

УДК 621.382

А. И. Михайлов, А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

С. А. Решанов, А. Шёнер
Компания «Ascatron AB» (Швеция)

Управление электрофизическими свойствами канала силовых МДП-транзисторов на 4H-SiC

Представлены и обобщены различные технологические способы контроля электрофизических свойств канала силового МДП-транзистора на карбиде кремния, такие как формирование подзатворного диэлектрика термическим окислением или осаждением с последующим отжигом, введение элементов V группы на границу раздела различными способами, а также заглубление канала транзистора при помощи газовой эпитаксии. Проведено сравнение характеристик латеральных МДП-транзисторов, сформированных на двух типах р-областей: на низколегированном эпитаксиальном слое с концентрацией алюминия $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и высоколегированной р-области с концентрацией алюминия $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Полученные результаты позволяют заключить, что для увеличения подвижности носителей заряда в канале транзистора, снижения его порогового напряжения включения и увеличения напряженности поля пробоя подзатворного диэлектрика предпочтительными подходами являются: формирование р-области транзистора на низколегированном эпитаксиальном слое, имплантация фосфора или мышьяка в канал транзистора перед термическим ростом подзатворного диэлектрика в комбинации с пассивацией поверхностных состояний введением атомов азота на границу раздела 4H-SiC/SiO₂.

Силовая электроника, карбид кремния, МДП-транзистор, граница раздела, подзатворный диэлектрик, канал, подвижность

Электрофизические свойства карбида кремния 4H-политипа (4H-SiC) позволяют создавать электронную компонентную базу (ЭКБ) силовой электроники на его основе с превосходными параметрами. К преимуществам ЭКБ силовой электроники на 4H-SiC по сравнению с кремниевой относятся: низкое сопротивление дрейфовой области, низкие динамические потери, высокая плотность мощности, высокая рабочая температура и высокая рабочая частота. Это позволяет реализовать экстремальные режимы эксплуатации силовых электронных систем, а также снизить их массогабаритные параметры и стоимость за счет увеличения их рабочей частоты, использования пассивных компонентов меньшего размера и отказа от принудительного охлаждения электронных компонентов. В настоящее время силовые МДП-транзисторы (MOSFET) на 4H-SiC вытесняют МДП-транзисторы, биполярные транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) на кремнии в диапазоне напряжений 0.6...4 кВ, поскольку они являются

более высокочастотными, управляемыми напряжением приборами с низкими статическими и динамическими потерями [1], [2].

Несмотря на существенное развитие технологии изготовления силовых приборов на 4H-SiC в последние десятилетия, электрофизические свойства границы раздела 4H-SiC/SiO₂ и подзатворного диэлектрика (ПД), обуславливающие высокое сопротивление канала, не позволяют полностью реализовать потенциал МДП-транзисторов на 4H-SiC [3]. Подвижность носителей заряда на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ существенно ниже, чем в объеме 4H-SiC, что в основном обусловлено высокой плотностью состояний на границе раздела. Среди способов снижения сопротивления канала МДП-транзистора [4], [5] можно выделить:

- 1) уменьшение плотности состояний (ПС) на границе раздела 4H-SiC/SiO₂;
- 2) увеличение концентрации свободных носителей заряда в канале;
- 3) уменьшение влияния ПС на транспорт электронов.

Одним из широко распространенных подходов для уменьшения плотности состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ является их пассивация введением на границу раздела элементов V группы (N или P) [6], [7]. Введение азота на границу раздела 4H-SiC/SiO₂ в ходе термического окисления 4H-SiC или отжига слоя SiO₂ в азотсодержащей атмосфере (NO, N₂O) [3], [8], [9], а также имплантацией ионов азота перед термическим окислением 4H-SiC [10], [11] или окислением тонкого слоя нитрида кремния [12], позволяет увеличить подвижность носителей заряда в канале МДП-транзистора до 20...30 см² · В⁻¹ · с⁻¹. Увеличение подвижности носителей заряда до 60...100 см² · В⁻¹ · с⁻¹ достигается введением фосфора на границу раздела 4H-SiC/SiO₂ в ходе отжига слоя SiO₂ в фосфорсодержащей атмосфере (POCl₃) [7], [13]–[15] или имплантации ионов фосфора перед термическим ростом ПД [16].

