

Переходные характеристики МОП тиристоров, облученных электронами

© Е.В. Чернявский[¶], В.П. Попов, Ю.С. Пахмутов, Ю.И. Красников, Л.Н. Сафронов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 14 февраля 2001 г. Принята к печати 15 февраля 2001 г.)

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. Также наблюдалось увеличение плотности управляемого тока.

1. Введение

Новое поколение биполярно-полевых приборов силовой электроники с напряжением блокировки 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 возможно возникновение локальных неоднородностей, приводящих к шнурованию тока и, как следствие, к выходу прибора из строя. Другим критическим параметром является время выключения, что определяет рассеиваемую мощность в приборе при выключении. Основными методами уменьшения времени выключения являются: анодное шунтирование и регулирование времени жизни носителей путем введения рекомбинационных центров. Один из методов введения рекомбинационных центров — 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.

2. Экспериментальная часть

2.1. Структура анода

Для достижения напряжения пробоя 2.5 кВ в сочетании с низким падением напряжения в открытом состоянии в МОП тиристоре был применен анодный буферный *n*-слой в сочетании с анодными шунтами, как в мощных GTO-тиристорах [1–3] (рис. 1). В качестве материала были выбраны пластины бестигельного зонно-плавленнного кремния толщиной 420 мкм и удельным сопротивлением 2000 Ом·см. Буферный *N*-слой анода формировался диффузией фосфора на глубину 15 мкм. Анодный *P*⁺-эмиттер формировался имплантацией бора через маску фоторезистора и последующей разгонкой на глубину 1 мкм. В слое анодного *P*⁺-эмиттера были оставлены окна для металлизации контакта анода к слою анодного буфера. Таким образом формировались анодные шунты. Отношение площади контакта анодного эмиттера S_{p^+} к площади контакта к *N*-буферу S_n составляло 100:1. Процедура изготовления анода описана в работах [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.

2.2. Структура катода

МОП тиристор является биполярным прибором с полевым управлением. В связи с этим на планарной стороне МОП тиристора размещены *N*-канальные МОП транзисторы, используемые для включения тиристора, и *P*-канальные МОП транзисторы, 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 вы-

[¶] E-mail: evgen@isp.nsc.ru
Fax: (3832)332493

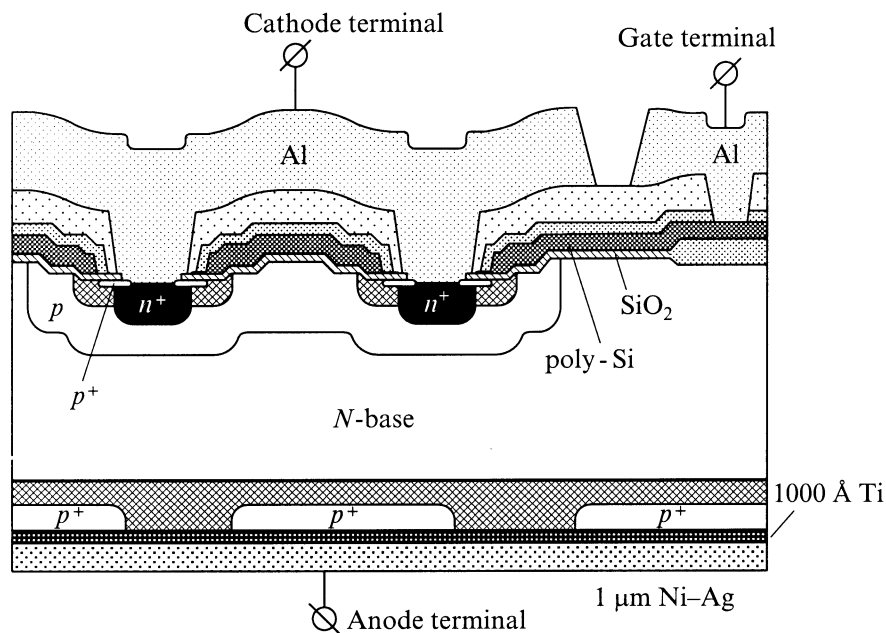


Рис. 1. Структура МОП тиристора.

