

©1995 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНИСТОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ SiC-6H

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 ноября 1994 г. Принята к печати 18 ноября 1994 г.)

В диапазоне температур $500 \div 800$ К исследованы основные параметры (токи и напряжения переключения и удержания) динисторных структур, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев SiC-6H, выращенных методом вакуумной сублимации.

1. Введение

Качество биполярных приборов во многом определяют величины коэффициентов инжекции и переноса носителей заряда. Поэтому малые значения диффузионных длин и времен жизни неосновных носителей заряда в карбиде кремния, значительные токи рекомбинации в p - n -структурах на SiC приводят к существенным трудностям в изготовлении биполярных приборов на основе этого материала. Тем не менее, наряду с созданием приборных структур из карбида кремния, принцип действия которых основан на использовании основных носителей заряда, не прекращаются исследования, связанные с разработкой и формированием биполярных приборов, в том числе динисторов и тиристоров. В конце 80-х годов появились сообщения об изготовлении первых динисторов [1,2], а позднее и тиристоров [3-5] на основе карбида кремния политипа 6H. Эпитаксиальные слои выращивались методом бесконтейнерной жидкофазной эпитаксии для динисторов [1,2] и методом осаждения из газовой фазы (CVD) для тиристоров [3-5]. Для приборов из карбида кремния существенным преимуществом является сохранение функциональных свойств при высоких температурах, однако результаты исследования полученных n - p - n - p -структур при температурах выше комнатной в перечисленных работах отсутствуют, за исключением [5].

В работах [6-7] авторы в краткой форме впервые сообщили о динисторах, работающих при температуре 800 К, для создания которых

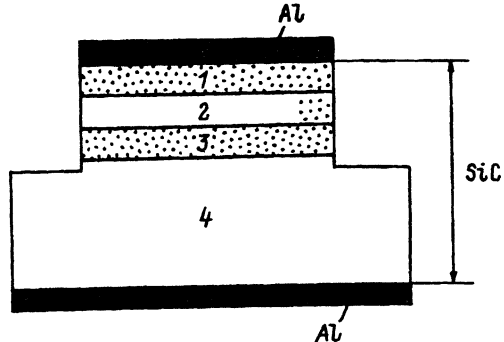


Рис. 1. Схема динисторной структуры: 1 — эпитаксиальный слой p -SiC, p -эмиттер, $0,9 \div 1,1$ мкм, $p = (7 \div 8) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$; 2 — эпитаксиальный слой n -SiC, n -база, $0,7 \div 0,8$ мкм, $n = 5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$; 3 — эпитаксиальный слой p -SiC, p -база, $0,5 \div 0,7$ мкм, $p = (2 \div 3) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$; 4 — подложка n -SiC, n -эмиттер, 450 мкм, $n = (3 \div 5) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Заштрихованы омические контакты из Al.

была использована технология выращивания эпитаксиальных слоев методом вакуумной сублимации в открытой ростовой системе. Данная работа посвящена более подробному исследованию параметров таких динисторных структур (токов переключения и удержания, напряжений пробоя, переключения и удержания) в диапазоне температур $500 \div 800$ К.