Кроме пассивации поверхностных состояний атомы азота и фосфора оказывают влияние на транспорт носителей заряда в канале транзистора за счет легирования приповерхностной области канала [17], [18]. Легирование тонкого приповерхностного слоя канала элементами V группы (N, P, Sb, As) позволяет увеличить концентрацию свободных носителей заряда в инверсионном слое, за счет чего снижается его сопротивление [19]–[21].

Контролируя уровень легирования канала и его структуру, например, за счет заглубления канала транзистора [22], можно достичь снижения влияния ПС на транспорт электронов. В МДП-транзисторе с заглубленным каналом электроны концентрируются не у границы раздела, как в обычных МДП-транзисторах, а на некотором удалении от нее за счет меньшей напряженности поперечного электрического поля и большей толщины инверсионного слоя, что обуславливает уменьшение кулоновского рассеяния свободных носителей заряда на заряженных ловушках и, соответственно, увеличение подвижности носителей заряда [23].

Особенности технологии эпитаксиального роста 4H-SiC, такие как возможность легирования *in-situ* в широком диапазоне концентрации примеси и низкая концентрация дефектов [24], а также возможность наращивания эпислоев поверх других приборных слоев, позволяют применять эту технологию при формировании более сложных приборных структур, в том числе при

изготовлении МДП-транзисторов с эпитаксиальным заглубленным каналом. В данной статье рассмотрены особенности транспорта электронов в канале латеральных МДП-транзисторов на 4H-SiC с ПД, изготовленным различными способами, а также в транзисторах с эпитаксиальным заглубленным каналом.

Методика эксперимента. Следующие операции были использованы при формировании ПД и канала МДП-транзисторов: эпитаксиальный рост, имплантация фосфора (P) или мышьяка (As), осаждение слоя SiO₂ или двух слоев Si₃N₄ и SiO₂ методом PECVD, термическое окисление или быстрый отжиг в O₂ или N₂O, отжиг в фосфорсодержащей атмосфере (POCl₃) и осаждение слоя SiO₂ методом ALD. Следующие технологии формирования ПД и канала МДП-транзистора были разработаны и практически реализованы (таким же образом далее обозначаются образцы с ПД, изготовленным по соответствующей технологии):

1) O2 – термическое окисление в O₂ (1150 °C, 9 ч);

2) D-O2 – нанесение слоя SiO₂ толщиной 45 нм методом плазмохимического газофазного осаждения (PECVD) с последующим термическим окислением в O₂ (1150 °C, 1 ч);

3) N2O – термическое окисление в N₂O (1250 °C, 14 ч);

4) D-N2O – нанесение слоя SiO₂ толщиной 45 нм методом PECVD с последующим термическим окислением в N₂O (1250 °C, 3 ч);

5) AGON – нанесение слоя Si₃N₄ толщиной 5 нм методом PECVD, нанесение слоя SiO₂ толщиной 45 нм методом PECVD с последующим термическим окислением в O₂ (1250 °C, 1 ч);

6) POCL – формирование слоя SiO₂ толщиной 5 нм методом термического окисления в O₂ (1150 °C, 30 мин) с последующим отжигом в POCl₃ (950 °C, 40 мин) и нанесением слоя SiO₂ толщиной 45 нм методом ALD;

7) P-O2 – ионная имплантация P в SiC с энергией 20 кэВ и дозой 3 · 10¹² см⁻² (P-O2-1), 20 кэВ и 3 · 10¹³ см⁻² (P-O2-2), 35 кэВ и 3 · 10¹² см⁻² (P-O2-3), 35 кэВ и 3 · 10¹³ см⁻² (P-O2-4) с последующим термическим окислением в O₂ (1150 °C, 9 ч);

8) P-N2O – имплантация P в SiC с энергией 25 кэВ и дозой 1 · 10¹³ см⁻² с последующим термическим окислением в N₂O (1250 °C, 14 ч);

9) As-N2O – имплантация As в SiC с энергией 45 кэВ и дозой $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ с последующим термическим окислением в N₂O (1250 °C, 14 ч);

10) BC – рост двух эпислоев 4H-SiC *n*-типа ($[N] \sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и *p*-типа ($[Al] \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 50 нм каждый на высоколегированной *p*-области ($[Al] \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). ПД был сформирован по технологии N2O.

