

©1994 г.

ЗАРЯДОВЫЕ СВОЙСТВА МОП СТРУКТУРЫ Al-SiO₂-n-6H-SiC{(0001)Si}

П.А.Иванов, А.О.Константинов, В.Н.Пантелеев,
Т.П.Самсонова, 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.)

Исследованы зарядовые свойства МОП структуры на основе n-6H-SiC при комнатной температуре. Подзатворный диэлектрик толщиной 30 нм выращен термическим окислением эпитаксиального 6H-SiC с ориентацией (0001)Si (концентрация некомпенсированных доноров $2.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) в потоке сухого кислорода с добавлением паров трихлорэтилена.

Напряжение пробоя окисла, измеренное в режиме аккумуляции электронов, достигает 25 В, а напряженность поля пробоя $8 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. В режиме глубокого неравновесного обеднения МОП структуры выдерживают напряжения до 300÷350 В, что свидетельствует об экстремально низкой скорости образования слоя с инверсной дырочной проводимостью на границе раздела SiO₂/SiC.

Проанализирована малосигнальная комплексная проводимость МОП структуры на частотах 1 кГц и 1 МГц. Обнаружено экспоненциальное энергетическое распределение плотности поверхностных состояний в пределах запрещенной зоны 6H-SiC вблизи зоны проводимости. Интегральная плотность состояний $N_i \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, поверхностная плотность заряда, фиксированного в окисле, $N_f \approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Поверхностные ловушки с уровнями вблизи зоны проводимости классифицированы как акцептороподобные (сечение захвата электронов $\sim 10^{-18} \text{ см}^2$).

Введение

Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) широко используются для изучения и практического применения поверхностных явлений в полупроводниках. Как известно, проблемы создания стабильных МДП систем с небольшими плотностями объемного заряда в диэлектрике и поверхностного заряда на границе раздела диэлектрик-полупроводник наиболее успешно решены для системы термический SiO₂-кремний. Термическое окисление карбида кремния, также как и кремния, приводит к образованию на поверхности однородной пленки SiO₂ [1]. Окисление SiC проводят в сходных с окислением Si условиях: в потоке влажного или сухого кислорода, при температурах 900÷1200°С. Установлено, что по оптическим и электрофизическим

свойствам термический SiO₂ на SiC сходен с термическим SiO₂ на Si. Однако свойствам структур металл-окисел-полупроводник (МОП) на основе SiC до сих пор уделялось мало внимания. Отчасти это связано с тем, что лишь в недавнее время были разработаны методы выращивания совершенных эпитаксиальных слоев SiC с концентрацией примесей $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и менее. Что касается 6H-SiC, то имеющиеся сведения о свойствах МОП структур на его основе относятся только к ориентации (000 $\bar{1}$)C, наиболее легко поддающейся окислению [2-4]. При этом важно отметить, что кинетика окисления 6H-SiC имеет очень сильную ориентационную зависимость. Наибольшие различия в скорости роста окисла наблюдаются для плотно упакованных полярных (000 $\bar{1}$)C- и (0001)Si-граней кристалла. Так, при температуре 1420 К параболическая константа скорости окисления C-грани 6H-SiC ($1.7 \cdot 10^{-1} \text{ мкм}^2/\text{ч}$) на 2 порядка больше, чем Si-грани ($1.1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2/\text{ч}$) [1]. Найденная для ориентации (000 $\bar{1}$)C интегральная плотность поверхностных состояний (ПС) обычно превышала 10^{12} см^{-2} [2-4]. В данной работе изучались свойства МОП структуры на основе 6H-SiC{(0001)Si}. Можно ожидать, что окисление Si-грани даст лучшие результаты по сравнению с C-гранью, если допустить аналогию с окислением кремния, для которого наблюдаются одинаковые ориентационные зависимости скорости роста окисла, плотности фиксированного заряда и плотности ПС [5].

