

©1994 г.

ТИРИСТОРЫ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ: НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРОВ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ПАРАМЕТРОВ

А.Н.Андреев, Ф.М.Снегов, А.М.Стрельчук, В.Е.Челноков

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 30 декабря 1993 г. Принята к печати 13 января 1994 г.)

Рассмотрены особенности карбида кремния, определяющие специфику тиристор, изготовленных на его основе. Для тиристор на основе 6H-SiC приведена оценка токов переключения и удержания, напряжений пробоя и переключения. Показано, что на современном уровне развития технологии возможно изготовление карбид-кремниевых тиристор на напряжения переключения 500–700 В.

1. Введение

К настоящему времени существует всего несколько сообщений о создании биполярных приборов на основе карбида кремния, среди которых публикации о динисторе [1,2] и тиристоре [3]. Трудности создания биполярных приборов можно связать с известным для карбида кремния экспериментальным фактом — малыми временами жизни и малыми диффузионными длинами неосновных носителей заряда (ННЗ). В данной работе рассмотрены особенности тиристор на основе SiC, обусловленные свойствами карбида кремния, а также проведена оценка возможных параметров таких тиристор, в том числе напряжений переключения (в частности, максимально достижимых) и удержания, токов переключения и удержания. Рассматривались приборы на основе карбида кремния политипа 6H, по которому к настоящему времени имеется наиболее полный набор данных.

2. Основные соотношения

В основу оценки параметров тиристора положена двухтранзисторная модель [4], согласно которой ток и напряжение переключения определяются условием

$$\tilde{\alpha}_p(J_s, U_s)M_p(U_s) + \tilde{\alpha}_n(J_s, U_s)M_n(U_s) = 1, \quad (1)$$

а условием удержания тиристора во включенном состоянии является

$$\alpha_{p0}(J_h) + \alpha_{n0}(J_h) = 1. \quad (2)$$

Здесь J_s, J_h — плотности токов переключения и удержания; U_s — напряжение переключения; M_n, M_p — коэффициенты умножения электронов и дырок; $\bar{\alpha}_n = \alpha_n + J\partial\alpha_n/\partial J$, $\alpha_n = \beta_n\gamma_n$ — коэффициент усиления $p-n-p$ -транзистора; α_{n0} — коэффициент усиления $p-n-p$ -транзистора при напряжении на коллекторном переходе, равном нулю. Коэффициент переноса β_n определяется как $\beta_n = \text{sch}[(W_n - W_{n0})/L_p]$, где W_n — ширина n -базы, W_{n0} — ширина слоя объемного заряда коллекторного перехода в n -базе, L_p — диффузионная длина дырок в p -базе. Коэффициент инжекции эмиттерного перехода $\gamma_n = J_{dn}^*/(J_{dn} + J_{rn})$, где плотность тока рекомбинации в слое объемного заряда n -базы $J_{rn} \sim \exp(qU/nkT)$ ($1 < n \leq 2$), U — падение напряжения на эмиттерном $p-n$ -переходе,

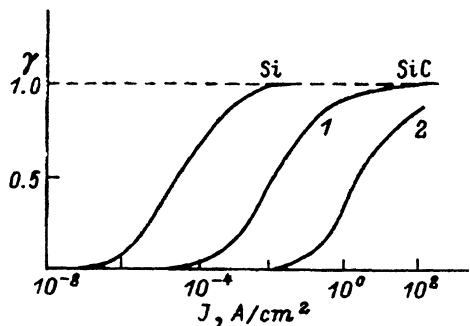
$$J_{dn}^* \sim \sqrt{\mu_p/\tau_p} \exp(qU/kT) \text{cth}[(W_n - W_{n0})/L_p] \quad (3)$$

— диффузионный ток в n -базе, J_{dn} — полный диффузионный ток, τ_p, μ_p — время жизни и подвижность дырок в n -базе. Величины $\alpha_p, \alpha_{p0}, \beta_p, \gamma_p$ определяются аналогично для p -базы.