ключающих транзисторов, 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 — 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 сопроти-

вления $R_s = 12 \text{ Ом}/\square$. P -карман — общий для всех N -эмиттеров и имеет вид прямоугольника с размерами $7820 \times 4820 \text{ мкм}$. Общее число N -эмиттеров составляет 144 042. Длина периметра эмиттера — 40 мкм, следовательно, отношение W/L 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 $W = 0.354 \text{ м}$. Контакт к поликремниевому затвору транзисторов находится на отдельной площадке. Межслойная изоляция алюминия катода и поликремния затвора сделана из фосфоросиликатного стекла. Структура катода МОП тиристора показана на рис. 1 и 2.

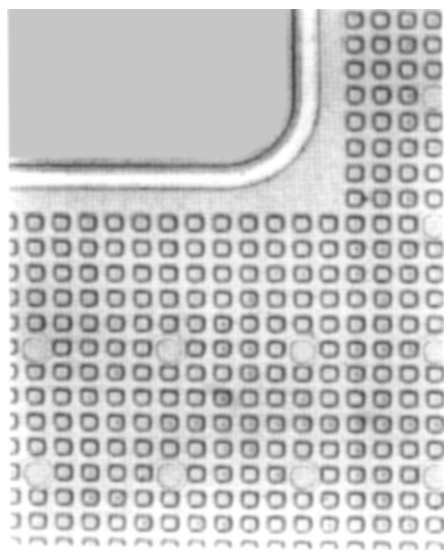


Рис. 2. Структура катода МОП тиристора.

2.3. Принципиальная эквивалентная схема

Для упрощенного описания процессов, происходящих в МОП тиристор, обратимся к принципиальной схеме, представленной на рис. 3. На этой схеме биполярные транзисторы $T1$ и $T2$ представляют собой вертикальную $NPNP$ -структуру. Эта структура физически состоит из слоев МОП тиристора: N^+ -эмиттер– P -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 $M2$; образуется положительная обратная связь по току между транзисторами $T1$ и $T2$, и тиристор включается. Для выключения тиристора необходимо разорвать эту

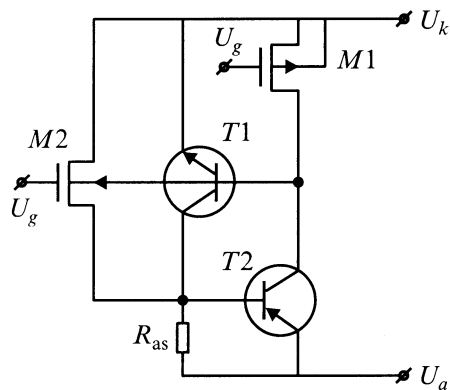


Рис. 3. Принципиальная эквивалентная схема МОП тиристора.

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.

2.4. Статические вольт-амперные характеристики МОП тиристора

МОП тиристор с анодным шунтированием является униполярным прибором. Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП тиристора приведены на рис. 4. При положительном напряжении на аноде U_a и отрицательном или нулевом напряжении на затворе U_g МОП тиристор блокирует ток катод-анод. При подаче положительного напряжения на затвор (относительно катода) видно семейство характеристик (включающего МОП тиристор N -канального МОП транзистора). При достижении тока катода, равного току удержания тиристора, происходит защелкивание. На этом участке ВАХ тока катода I_c определяется динамическим сопротивлением тиристора R_d . Рассмотрим обратную ветвь характеристики при отрицательном напряжении U_a и отрицательного (относительно катода) напряжения затвора $-U_g$. Поскольку анод тиристора изготовлен с анодным шунтированием, 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 $U_a < 0$ видно падение напряжения на прямосмещенном переходе P -карман — N^- -база. Этот участок ВАХ не является рабочим, однако позволя-

ет 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 $I_{leak} = 100-200$ мкА. Падение напряжения в открытом состоянии составило 2.8 В при токе 32 А.