Объект и результаты исследования

Пленки 6H-SiC *n*-типа проводимости были выращены методом вакуумной сублимационной эпитаксии [6] на грани (0001)Si монокристаллических пластин *n*-SiC с удельным сопротивлением $\sim 0.1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для окисления отбирались слои толщиной около 10 мкм с концентрацией нескомпенсированных доноров в пределах $(2 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (*n*-тип проводимости получался за счет легирования азотом из остаточной атмосферы в вакуумной камере). Перед окислением пластины с эпитаксиальными слоями обрабатывались в трихлорэтилене и перекисно-аммиачном растворе с последующей отмывкой в деионизованной воде. Окисление проводилось в проточном кварцевом реакторе при температуре 1100°С в течение 5 ч. При этом в поток сухого кислорода (расход 500 см³/мин) вводились пары C₂HCl₃ так, как это делается при «хлорном» окислении кремния с целью уменьшения концентрации подвижных ионов и фиксированного заряда в окисле, а также плотности ПС [7-9]. Для формирования полевого электрода на окисленную поверхность напылялся слой алюминия; контактные площадки размером $0.175 \times 0.225 \text{ мм}^2$ изготавливались фотолитографией. Омическим контактом к *n*-подложке служил никель, нанесенный ионным распылением. После изготовления МОП структуры отжигались в аргоне (с целью стабилизации свойств) при температуре 450°С в течение часа.

Зарядовые свойства изготовленных МОП структур изучались путем анализа реактивной и активной составляющих входной комплексной проводимости на малом синусоидальном сигнале (50 мВ) с постоянным смещением (*C-V*- и *G-V*-характеристики). Для этого использовались мосты полных проводимостей Е8-2 (1 кГц) и Е7-12 (1 МГц), работающие по параллельной схеме замещения измеряемого импедан-

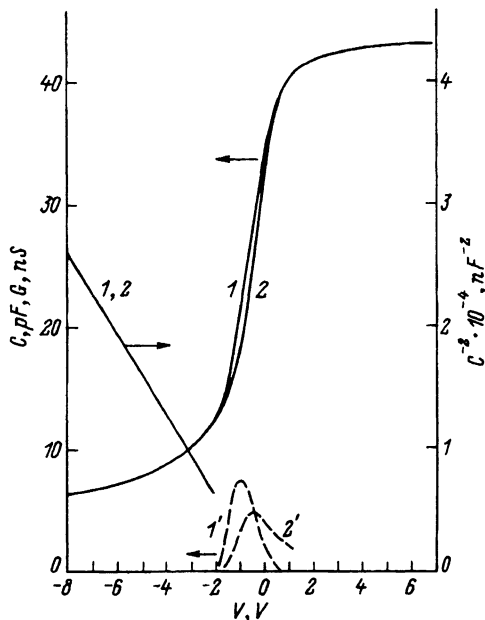


Рис. 1. $C-V$ - (1,2) и $G-V$ - (1',2') характеристики МОП структуры $\text{Al-SiO}_2\text{-}n\text{-}6H\text{-SiC}\{(0001)\text{Si}\}$, измеренные на частотах 1 КГц (1,1') и 1 МГц (2, 2').

Температура комнатная. $(N_D - N_A) = 2.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $d_{\text{ок}} = 30 \text{ нм}$, $S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$.

са. Измерения $C-V$ - и $G-V$ -характеристик проводились в темноте при комнатной температуре.

$C-V$ -характеристики МОП структур на частотах 1 кГц и 1 МГц (рис. 1) показывают глубокую модуляцию емкости постоянным напряжением на затворе. В процессе измерений не было замечено гистерезиса характеристик при изменениях смещения от положительных значений к отрицательным и обратно, а также релаксаций емкости после быстрых переключений $0 \rightarrow V$. Частотная дисперсия емкости не превышает 5%. В области положительных смещений структуры необратимо пробивались при напряжениях около 25 В, а в области отрицательных смещений они выдерживали без заметных утечек напряжения до $300 \div 350 \text{ В}$.

$G-V$ -характеристики МОП структур, также измеренные на частотах 1 кГц и 1 МГц, имеют колоколообразный вид (рис. 1). Максимум $G-V$ -характеристики на частоте 1 МГц смещен в сторону более положительных напряжений на затворе, а величина проводимости в максимуме приблизительно на 3 порядка больше.