2. Формирование динисторных структур

В качестве подложек использовались пластины карбида кремния полнотипа 6H, выращенные методом Лэли, с концентрацией некомпенсированной донорной примеси $(3 \div 5) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Подложка являлась n -эмиттером четырехслойной структуры. На поверхности (0001) Si такой подложки методом вакуумной сублимации в открытой ростовой системе [8,9] последовательно выращивались базовые p - и n -области и эпитаксиальный слой p -типа проводимости (p -эмиттер динистора). Эпитаксиальные слои p -типа проводимости легировались алюминием. В процессе роста эпитаксиальных слоев n -типа проводимости никакой легирующей примеси в ростовую ячейку специально не вводилось. После ростового этапа часть структуры использовалась для определения толщин эпитаксиальных слоев при помощи приготовления шаровых шлифов. Для формирования омических контактов использовалась упрощенная технология. В качестве контакта к верхнему p -слою использовался алюминий, наносимый на поверхность нагретой до 900 К структуры методом термического распыления в вакууме. Контакт с обратной стороны подложки осуществлялся электроискровым методом с последующим напылением алюминия тем же методом. Одновременно алюминий служил маской в процессе формирования меза-структур методом реактивного ионно-плазменного травления в плазме SF $_6$ [10]. Размеры меза-структур составляли 215×185 мкм (площадь $4 \cdot 10^{-4}$ см 2). На рис. 1 схематично показана изготовленная $n-p-n-p$ -структура, а также уровни легирования и толщины эпитаксиальных слоев. Отметим, что выбор подложки в качестве эмиттера и достаточно высокая концентрация некомпенсированной акцепторной примеси в p -базе связаны с тем, что при использовании сублимационной эпитаксии существуют трудности как с созданием сильно легированных n -слоев, так и с выращиванием слабо легированных областей p -типа проводимости.

3. Результаты исследования динисторных структур

При комнатной температуре по виду вольт-амперной характеристики (ВАХ) полученные динисторные структуры можно разделить на три группы. В ВАХ структур первой группы ($\sim 2/3$ структур) при прямых смещениях переключения не наблюдалось. Максимальные напряжения в этом случае находились в диапазоне $60 \div 90$ В. На ВАХ структур второй группы ($\sim 1/3$) при прямых смещениях, после того как напряжение на структуре достигало максимальных значений ($U_{\max} \sim 15 \div 90$ В), наблюдалось его скачкообразное уменьшение до величин $(0.8 \div 0.9)U_{\max}$. Третью группу составляло незначительное число структур ($\sim 1 \div 2$ %), которые при комнатной температуре обладали динисторной характеристикой, т.е. переключались до напряжений удержания, приблизительно соответствующих падению напряжения на прямо смещенном $p-n$ -переходе. Однако такие структуры обладали значительными токами удержания, вследствие чего быстро деградировали.

В диапазоне температур $700 \div 800$ К $p-n-p-n$ -структуры второй и часть структур первой группы имели типичную динисторную характеристику. Основные параметры таких динисторных структур (токи, плотности токов и напряжения переключения и удержания) при 800 К приведены в таблице. Для сравнения в таблицу включены параметры

Параметры динисторных (тиристорных) структур

Параметры	Динистор,	Динистор	Тиристор	Тиристор	Тиристор [5]	
	800 К	[1,2], 300 К	[3], 300 К	[4], 300 К	300 К	773 К
Ток удержания, мА	0.1 ÷ 4.0	5	1	0.4	0.4	0.2
Плотность тока удержания, А/см ²	10 ÷ 600	300	—*	—*	—*	—*
Ток переключения, мА	0.01 ÷ 0.5	0.2 ÷ 4.0	0.5	~ 0.1**	—*	0.043
Плотность тока переключения, А/см ²	0.2 ÷ 1.3	1 ÷ 20	—*	~ 0.1**	—*	0.04
Напряжение удержания, В	1.6 ÷ 5	2.8	2.6	2.65	~ 2.6	1.8
Напряжение переключения, В	10 ÷ 55	10 ÷ 50	47	160	120	100
Напряжение обратного пробоя, В	30 ÷ 70	60 ÷ 85	—*	160	120	100

* данные отсутствуют;

** значение параметра определено по приведенной в работе ВАХ.

Примечание. Параметры тиристоров указаны для динисторного режима (при отсутствии тока через базовый электрод)

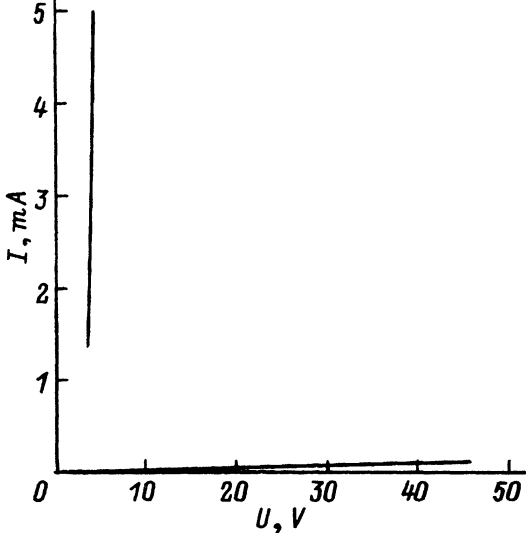


Рис. 2. Прямая вольт-амперная характеристика одной из структур при 800 К.