2.5. Динамические характеристики

Динамическая характеристика необлученного МОП тиристора представлена на рис. 5. Ток анода нарастает до величины 19 А за 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). Для уменьшения длительности фронта выключения применяются различные методы уменьшения времени жизни носителей. Одним из них является введение радиационных дефектов, являющихся центрами рекомбинации. Для этого применяется облучение γ -квантами [7], электрона-

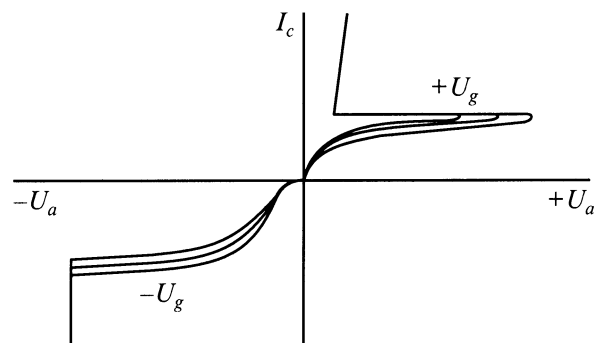


Рис. 4. Статические вольт-амперные характеристики МОП тиристора с анодным шунтированием; напряжения на затворе $U_g = 1 \div 15$ В положительны для прямой ветви и отрицательны $U_g = -5 \div (-20)$ В для обратной.

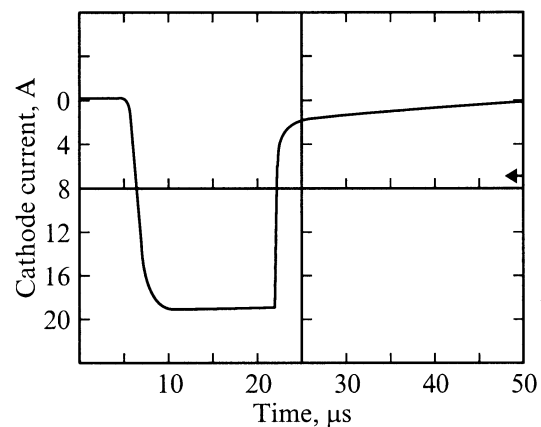


Рис. 5. Динамическая характеристика необлученного МОП тиристора.

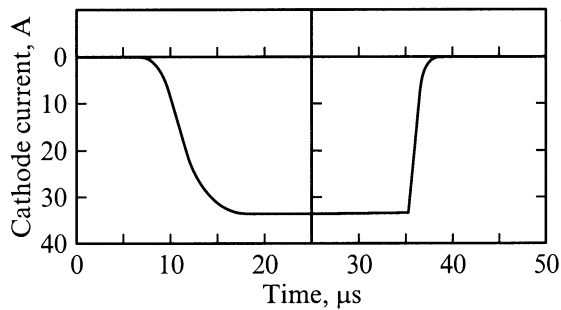


Рис. 6. Динамическая характеристика облученного МОП тиристора.

ми [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 приборов в корпусе. 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 $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. После облучения МОП тиристоры отжигались при температуре 250°C в течение 2 ч. Падение напряжения в открытом состоянии у облученных МОП тиристорov возросло и составило 8 В при токе анода 33 А, что соответствует плотности тока 100 А/см^2 . Длительность фронта выключения при токе 33 А составила 2.5 мкс. Максимальная плотность выключаемого тока превысила 150 А/см^2 . Динамическая характеристика облученного МОП тиристора представлена на рис. 6.