Анализ экспериментальных результатов

Предварительные замечания. Анализ комплексной проводимости МОП структуры проведем на основе распространенной эквивалентной схемы (рис. 2), которая учитывает перезарядку ПС (см., например, [10]). На показанной схеме $C_{\text{ок}}$ — емкость окисного слоя, C_s — емкость области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника, C_t и G_t — зависящие от частоты реактивная и активная компоненты адмиттанса поверхностных состояний (активная компонента отражает задержку перезарядки ПС на выбранной частоте переменного сигнала). При этом по отношению к времени релаксации ПС различают низкочастот-

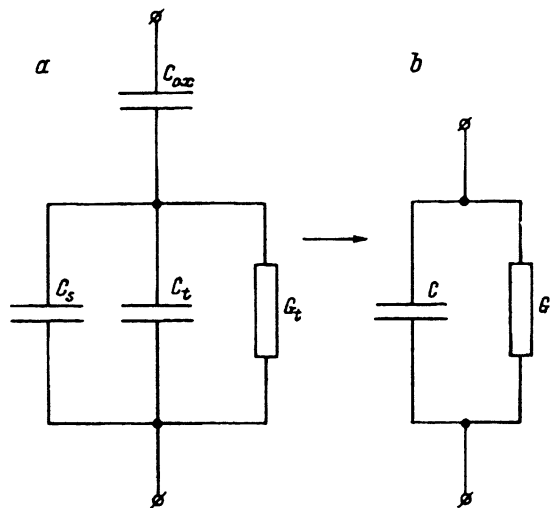


Рис. 2.

a — эквивалентная схема МОП структуры, учитывающая перезарядку поверхностных состояний на заданной частоте переменного сигнала; *b* — параллельная схема замещения.

ные (НЧ) $C-V$ -характеристики, когда $C_t \neq 0$, $G_t = 0$, и высокочастотные (ВЧ), когда $C_t = 0$, $G_t = 0$.

Оценим время релаксации ПС при комнатной температуре, используя формулу

$$\tau_t^{-1} = \sigma_t v n_i \exp\left(\frac{E_g/2 - \Delta E_t}{kT}\right), \quad (1)$$

где σ_t — сечение захвата носителей поверхностными ловушками, v — тепловая скорость носителей, n_i — концентрация собственных носителей, E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, ΔE_t — энергетическое положение ПС в запрещенной зоне относительно зоны основных носителей. Полагая $\sigma_t \approx 10^{-16} \text{ см}^2$ и $v \approx 10^7 \text{ см/с}$, для ловушек в середине запрещенной зоны 6H-SiC ($E_g = 3.0 \text{ эВ}$, $n_i \approx 10^{-6} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$) получаем $\tau_t \approx 10^{15} \text{ с}$. Это означает, в частности, что образование слоя с инверсной проводимостью за счет тепловой генерации неосновных носителей через ПС в середине запрещенной зоны практически недостижимо при комнатной температуре. Если положить $\tau_t < 10 \text{ с}$, то из (1) получаем $\Delta E_t < 0.6 \text{ эВ}$. Эти значения ΔE_t задают энергетическое положение тех ПС, плотность которых может быть определена путем анализа ВЧ $C-V$ -характеристик. Таким образом, $C-V$ -характеристика МОП структуры на основе 6H-SiC, измеренная при $T = 300 \text{ К}$ на некоторой частоте, по отношению к перезарядке распределенных по энергиям ПС будет трансформироваться при увеличении поверхностного изгиба зон от НЧ к ВЧ и далее к сугубо неравновесной.

C-V-характеристики в режиме аккумуляции и глубокого неравновесного обеднения. Для МОП структуры на основе n -полупроводника при положительных смещениях (режим аккумуляции электронов) $C_s \rightarrow \infty$, так что, согласно эквивалентной схеме и рис. 1, $C = C_{ox} = 43.2 \text{ пФ}$. Соответствующая толщина окисной пленки составляет $d_{ox} = \epsilon_{ox} S / C_{ox} = 30 \text{ нм}$ ($\epsilon_{ox} = 3.36 \cdot 10^{-13} \text{ Ф/см}$ — диэлектрическая проницаемость SiO_2 , $S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ — площадь затвора). В