известных к настоящему времени динисторов и тиристоров на карбиде кремния. В открытом состоянии ВАХ полученных динисторных структур приблизительно соответствовала линейной аппроксимации $U = U_h + IR$, где U_h — напряжение удержания; $R = 100 \div 200$ Ом. Прямая ВАХ одной из структур приведена на рис. 2

Исследование распространения включенного состояния производилось путем визуального наблюдения в микроскоп люминесцирующей области со стороны p -слоя на структурах с удаленным верхним контактом. При токах, близких к току удержания, размер люминесцирующей области составлял $30 \div 40$ мкм, площадь $(0.7 \div 1.2) \cdot 10^{-5}$ см². Полное включение всей площади структуры происходило при токах $I = (1.5 \div 2.0)I_h$ (I_h — ток удержания).

Основные параметры динисторных структур (токи и напряжения переключения, токи и напряжения удержания) были исследованы при различных температурах. Полученные температурные зависимости указанных параметров приведены на рис. 3,4. Экспериментальные исследования проводились при постепенном уменьшении температуры от значения 800 К. Отметим, что измерение параметров, описывающих открытое состояние динистора, связано с некоторыми трудностями, которые определяются наличием особенностей в ВАХ динисторных структур. До температур ~ 500 К особенностей в ВАХ исследованных динисторов не наблюдалось. При некоторых температурах, меньших 500 К (различных для каждой из структур), происходило скачкообразное изменение тока и напряжения удержания (ток и напряжение переключения при этом сохраняли свои прежние значения), связанное с изменением расположения области первоначального включения. При удаленном верхнем контакте это явление хорошо заметно по изменению положения пятна люминесценции. В некоторых случаях наблюдалось одновременное свечение двух областей. На ВАХ это проявилось в том, что во включенном состоянии одновременно существовали два участка с различными значениями тока и напряжения удержания. Параметры вновь возникающей области первоначального включения отличались более низкими значениями тока и напряжения удержания.

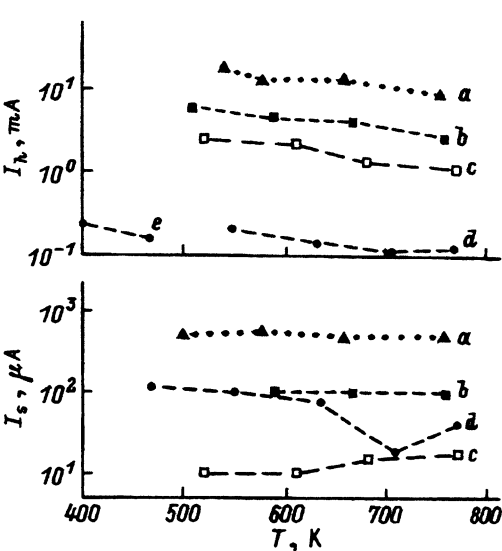


Рис. 3. Температурные зависимости токов переключения (I_s) и удержания (I_h) для различных динисторных структур. Пояснения — в тексте.