Для исследования электрических свойств ПД и границы раздела 4H-SiC/SiO₂ были использованы МДП-структуры с полупроводниками *n*- и *p*-типов диаметром 0.3...0.5 мм (рис. 1, *a* и *b* соответственно) и латеральные МДП-транзисторы с шириной и длиной канала 40 и 250 мкм соответственно, И – исток, З – затвор, С – сток (рис. 1, *в* и *г*). Толщина ПД контролировалась измерением емкости МДП-структур в режиме аккумуляции и составила около 50 нм для всех технологий. Структуры были сформированы на двух типах подложек 4H-SiC (0001) с 4-градусной разориентацией: с низколегированным эпитаксиальным слоем *p*-типа толщиной 5 мкм с $[Al] \sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (низколегированная *p*-область, рис. 1, *в*) и с эпитаксиальным слоем *n*-типа толщиной 14 мкм с $[N] \sim 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в котором *p*-области с $[Al] \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ были сформированы ионной имплантацией (высоколегированная *p*-область, рис. 1, *г*). Профиль распределения Al имел прямоугольную форму с глубиной залегания 1 мкм. Высоколегированная

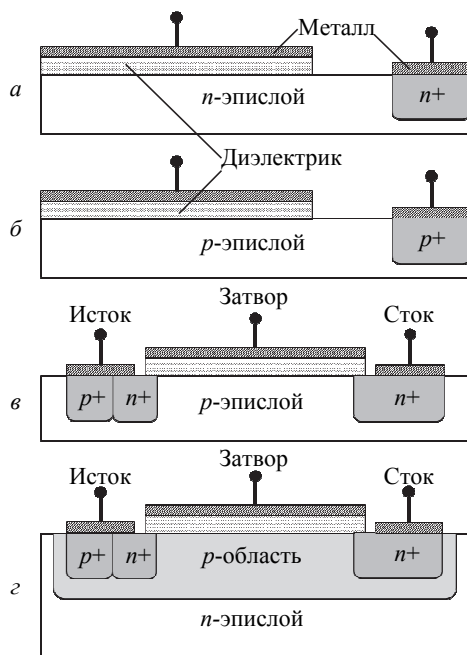


Рис. 1

p-область обычно используется при формировании силовых вертикальных МДП-транзисторов с высоким напряжением пробоя, для того чтобы исключить возможность прокола *p*-области в запертом состоянии транзистора, когда он представляет собой обратносмещенный *p-n*-переход.

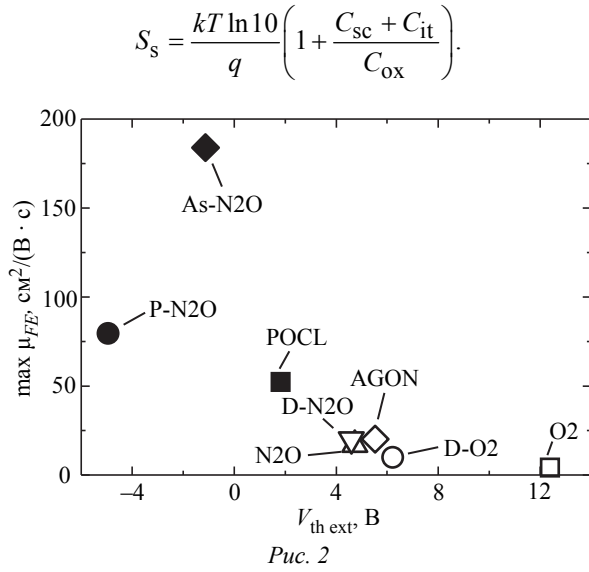
Передаточные характеристики изготовленных латеральных транзисторов были измерены при комнатной температуре и напряжении «сток–исток» $V_{ds} = 0.1 \text{ В}$. Пиковое значение подвижности носителей заряда ($\max \mu_{FE}$) и пороговое напряжение ($V_{th \text{ ext}}$) были получены из производной передаточных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и экстраполяцией линейного участка ВАХ на ось абсцисс соответственно. Кроме того, диэлектрическое качество ПД было оценено при помощи метода нулевого времени пробоя диэлектрика (метод Time Zero Dielectric Breakdown – TZDB), заключающегося в воздействии на МДП-структуру линейно возрастающим напряжением и измерении ее напряжения пробоя с последующим анализом Вейбулла [25], [26]. Напряженность поля пробоя ПД (E_b) была рассчитана из ВАХ при комнатной температуре, за условие пробоя ПД была принята плотность тока через МДП-структуру 0.1 А/см^2 .