режиме аккумуляции все напряжение, приложенное к затвору, падает на диэлектрическом слое, поэтому по величине напряжения пробоя ($V_b = 25$ В) можно вычислить напряженность поля пробоя окисла: $E_b = V_b/d_{\text{окс}} = 8 \cdot 10^6$ В/см. При больших отрицательных смещениях $C-V$ -характеристику МОП структуры на основе n - $6H$ -SiC можно рассматривать как неравновесную. В этом случае концентрация неосновных носителей и концентрация зарядов в ПС не успевают за изменением напряжения смещения, так что форма $C-V$ -характеристик задается только неравновесным обеднением приповерхностной области $6H$ -SiC электронами: $d(C^{-2}) = d(C_s^{-2}) \sim dV/(N_D - N_A)$, где $(N_D - N_A)$ — концентрация нескомпенсированных доноров в полупроводнике. Действительно, уже при напряжениях $V < -2$ В зависимость $C^{-2}(V)$ оказалась линейной (рис. 1); рассчитанная по ее наклону концентрация нескомпенсированных доноров $(N_D - N_A) = 2.8 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Примечателен тот факт, что неравновесное состояние структуры (по отношению к образованию дырочного инверсионного слоя) сохраняется при увеличении отрицательного напряжения до $300 \div 350$ В (при образовании инверсионного слоя пробой окисла имел бы место уже при напряжениях ~ 30 В).

ВЧ $C-V$ -характеристика в режиме слабого обеднения (область частотной дисперсии емкости МОП структуры). Цель последующего анализа — определить энергетическое распределение плотности ПС вблизи зоны проводимости $6H$ -SiC. Согласно методу Термана [10], это достигается путем сравнения теоретической $C-V$ -характеристики идеальной МОП структуры (без учета ПС) с экспериментальной ВЧ $C-V$ -характеристикой. При этом зависимость плотности ПС (D_t) от поверхностного изгиба зон в полупроводнике (φ_s) определяется из выражения

$$qD_t(\varphi_s) = C_{\text{окс}} \left(\left| \frac{dV}{d\varphi_s} \right| - 1 \right) - C_s(\varphi_s), \quad (2)$$

где q — заряд электрона, φ_s — величина поверхностного изгиба зон, соответствующая заданному напряжению V на затворе. На практике соотношение (2) было использовано следующим образом. Для ряда значений φ_s были вычислены соответствующие значения $C_s(\varphi_s)$ и затем $C(V)$ (рис. 3) по формулам теории идеальной МОП структуры [10]. Далее, пользуясь тем обстоятельством, что ВЧ емкость определяется только величинами C_s и $C_{\text{окс}}$ (см. эквивалентную схему), мы провели калибровку измеренной ВЧ характеристики по величинам поверхностного изгиба зон (рис. 4, а). Необходимые для расчета по формуле (2) значения производной $dV/d\varphi_s$ были определены графическим дифференцированием зависимости $V(\varphi_s)$. Рассчитанная данным способом плотность состояний (рис. 4, б) экспоненциально падает с ростом абсолютной величины φ_s : $D_t(\varphi_s) = D^* \exp(A^*q\varphi_s)$. Характерно, что как вид, так и параметры распределения ($D^* = 3 \cdot 10^{12}$ см $^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и $A^* = 12$ эВ $^{-1}$) оказались близкими к тем, которые обычно наблюдают для границы раздела SiO $_2$ /Si. Далее, поскольку величины $D_t(\varphi_s)$ соответствуют средним величинам плотности ПС $D_t(\Delta E_t)$ с энергиями ΔE_t вблизи уровня Ферми на границе раздела, от зависимости $D_t(\varphi_s)$

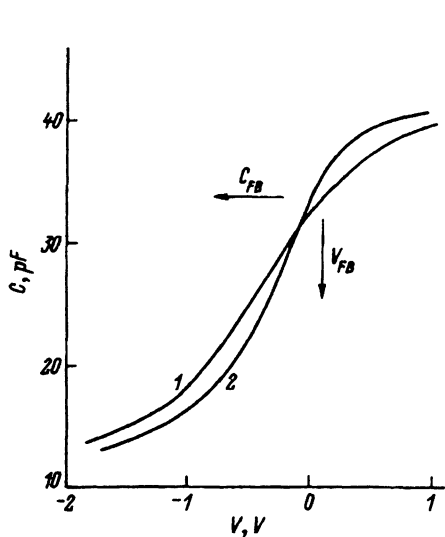


Рис. 3. ВЧ $C-V$ -характеристика в области частотной дисперсии емкости МОП структуры (1) и теоретическая $C-V$ -характеристика идеальной МОП структуры (2).