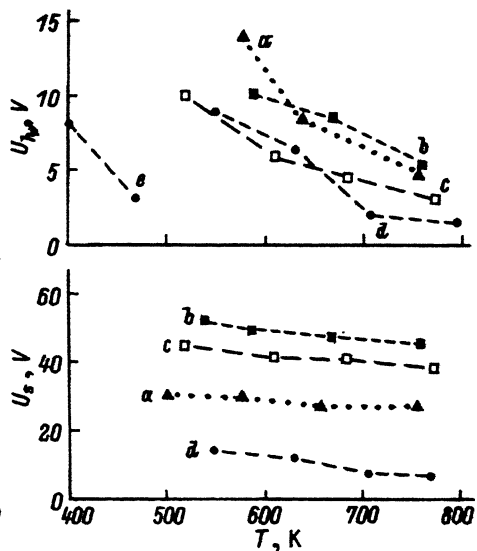


Рис. 4. Температурные зависимости напряжений переключения (U_s) и удержания (U_h) для различных динисторных структур. Одинаковые символы на рис. 3 и 4 соответствуют одной и той же структуре.

При температурах, меньших 500 К, в некоторых исследованных динисторных структурах наблюдалась последовательная смена нескольких областей первоначального включения (до $2 \div 3$ раз). Данные на рис. 3 и 4 приведены для отдельных областей первоначального включения на различных структурах (линии a, b, c). Для одной из структур приведены изменения параметров двух последовательно сменяющих друг друга областей первоначального включения (линии d и e).

Отметим наличие некоторой неоднородности толщин эпитаксиальных слоев по площади подложки, что приводит к различию в ширине баз динисторных структур. На рис. 1 указан диапазон толщин эпитаксиальных слоев, полученный при их измерении методом шаровых шлифов в различных точках образцов.

4. Обсуждение результатов

Для анализа экспериментальных данных используем двухтранзисторную модель динистора [11]. Условие удержания динистора во включенном состоянии в предположении, что увеличением прямого тока можно добиться того, чтобы коэффициенты инжекции были равны единице, может быть записано следующим образом:

$$\beta_n(W_n/L_p) = \beta_p(W_p/L_n) = 1, \quad (1)$$

где β_n, β_p — коэффициенты переноса через соответствующие базовые области; W_n, W_p, L_p, L_n — ширины базовых областей динистора и диффузионные длины неосновных носителей заряда (ННЗ). Если

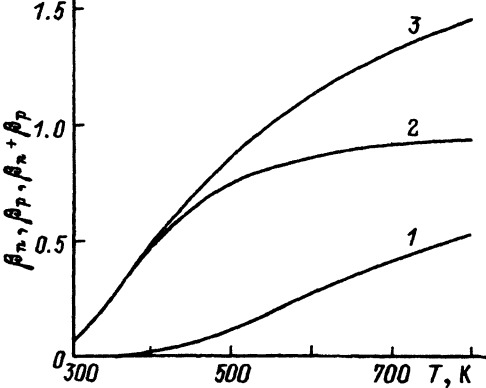


Рис. 5. Температурные зависимости коэффициентов переноса β_n (1), β_p (2), $\beta_n + \beta_p$ (3) (расчет). При расчете использованы температурная зависимость L_p из [12] и значения толщины базовых n - и p -областей динисторной структуры 0.7 и 0.5 μm соответственно.

учесть типичные для сублимационных структур величины диффузионных длин ННЗ [12], то легко видеть, что условие (1) может быть удовлетворено при комнатной температуре только в случае, когда ширины баз динистора меньше, чем в полученных структурах. Существование отдельных динисторных структур, которые переключались в открытое состояние при комнатной температуре, связано с неоднородностью толщин эпитаксиальных слоев, которая на периферии подложек может быть выше, чем указанная на рис. 1. По мнению авторов, появление эффекта переключения в $n-p-n-p$ -структурах первой и второй групп при высоких температурах связано с увеличением диффузионных длин ННЗ при повышении температуры [12]. Так как происходит увеличение диффузионных длин ННЗ, коэффициенты переноса также увеличиваются и условие (1) начинает выполняться (рис. 5). Для вычисления β_n и β_p использовалась температурная зависимость L_p из [12] и предполагалось, что температурная зависимость L_n имеет аналогичный характер. Отметим, что при 300 К диффузионные длины ННЗ в эпитаксиальных слоях, выращенных методом сублимации в открытой ростовой системе, в 2 ÷ 4 раза ниже, чем в эпитаксиальных слоях, полученных бесконтейнерной жидкофазной эпитаксией или осаждением из газовой фазы. Поэтому при одинаковых толщинах баз в сублимационных $n-p-n-p$ -структурах сложнее получить переключение при комнатной температуре.

