимального значения. Во время медленной фазы остаточный ток анода падает за 30 мкс. Это связано с высоким временем жизни носителей в высокоомной N-базе (~50 мкс). Потери энергии на выключение составляют 80 мДж. Для уменьшения длительности фронта выключения и, соответственно, динамических потерь применяются различные методы уменьшения времени жизни носителей. Одним из них является введение радиационных дефектов, служащих центрами рекомбинации. Для этого применяется облучение γ -квантами [7], электронами [8, 9] и протонами [10]. Каждый из этих методов имеет свои физические и технологические особенности. Если протонами облучаются пластины перед разделением на чипы и посадкой в корпус, то облучение γ -квантами и электронами возможно для корпусированных приборов. В нашем случае МОП-тиристор был посажен в корпус ТО-218, т. е. было возможно только облучение электронами и γ -квантами. Для облучения применялись электроны с энергией 2 МэВ. Доза облучения составила $5 \cdot 10^{12}$ см⁻². После облучения МОП-тиристоры отжигались при температуре 250 °С в течение 1 ч. Падение напряжения в открытом состоянии у облученных МОП-тиристоров возросло и составило 7.5 В при токе анода 34 А, что соответствует плотности тока 100 А/см². Длительность фронта выключения при токе 33 А составила 2.5 мкс. Динамические потери на

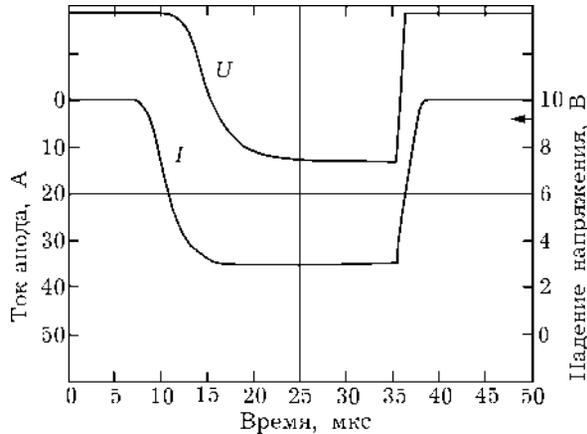


Рис. 6. Динамические характеристики облученного МОП-тиристора

выключение составили 35 мДж. Максимальная плотность выключаемого тока превысила 150 А/см^2 . Динамическая характеристика облученного МОП-тиристора представлена на рис. 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из приведенных выше результатов, после облучения падение напряжения в открытом состоянии возрастает. Для объяснения этого эффекта воспользуемся моделью рin-диода, применимость которой для тиристора показана в [11]. Тиристор в стационарном проводящем состоянии подобен рin-диоду с дырками, текущими от Р-эмиттера, и электронами, текущими от N-эмиттера. Высокая плотность электронов и дырок приводит к возникновению эффекта модуляции проводимости, при котором существенно уменьшается сопротивление N-базы тиристора. Падение напряжения V_N в N-базе описывается выражением [11]

$$V_N = 8kTbd^2 / [q(1 + b)^2 D_a \tau_{\text{eff}}] \quad (1)$$

где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, b — отношение подвижностей электронов и дырок, равное μ_n/μ_p , d — половина ширины N-базы, равная $W_N/2$, q — заряд электрона, τ_{eff} — эффективное время жизни носителей. Согласно [12], положим $D_a \sim 1 \text{ см}^2/\text{с}$, $d = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $b = 3$, $\tau_{\text{eff}} = 50 \text{ мкс}$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. По формуле (1) для необлученного тиристора получаем $V_N = 1.17 \text{ В}$. Полученное значение более чем в два раза ниже наблю-

даемого — 2.8 В. Однако следует заметить, что здесь не учитываются падение напряжения на прямосмещенном переходе N⁺-эмиттер — Р-карман и падение напряжения на контактах. Для времени жизни $\tau_{\text{eff}} = 5 \text{ мкс}$ в N-базе облученного тиристора по формуле (1) получаем $V_N = 5.4 \text{ В}$. Наблюдаемое падение напряжения составляет 7.5 В. Это говорит о том, что падение напряжения в открытом состоянии на облученном тиристоре в большей мере определяется временем жизни носителей τ_{eff} в N-базе.

Помимо увеличения падения напряжения наблюдалось увеличение максимальной управляемой плотности тока. Сообщения в литературе о росте управляемого тока после облучения и отжига не обнаружены. Возможное объяснение этого эффекта заключается в следующем. Уменьшение времени жизни приводит к уменьшению диффузионной длины L_p для дырок. При $\tau_{\text{eff}} = 5 \text{ мкс}$ величина L_p становится сравнимой с расстоянием между N-эмиттерами ($\sim 10 \text{ мкм}$), что уменьшает вероятность переключения дырочного тока между соседними N-эмиттерами. Это приводит к ослаблению эффекта шнурования тока при большой площади катода и повышению управляемой плотности тока. После облучения и отжига управляемая плотность тока достигает $\sim 150 \text{ А/см}^2$ при общем управляемом токе МОП-тиристора свыше 50 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают возможность регулирования фронта выключения высоковольтного МОП-тиристора в пределах от 50 до 1 мкс и улучшения его динамических характеристик за счет уменьшения динамических потерь при переключении. Достигнуто уменьшение динамических потерь на выключение более чем в 2 раза. Важным результатом, полученным в работе, является 2–3-кратное увеличение максимальной плотности управляемого тока и расширение области безопасной работы прибора. Возможное объяснение последнего эффекта заключается в более однородном распределении дырочного тока. Однако при оптимизации длительности фронта выключения необходи-

мо учитывать рост падения напряжения в открытом состоянии и, как следствие, рост потерь мощности в статическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Т. Ogura, М. Kitagava, А. Nakagava and H. Ohashi, *IEEE Trans. Electron Dev.*, ED-38 (1991) 1491.
- 2 М. Kegura, Н. Akiyama, М. Tani and S. Yamada, *IEEE Trans. Power Electronics*, 5 (1990) 430.
- 3 Т. Ogura, А. Nakagava, М. Atsuta *et al.*, *IEEE Trans. Electron Dev.*, ED-40 (1993) 628.
- 4 F. Bauer, E. Halder, K. Hoffman *et al.*, *Ibid*, ED-38 (1991) 1605.
- 5 F. Bauer, H. Haddon, T. Stockmeier *et al.*, Proc. of Int. Conf. MADEP 91, 1991, p. 270.
- 6 H. Dettmer, W. Fichtner, F. Bauer and T. Stockmeier, Proc. of Int. Conf. ISPSD 94, 1994, p. 13.
- 7 S. D. Brotherton and P. Bradley, *J. Appl. Phys.*, 53 (1982) 5720.
- 8 A. O. Ewvaraye and B. J. Baliga, *J. Electrochem. Soc.*, 124 (1977) 913.
- 9 G. I. Andersson, M. O. Andersson and O. Andersson, *J. Appl. Phys.*, 72 (1992) 2680.
- 10 K. Nakayama and H. Matsuda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37 (1998) 4751.
- 11 M. F. Chang, E. E. Wolley and S. F. Bevacqua, Proc. Industry Appl. Soc., 1979, p. 1068.
- 12 S. K. Chandi, *Semiconductor Power Devices*, Wiley-Interscience, New York, 1977, p. 234.