($N_D - N_A$) = $2.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $d_{\text{ок}} = 30 \text{ нм}$, $S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. Напряжение плоских зон $V_{FB} = +0.1 \text{ В}$. Плотность фиксированного заряда $N_f \approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

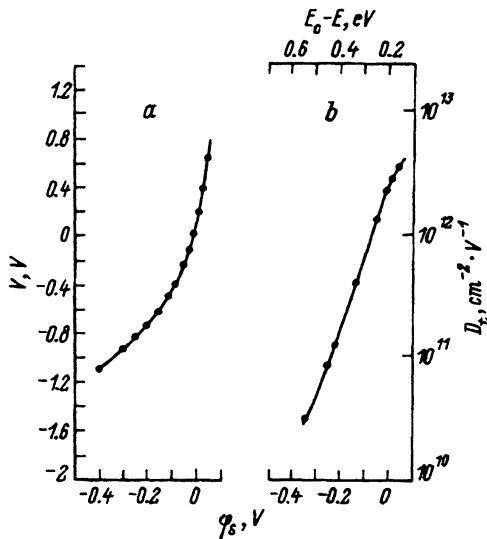


Рис. 4. а — зависимость поверхностного изгиба зон φ_s от напряжения V_s , приложенного к затвору; б — энергетическое распределение плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне 6H-SiC.

Интегральная плотность ПС $N_t \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Сечение захвата электронов $\sim 10^{-18} \text{ см}^2$.

легко перейти к энергетическому распределению $D_t(\Delta E_t)$ (рис. 4, б), сопоставив каждому значению φ_s энергию $\Delta E_t = q|\varphi_s| + E_{F_0}$, где $E_{F_0} = 0.2 \text{ эВ}$ — рассчитанное по статистике электронов положение уровня Ферми в нейтральном объеме n -6H-SiC относительно зоны проводимости.

Оценим порядок величины и знак заряда Q_f , фиксированного в окисле, по сдвигу напряжения плоских зон V_{FB} на ВЧ характеристике (как видно из рис. 3, V_{FB} составляет всего $+0.1 \text{ В}$). Сдвиг напряжения плоских зон задается тремя слагаемыми:

$$V_{FB} = V_{FBf} + V_{FBt} - \Delta\varphi_{ms}, \quad (3)$$

где $V_{FBf} = -Q_f/C_{\text{ок}}$ — сдвиг за счет фиксированного заряда; $V_{FBt} = -Q_{t0}/C_{\text{ок}}$ — сдвиг за счет заряда, захваченного на ПС при $\varphi_s = 0$; $\Delta\varphi_{ms}$ — сдвиг за счет разности работ выхода электрона из полупроводника и металла. Полагая, что знак заряда в ПС при $\varphi_s = 0$ отрицательный, в случае экспоненциального распределения ПС получаем $V_{FBt} = qD^*S/A^*C_{\text{ок}} = +0.4 \text{ В}$ (интегральная плотность ПС $N_t = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Далее, считая работу выхода из алюминия равной 4.3 эВ , а из n -6H-SiC — 4.5 эВ [11] ($\Delta\varphi_{ms} = +0.2 \text{ В}$), получаем из равенства (3) $V_{FBf} = -0.1 \text{ В}$. Соответствующий заряд Q_f — положительный, а его поверхностная плотность составляет $N_f \approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Адмиттанс поверхностных состояний. Анализ адмиттанса ПС дает возможность определить, кроме плотности ПС, сечение захвата на

них основных носителей, а также тип ловушек захвата (по величине сечения). В случае квазинепрерывного распределения ПС по энергиям емкостная и активная компоненты адмиттанса ПС связаны с параметрами ПС следующими соотношениями [10]:

$$C_t = qD_t S \frac{\arctg \Omega}{\Omega}, \quad (4)$$

$$\frac{G_t}{\omega} = qD_t S \frac{\ln(1 + \Omega^2)}{2\Omega}, \quad (5)$$

$$\Omega = \frac{\omega}{\sigma_t v n_s}, \quad (6)$$

где n_s — поверхностная концентрация электронов, определяющаяся их равновесной концентрацией в объеме (n_0) и величиной поверхностного изгиба зон:

$$n_s = n_0 \exp\left(-\frac{q\varphi_s}{kT}\right). \quad (7)$$

Как видно из формул (4)–(6), компоненты адмиттанса ПС содержат в принципе одинаковую информацию о ПС. Однако анализ активной компоненты более прост, поскольку она явно выражается через компоненты входной комплексной проводимости (C и G):