Параметры полученных динисторных структур в диапазоне температур 500 ÷ 800 К в целом близки к параметрам аналогичных приборов (таблица). Отметим, что напряжения пробоя и переключения в нашем случае ниже, чем полученные в [4,5], что может быть связано с различием в уровнях легирования базовых областей (в [4,5] нет данных о концентрациях нескомпенсированной примеси в эпитаксиальных слоях, использованных для создания тиристоров). Кроме того, в работах [3-5] отсутствуют данные о величине области первоначального включения $n-p-n-p$ -структур, однако если предположить, что области первоначального включения сравнимы по порядку величины, то совпадают также и значения плотностей токов удержания. Единственной работой, в которой есть данные температурных измерений, является работа [5], в которой приведена ВАХ тиристора при 773 К. Как и в нашем случае, токи и напряжения удержания, напряжения переключения и пробоя уменьшались при повышении температуры.

Токи переключения и удержания. Величины плотностей тока удержания полученных динисторных структур — $(0.1 \div 6) \cdot 10^2 \text{ А/см}^2$ — приблизительно соответствуют оценкам [13,14], базирующимся на экспериментальных данных о рекомбинационных токах в p - n -структурах на SiC и диффузионных длинах в базовых областях. В этих работах для оценки возможных значений токов удержания в первом приближении предполагалось, что для удержания динистора в открытом состоянии необходимо выполнение условия равенства единице коэффициентов инжекции НЗ в базы динисторных структур ($\gamma \sim 1$). Из рис. 3, а видно, что токи удержания уменьшаются с ростом температуры (если исключить эффекты, связанные со сменой областей первоначального включения). Качественно это можно объяснить тем, что, во-первых, с ростом температуры участок $\gamma \sim 1$ сдвигается в сторону меньших токов и, во-вторых с ростом диффузионной длины НЗ и, соответственно, коэффициентов переноса β сумма (1) становится больше 1. Вследствие этого удержание тиристора во включенном состоянии становится возможным и без выхода γ на участок $\gamma \sim 1$, т.е. при меньших токах удержания.

В случае, когда токи утечки эмиттерных p - n -переходов незначительны, плотности токов переключения оказываются ниже плотностей токов удержания в силу действия следующих факторов: 1) в структурах с короткой базой, к которым относятся динистор из карбида кремния [13,14], коэффициенты инжекции перед переключением принимают максимальные значения; 2) коэффициенты переноса перед переключением (как при проколе, так и при пробое базы) также максимальны; 3) если переключение происходит вблизи напряжения пробоя, существенную роль играет умножение в коллекторном переходе. Как видно из рис. 3, токи переключения в большинстве структур действительно ниже токов удержания (зависимости a , b , c). Наличие утечек (омических шунтов) эмиттерных переходов приводит, наоборот, к увеличению токов переключения. Зависимость d рис. 3 указывает на значительную величину утечек. В некоторых структурах с высоким уровнем утечек величина тока переключения превышала величину тока удержания. Это характерно, например, для кремниевых тиристорных со специально шунтированным эмиттером [15].

Количественная оценка температурной зависимости токов удержания и переключения затруднена из-за отсутствия данных о величине и характере температурной зависимости некоторых параметров (например, о величинах L_n и ее температурной зависимости, о температурной зависимости времен жизни НЗ и т.д.).