3. Обсуждение результатов

Как видно из приведенных выше результатов, после облучения падение напряжения в открытом состоянии возрастает. Для объяснения роста падения напряжения воспользуемся моделью $p-i-n$ -диода, применимость которой для тиристора показана в работе [11]. Тиристор в стационарном проводящем состоянии подобен $p-i-n$ -диоду с дырками, текущими от P -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 в N -базе описывается выражением [11]

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

где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, $b = \mu_n/\mu_p$ — отношение подвижностей электронов и дырок, $d = W_N/2$ — половина ширины N -базы, q — заряд электрона, τ_{eff} — эффективное время жизни носителей. Согласно [12] положим $D_a \approx 1 \text{ см}^2/\text{с}$, $d = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $b = 3$, $\tau_{\text{eff}} = 50 \text{ мкс}$, $T = 100^\circ\text{C}$. По формуле (1)

для необлученного тиристора получаем $V_N = 1.17 \text{ В}$. Полученное значение в 2 раза ниже, чем наблюдаемое падение 2.8 В. Однако следует заметить, что здесь не учитывается падение напряжения на прямосмещенном переходе N^+ -эмиттер- P -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 8 В. Это показывает, 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 сравнима 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 к 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.

4. Заключение

Приведенные результаты показывают возможность регулирования фронта выключения высоковольтного МОП тиристора в пределах от 50 до 1 мкс и улучшение его динамических характеристик за счет уменьшения динамических потерь при переключении. 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 необходимо учитывать рост падения напряжения в открытом состоянии и, как следствие, рост потерь мощности в статическом режиме.

Список литературы

- [1] T. Ogura, M. Kitagava, A. Nakagava, H. Ohashi. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-38**, 1491 (1991).
- [2] M. Kegura, H. Akiyama, M. Tani, S. Yamada. IEEE Trans. Power Electron., **5**, 430 (1990).
- [3] T. Ogura, A. Nakagava, M. Atsuta, Y. Kamei, K. Takigami. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-40**, 628 (1993).
- [4] F. Bauer, E. Halder, K. Hoffman, H. Hollenbeck, P. Roggwiller, T. Stockmeier, J. Burgler, W. Fichtner, S. Muller, M. Westermann, J.M. Moret, R. Vuilleumier. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-38**, 1605 (1991).

- [5] F. Bauer, H. Haddon, T. Stockmeier, W. Fichtner, R. Vuilleumier, J.M. Moret. *Proc. of Int. Conf. MADEP 91* (1991) p. 270.
- [6] H. Dettmer, W. Fichtner, F. Bauer, T. Stockmeier. *Proc. Int. Conf. ISPSD 94* (1994) p. 13.
- [7] S.D. Brotherton, P. Bradley. *J. Appl. Phys.*, **53**, 5720 (1982).
- [8] A.O. Evwaraye, B.J. Baliga. *J. Electrochem. Soc.*, **124**, 913 (1977).
- [9] G.I. Andersson, M.O. Andersson, O. Andersson. *J. Appl. Phys.*, **72**, 2680 (1992).
- [10] K. Nakayama, H. Matsuda, *Jap. J. Appl. Phys.*, **37**, 4751 (1998).
- [11] M.F. Chang, E.E. Wolley, S.F. Bevacqua. *Proc. Industry Appl. Soc.* (1979) p. 1068.
- [12] S.K. Chandi. *Semiconductor Power Devices* (N.-Y. Willey-Interscience, 1977).

Редактор Т.А. Полянская

Electron irradiated MCT time characteristics

E.V. Chernyavsky, V.P. Popov, Yu.S. Pakhmutov,
Yu.I. Krasnikov, L.N. Safronov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The MOS controlled thyristor (MCT) have been designed and fabricated. First, the static characteristics are studied. Second, the dynamic characteristics have been studied. The influence of electron irradiation on static and dynamic characteristics were investigated. It is found that electron irradiation can sufficiently decrease the switch-off time of MCT. It has been also observed an increase in the controlled current density.