$$G_t = \frac{G}{(1 - C/C_{ox})^2}. \quad (8)$$

Нетрудно убедиться, что G_t/ω проходит через максимум при $\Omega(V) = 1.98$, а величина проводимости в максимуме $(G_t/\omega)_{\max} = 0.4qD_t$. В нашем случае зависимость G_t/ω , соответствующая частоте 1 кГц, проходит через максимум при $V = -0.6$ В ($\varphi_s = -0.15$ В); при этом $D_t = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ (что совпадает с величиной D_t , полученной методом Термана), а сечение захвата $\sigma_t = 3.5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$. Столь малое сечение захвата электронов поверхностными ловушками свидетельствует об их акцептороподобной природе (отгалкивающие центры). Отметим, что величины сечения захвата аналогичными ловушками на границе раздела SiO_2/Si составляют $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$, т.е. на 2 порядка больше. Однако это вполне объяснимо, поскольку $6H\text{-SiC}$ — существенно более широкзонный полупроводник, чем кремний.

Свойства МОП структур, сформированных на полярных гранях $n\text{-}6H\text{-SiC}$.

Структура	d_{ox} , нм	E_b , В/см	V_{FB} , В	N_t , см^{-2}
Al-SiO ₂ - $n\text{-}6H\text{-SiC}\{(000\bar{1})\text{C}\}$ (сухой кислород [4])	15	$2 \cdot 10^6$	>5	$>10^{13}$
Al-SiO ₂ - $n\text{-}6H\text{-SiC}\{(0001)\text{Si}\}$ (сухой кислород + пары трихлорэтилена)	30	$8 \cdot 10^6$	0.1	$2 \cdot 10^{11}$

Заклучение

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что как кристаллографическая ориентация, так и условия окисления играют важную роль в формировании свойств системы термический окисел-SiC (аналогично системе SiO₂-Si). Это можно видеть из таблицы, в которой приведены некоторые сравнительные данные по свойствам МОП структур на основе *n*-6H-SiC{(0001)Si} и *n*-6H-SiC{(000 $\bar{1}$)C} [4], изготовленных по разным технологиям. Главный вывод состоит в том, что применительно к карбиду кремния, по-видимому, перспективны все те методы планарной МОП технологии, которые используются в кремниевой электронике.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства обороны США.

Список литературы

- [1] J.B. Petit, J.A. Powell, L.B. Matus. *1st HiTEC Transactions*, ed. by D.B. King., E.V. Thome (Albuquerque NM, 1991) p. 198.
- [2] A. Suzuki, H. Ashida, M. Furui, K. Mameno, H. Matsunami. *Japan. J. Appl. Phys.*, **21**, 579 (1982).
- [3] R.S. Harris. *Sol. St. Electron.*, **12**, 103 (1976).
- [4] П.А. Иванов, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова, А.В. Суворов, В.Е. Челноков. *ФТП*, **27**, 1146 (1993).
- [5] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. *Электроника слоев SiO₂ на кремнии* (Л., 1988). 304 с.
- [6] А.О. Konstantinov. *Abstracts of ICSCRM-93* (Washington DC, 1993) p. A8
- [7] G.J. Declerck, T. Hotteri, G.A. May, J. Beaudouin, J.D. Meindl. *J. Electrochem. Soc.*, **122**, 436 (1975).
- [8] D.L. Heald, R.M. Das; R.P. Khosla. *J. Electrochem. Soc.*, **123**, 302 (1976).
- [9] M.C. Chen J.W. Hill. *J. Electrochem. Soc.*, **115**, 223 (1972).
- [10] В.Н. Овсюк. *Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда*, (Новосибирск, 1984).
- [11] Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. В кн.: *Справочник по электротехническим материалам* (М., 1988) т. 3, разд. 19, p. 446.

Редактор Л.В. Шаронова

Charge Properties of the Al-SiO₂-*n*-6H-SiC(0001)Si MOS Structure

P.A. Ivanov, A.O. Konstantinov, V.N. Panteleev, T.P. Samsonova and V.E. Chelnokov

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

Ai-SiO₂-*n*-6H-SiC(0001)Si MOS Structure has been fabricated and evaluated at room temperature. The energy distribution of the trap density near the conduction band of 6H-SiC was determined using the Terman technique. The trap density was found to drop exponentially from the c-band toward the mid-gap. The total density of traps does not exceed $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and the fixed oxide change is $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. The carrier capture cross-section was estimated to be $\sim 10^{-18} \text{ cm}^2$.