Напряжения пробоя и переключения. Известно, что максимальные напряжения пробоя при $N_d - N_a \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в менее легированной базе составляют $\sim 100 \text{ В}$ ($T = 300 \text{ К}$) [16], при этом ширина слоя объемного заряда 0.5 мкм. Максимально наблюдавшиеся при комнатной температуре напряжения пробоя ($70 \div 100 \text{ В}$) хорошо согласуются с этой оценкой. При наличии отрицательного температурного коэффициента напряжения в p - n -структурах на основе SiC-6H напряжение пробоя уменьшается при увеличении температуры. Величины температурного коэффициента напряжения пробоя в таких структурах определены в [17,18] и составили $(2 \div 10) \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Максимальные напряжения пробоя динисторных структур при 800 К, следовательно, так-

же близки к ожидаемым величинам. Более низкие напряжения пробоя в первую очередь можно связать с тем, что пробой осуществляется по относительно низковольтным микроплазмам. В этих случаях также возможен прокол широкой базы (при толщинах n -базы ~ 0.4 мкм), так как, во-первых, существует некоторая неоднородность по толщинам эпитаксиальных слоев на площади подложки, во-вторых, велика погрешность определения толщин баз.

Величина напряжения переключения динистора из карбида кремния близка к напряжению его пробоя благодаря сильному шунтированию эмиттерных p - n -переходов за счет значительной величины тококомбинации [13,14]. Различие в $15 \div 20\%$ между напряжением переключения и напряжением пробоя может быть объяснено как с учетом того, что при обратном включении работают два обратнo смещенных p - n -перехода (p -база с $N_a - N_d \simeq (2 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ может держать обратные напряжения до $20 \div 30 \text{ В}$), так и меньшим напряжением пробоя микроплазм коллекторного перехода. Величина температурного коэффициента напряжения, вычисленная из экспериментальных данных для напряжения переключения в диапазоне температур $500 \div 800 \text{ К}$ составила $(5 \div 10) \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Это позволяет предположить, что уменьшение напряжения переключения с ростом температуры обусловлено наличием в исследованных структурах отрицательного температурного коэффициента напряжения пробоя.

Напряжения удержания. В первом приближении напряжение удержания динистора приблизительно равно падению напряжения на прямо смещенном p - n -переходе. Следовательно, температурная зависимость напряжения удержания определяется изменением высоты энергетического барьера p - n -перехода, которое может быть определено из вольт-фарадных характеристик. Для резких p - n -переходов на основе SiC-6H , полученных сублимационной эпитаксией, величина контактной разности потенциалов изменяется практически линейно от $2.3 \div 2.4 \text{ В}$ при 500 К до $1.8 \div 1.9 \text{ В}$ при 800 К [19]. Экспериментально наблюдаемые величины напряжений удержания близки к этим значениям только в диапазоне температур $700 \div 800 \text{ К}$ (рис. 3) и также растут с уменьшением температуры. При температурах ниже 700 К напряжение удержания с уменьшением температуры увеличивается быстрее, чем величина контактной разности потенциалов, и необходимы дополнительные исследования для выяснения причин, обуславливающих температурную зависимость напряжения удержания в полученных динисторных структурах.

5. Заключение

Использование сублимационной технологии позволило создать динисторные структуры, работающие при высоких температурах. При изменении температуры от 500 до 800 К полученные динисторы сохраняли функциональные свойства без ухудшения своих параметров, за исключением некоторого уменьшения напряжений пробоя и переключения (не более $15 \div 20\%$ в большинстве случаев). При 800 К напряжение переключения в лучших структурах достигало 50 В , напряжение пробоя при этом составляло $60 \div 70 \text{ В}$, напряжение удержания $1.6 \div 5 \text{ В}$, токи переключения $0.01 \div 0.5 \text{ мА}$, токи удержания $0.1 \div 4.0 \text{ мА}$.

Исследование температурных зависимостей основных параметров полученных авторами динисторных структур показало, что наиболее

критичным условием их функционирования как диносторов является рост напряжения удержания с уменьшением температуры. Верхний предел температурного диапазона (800 К) обусловлен использованием омических контактов на основе алюминия. Изготовление высокотемпературных омических контактов, например, на основе молибдена или вольфрама [20], позволит изучить поведение диносторных структур и при более высоких температурах.