3. Плотности токов переключения и удержания SiC тиристора

Расчет плотностей токов J_s и J_h осложняется отсутствием данных по величине коэффициента инжекции γ . Поэтому при расчете γ привлекаются данные о рекомбинационных токах и диффузионных длинах в базовых областях, полученные при исследовании $p-n$ -структур на основе SiC [5-8]. Исследования прямых вольт-амперных характеристик таких $p-n$ -структур, изготовленных различными технологическими методами, позволили обнаружить рекомбинационный ток Шокли-Нойса-Саа (с коэффициентом $n = 2$), обусловленный рекомбинацией через глубокий уровень (в диапазоне плотности тока $10^{-6} - 10^{-3}$ А/см²) и токи с дробными значениями n ($1 < n \leq 2$) [5,6] (при больших плотностях тока). В первом приближении примем, что коэффициент инжекции γ определяется соотношением тока Шокли-Нойса-Саа и диффузионного тока.

Диффузионный ток Шокли ($n = 1$) непосредственно в вольт-амперных характеристиках $p-n$ -структур на основе SiC фактически не наблюдался, однако может быть рассчитан, если известны диффузионные длины и подвижности ННЗ. Известно, что диффузионная длина ННЗ в SiC максимальна в эпитаксиальных слоях, выращенных жидкофазной эпитаксией или осаждением из газовой фазы, и достигает 1.0-1.5 мкм [7,8,9]; в эпитаксиальных слоях, выращенных сублимацией, L_p не превышает 0.4-0.7 мкм [7,8]. На рисунке приведены две токовые зависимости коэффициента инжекции, характеризующие сдвиг по току вследствие возможного изменения параметров как рекомбинационного, так и диффузионного токов. Для сравнения приведена токовая зависимость коэффициента инжекции для кремниевого $p-n$ -перехода [10].



Токвые зависимости коэффициента инжекции для p - n -структур на основе SiC (кривые 1, 2) для случая, когда γ определяется соотношением тока Шокли-Нойса-Саа ($n = 2$) и диффузионного тока. Для сравнения приведена зависимость $\gamma(J)$ для кремния.

Параметры зависимостей: 1 — предэкспоненциальный множитель рекомбинационного тока $J_{r0} = 10^{-23}$ А/см², $N_d - N_a = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $L_p = 1.3$ мкм, $\tau = 20$ нс; 2 — $J_{r0} = 10^{-22}$ А/см², $N_d - N_a = 10^{18}$ см⁻³, $L_p = 0.1$ мкм, $\tau = 5$ нс.

Таким образом, расчет показывает, что в p - n -структурах на основе SiC коэффициент инжекции $\gamma = 1$ лишь при $J > 10^{-10^2}$ А/см² (даже без учета других рекомбинационных токов с $1 < n \leq 2$). Указанные значения плотностей тока можно принять как оценку плотностей токов переключения и удержания в первом приближении. Таким образом, особенностью тиристоров на основе SiC является сильная естественная шунтировка эмиттерных p - n -переходов за счет токов рекомбинации в слое объемного заряда.

Обратим внимание на то, что глубина акцепторной примеси в $6H$ -SiC больше, чем донорной, и как с точки зрения увеличения коэффициента инжекции в широкую базу, так и с точки зрения улучшения управления тиристором через тонкую базу желательно иметь широкую базу p -типа, а узкую — n -типа. Спецификой карбид-кремниевый тиристора является также то, что ширина слабо легированной базы мала (ограничена малыми величинами диффузионной длины ННЗ, см. раздел 4), поэтому в приборе, рассчитанном на максимальные напряжения, слой объемного заряда коллекторного перехода перед переключением занимает всю ширину базы. Как следует из (3), коэффициент инжекции при этом сильно возрастает, а коэффициент переноса приближается к единице, т.е. проявляются эффекты, характерные для прибора с короткой базой. Кроме того, в условии переключения фигурирует малосигнальный коэффициент инжекции $\tilde{\gamma}$ (который больше γ), и поскольку переключение происходит в режиме пробоя коллекторного перехода, значительную роль будет играть умножение носителей заряда [см. выражение (1)]. Действие всех перечисленных факторов направлено в сторону уменьшения тока переключения и может на порядок сместить приведенную выше оценку.

Условие удержания тиристора в открытом состоянии, соответствующему выражению (2), выполняется, когда указанные факторы не работают. Таким образом, плотность тока удержания в тиристорах на основе SiC остается достаточно большой ($J \approx 10^2$ А/см²). В силу ряда причин первоначальное включение тиристора происходит на малой площади и лишь затем с увеличением тока включенное состояние распространяется на всю площадь структуры, что следует учитывать при расчете тока удержания.

4. Напряжения пробоя и переключения тиристорov на основе SiC

В условиях сильного шунтирования эмиттерных переходов напряжение переключения максимально и приблизительно равно напряжению пробоя коллекторного перехода (при условии, что ток утечки этого перехода мал). Напряжение пробоя определяется степенью легирования и шириной слабо легированной базы. При расчете геометрии тиристора предполагается, что увеличением тока через структуру можно всегда достигнуть выполнения условия $\gamma \simeq 1$. Тогда из условия (2) следует $\beta_n + \beta_p = 1$. Это условие накладывает ограничение на геометрию тиристорной структуры, определяя ширины баз. Ширина слабо легированной базы обычно выбирается из условия $W \simeq 3L$ ($\beta \simeq 0.1$), а выполнение условия $\beta_n + \beta_p = 1$ достигается за счет уменьшения толщины второй базы до значений $W \cong 0.5L$. При изготовлении тиристора методом сублимации ширина слабо легированной базы составит 1.2–2.1 мкм, при использовании жидкофазной эпитаксии или осаждением из газовой фазы — 3.0–4.5 мкм. Таким образом, в тиристорах на основе карбида кремния малые диффузионные длины ограничивают величину напряжения пробоя: максимальные значения напряжения пробоя при этом равны 230–350 В в первом случае и 500–700 В — во втором и достигаются при уровне легирования $(1.7–0.9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $(5.6–3.5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Указанные значения уровня легирования являются оптимальными и отклонение от них приводит к снижению напряжений пробоя и переключения.

Существует фактор, который может повлиять на расчет геометрии тиристора (а следовательно, и на расчет напряжений пробоя и переключения) и, кроме того, изменить оценку токов переключения и удержания. Известно, что при переходе к высокому уровню инжекции в широкой базе создается электрическое поле, ускоряющее движение ННЗ, инжектированных эмиттерным переходом, и условие переключения становится менее жестким [11]. Данное обстоятельство особый интерес представляет для тиристорov на основе SiC, для которого высокий уровень инжекции может быть получен и при $\gamma < 1$. Отметим также, что смягчения условий переключения и удержания можно добиться введением встроенного поля за счет неоднородного легирования базы.

5. Тиристор в открытом состоянии

Вольт-амперная характеристика тиристора на основе SiC в открытом состоянии в первом приближении соответствует линейной аппроксимации: $U = U_0 + IR$, где $U_0 \simeq 2.7 \text{ В}$ — падение напряжения на прямосмещенном p - n -переходе; I — ток, протекающий через тиристор; R — динамическое сопротивление. Выше было показано, что высокие напряжения пробоя в SiC реализуются при достаточно тонких и относительно сильно легированных базах. Вследствие этого сопротивление базы даже при отсутствии модуляции не будет определять полное сопротивление. В зависимости от места расположения контактов к структуре основной вклад в общее сопротивление дает или подложка, или сопротивление одного из слоев SiC при расположении

контакта сбоку от структуры. (Отметим, что сопротивление контактов может быть сделано достаточно малым [12]). Таким образом, так как эффект модуляции сопротивления базы в реальных структурах не будет играть большой роли, в тиристорах на основе SiC, в отличие от кремниевых, такие характеристики, как напряжение пробоя (и переключения), прямые падения напряжения в открытом состоянии и частотные характеристики оказываются не связанными друг с другом.