Авторы благодарят К.В. Василевского, В.Е. Сизова, П.А. Иванова, Т.П. Самсонову за помощь в работе.

Работа была 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**, 16 (1987).
- [2] V.A. Dmitriev, S.N. Vainshtein, M.E. Levinshtein, V.E. Chelnokov. *Electron. Lett.*, **24**, 1032 (1988).
- [3] J.A. Edmond, J.W. Palmour, C.H. Carter. *IEEE Device Research Symposium* (Charlottesville, 1993).
- [4] J.W. Palmour, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter. In: *Institute of Physics Conference. Ser. 137: Silicon Carbide and Related Materials, Proceeding of the 5th Conference* (Washington D.C.), ed. by M.G. Spencer et al. (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993) p. 499.
- [5] J.W. Palmour, L.A. Lipkkin. *Trans. of the Second International High Temperature Electronics Conference* (USA, 1994) XI-7.
- [6] A.N. Andreev, A.M. Strel'chuk, N.S. Savkina, F.M. Snegov, V.E. Chelnokov. *Final Book of Abstract, E-MRS Spring Meeting* (Strasbourg, 1994) E-VII.5.
- [7] А.Н. Андреев, П.А. Иванов, А.М. Стрельчук, Н.С. Савкина, В.Е. Челноков, И.Р. Шапошников. ФТП, **28**, 1192 (1994).
- [8] М.М. Аникин, Н.Б. Гусева, В.А. Дмитриев, А.Л. Сыркин. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **10**, 1768 (1984).
- [9] M.M. Anikin, A.A. Lebedev, S.N. Pyatko, A.M. Strel'chuk, A.L. Syrkin. *Mater. Sci. Eng.*, **VII**, 113 (1992).
- [10] И.В. Попов, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **12**, 240, (1985).
- [11] С.Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [12] М.М. Anikin, A.S. Zubrilov, A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, A.E. Cherenkov. *Sov. Phys. Semicond.*, **25**, 289 (1991).
- [13] А.Н. Андреев, Ф.М. Снегов, А.М. Стрельчук, В.Е. Челноков. ФТП, **28**, 1287 (1994).
- [14] A.N. Andreev, M.M. Anikin, A.M. Strel'chuk, V.E. Chelnokov. In: *Institute of Physics Conference. Ser. 137: Silicon Carbide and Related Materials, Proceedings of the 5th Conference* (Washington D.C.), ed. by M.G. Spencer et al. (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993.) p. 609.
- [15] В.А. Кузьмин. *Туристоры малой и средней мощности* (М., Сов. радио, 1971).
- [16] А.П. Дмитриев, А.О. Константинов, Д.П. Литвин, В.И. Савкин. ФТП, **17**, 1093 (1993).
- [17] Г.В. Лисенков, В.П. Снегирев, А.С. Тагер. Письма ЖТФ, **10**, 215 (1984).
- [18] Ю.А. Водаков, К.Д. Демаков, Е.Б. Калинина, Е.Н. Мохов, М.Г. Рамм. ФТП, **21**, 1685 (1987).
- [19] М.М. Аникин, А.А. Лебедев, И.В. Попов, С.Н. Пятко, В.П. Растегаев, А.Л. Сыркин, Б.В. Паренков, В.Е. Челноков. ФТП, **22**, 133 (1988).
- [20] M.M. Anikin, M.G. Rastegaeva, A.L. Syrkin, I.V. Chuiko. *Proceeding in Physics*, ed. by G.L. Harris, M.G. Spencer, C.Y. Yang (Berlin, Springer, 1992).

An Investigation of SiC-6H dinistor structures

A.N. Andreev, A.M. Strel'chuk, N.S. Savkina, F.M. Snegov, V.E. Chelnokov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

Basic parameters of dinistors such as currents and voltages of switching and holding have been investigated within the temperature range of 500–800 K. The dinistor structures were prepared on the base of epitaxial layers grown by vacuum sublimation. The dinistor structures are functioning without parameters damages up to 800 K.