6. Характеристики реальных приборов

К сожалению, в работе [3] отсутствуют данные (концентрации, толщины баз и т.п.), необходимые для анализа работы тиристора. В диносторе [1,2] токи переключения находились в районе 1 мА ($J = 5 \text{ А/см}^2$), токи удержания — 5 мА (300 А/см^2), а максимальные напряжения переключения достигали 50 В.

Напряжения переключения близки к напряжениям пробоя при данной степени легирования базы ($N_d - N_a = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Плотность тока удержания также соответствует приведенной выше оценке. Меньшая величина плотности токов переключения по сравнению с плотностью токов удержания обусловлена, вероятно, действием рассмотренных выше факторов. Величина напряжения удержания ($\sim 3 \text{ В}$) свидетельствует об инверсии знака напряжения на коллекторном переходе, а достаточно большие сопротивления в открытом состоянии связаны с избранным способом создания контакта к относительно тонкому и слабо проводящему *p*-эмиттеру.

7. Заключение

Малые диффузионные длины НЗ ограничивают напряжения пробоя и переключения тиристоров на основе карбида кремния. Поэтому для изготовления тиристоров на основе SiC, рассчитанных на максимальные напряжения, необходимо прецизионно регулировать как толщины баз, так и уровень их легирования. На современном уровне развития технологии при соблюдении условия согласования диффузионных длин НЗ и ширины баз возможно создание карбид-кремниевых тиристоров на напряжениях переключения 500–700 В. Сильное шунтирование эмиттерных переходов тиристора за счет токов рекомбинации в слое объемного заряда приведет к достаточно высокой плотности тока удержания. Кроме того, несмотря на то что плотность тока переключения будет несколько ниже, достаточно критичной при изготовлении тиристоров (особенно большой площади) может оказаться величина тока переключения.

Работа выполнена, в частности, при поддержке Министерства обороны США.

Список литературы

- [1] В.А. Дмитриев, С.Н. Вайнштейн, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, 13, 675 (1987).
- [2] V.A. Dmitriev, M.E. Levinshstein, S.N. Vainshtein, V.E. Chelnokov. Electron. Lett., 24, 1213 (1988).
- [3] J.A. Edmond, J.W. Palmour, C.H. Carter. IEEE MTT 1991 Int. Semicond. Dev. Res. Symp. (Charlottesville, 1991).

- [4] J.J. Ebers. Proc. IRE, **40**, 1361 (1952).
- [5] М.М. Аникин, В.В. Евстропов, И.В. Попов, В.В. Растегаев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин. ФТП, **23**, 647 (1989).
- [6] М.М. Аникин, В.В. Евстропов, И.В. Попов, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин. ФТП, **23**, 1813 (1989).
- [7] M.M. Anikin, A.A. Lebedev, S.N. Pjatko, V.N. Soloviov, A.M. Strel'chuk. *Abstracts 3rd Int. Conf. on Amorphous a. Crystalline Silicon Carbide a. Other Group IV-IV Materials* (Washington, 1990) p. VI 6.
- [8] М.М. Аникин, А.С. Зубрилов, А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, А.Е. Черенков. ФТП, **25**, 479 (1991).
- [9] W.V. Munch, P. Hoesck. Sol. St. Electron., **21**, 479 (1978).
- [10] В.А. Кузьмин. *Тиристоры малой и средней мощности* (М., 1971).
- [11] В.Е. Челноков, Ю.А. Евсеев. *Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов* (М., 1973).
- [12] M.M. Anikin, I. Chuiko, M.G. Rastegaeva, A.L. Syrkin. *Abstracts 3rd Int. Conf. on Amorphous a. Crystalline Silicon Carbide a. Other Group IV-IV Materials* (Washington, 1990) p. IV 5.

Редактор Т.А.Полянская