Экспериментальные результаты. Исследование электрофизических свойств ПД и канала МДП-транзисторов показало, что формирование ПД по технологии O2 на низколегированной *p*-области приводит к высокому пороговому напряжению $V_{th \text{ ext}}$ и низкой подвижности носителей заряда в канале $\mu_{FE} \sim 4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что обусловлено высокой плотностью поверхностных состояний D_{it} на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ (рис. 2). Плотность состояний, полученная из подпороговой ВАХ в полулогарифмическом масштабе, составила $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ (см. таблицу). Обратный наклон подпороговой ВАХ S_s [В/дек], построенной в полулогарифмическом масштабе, показывает, на сколько нужно изменить напряжение на затворе, чтобы ток стока изменился на один порядок:

$$S_s = \frac{dV_{gs}}{d(\lg I_{ds})},$$

где V_{gs} – напряжение на затворе; I_{ds} – ток стока.

Обратный наклон подпороговой ВАХ определяется дифференциальной емкостью полупроводника C_{sc} , емкостью ПД C_{ox} и емкостью интерфейсных ловушек C_{it} [27]:



Из наклона подпороговой ВАХ можно получить плотность состояний на границе раздела «диэлектрик–полупроводник»:

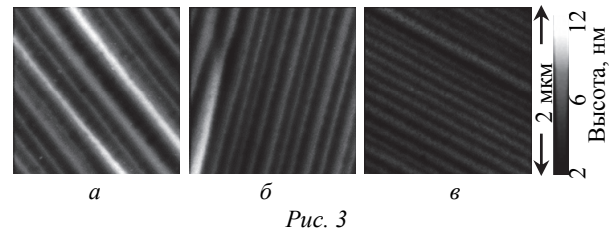
$$D_{it} = \frac{C_{it}}{q^2} = \frac{C_{ox}}{q^2} \left(\frac{qS_s}{kT \ln 10} - 1 \right) - \frac{C_{sc}}{q^2},$$

где q – элементарный заряд; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Отметим, что данный способ вычисления плотности ПС не учитывает флуктуации поверхностного потенциала на интерфейсе «диэлектрик–полупроводник».

Введение азота на границу раздела 4Н-SiC/SiO₂ во время термического роста ПД (N2O) позволяет уменьшить пороговое напряжение транзистора и увеличить μ_{FE} до 17 см²/(В · с) за счет снижения плотности ПС. Формирование ПД методами осаждения (D-N2O, AGON, D-O2) увеличивает μ_{FE} по сравнению с технологиями термического роста (N2O, O2) за счет снижения концентрации углеродных кластеров, накаплива-

ющихся на границе раздела 4Н-SiC/SiO₂ в ходе окисления, и связанных с ними электронных состояний, а также уменьшения шероховатости поверхности (R_a) на границе раздела, что подтверждается АСМ-исследованием поверхности SiC после удаления ПД. Значение R_a для процесса O2 составляет 1.9 нм (рис. 3, а), для процесса N2O – 1.4 нм (рис. 3, б), для процесса AGON – 0.9 нм (рис. 3, в). Это связано с тем, что в ходе короткого этапа отжига осажденного ПД в кислородсодержащей атмосфере окисляется лишь тонкий поверхностный слой SiC и морфология поверхности изменяется незначительно, в то время как в ходе длительного термического роста ПД окисляется ~25 нм (O2, N2O) и на границе раздела 4Н-SiC/SiO₂ проявляются ступени роста.



Отжиг термически выращенного или осажденного слоя SiO₂ в атмосфере POCl₃ является распространенным методом увеличения подвижности носителей заряда в канале транзистора на 4Н-SiC. Однако высокая концентрация фосфора в объеме ПД приводит к высокому встроенному в диэлектрик заряду, уменьшению напряженности поля пробоя, увеличению тока утечки через затвор и снижению стабильности порогового напряжения транзистора. Можно избежать этих нежелательных эффектов, формируя ПД в несколько этапов (образец POCL), включающих отжиг тонкого слоя SiO₂ в атмосфере POCl₃ с последующим осаждением слоя SiO₂, и при этом

Транзистор	На низколегированной p -области				На высоколегированной p -области			
	$\max \mu_{FE}$, см ² · эВ ⁻¹	$V_{th \text{ ext}}$, В	S_s , мВ/дек	$D_{it} \cdot 10^{12}$, см ⁻² · эВ ⁻¹	$\max \mu_{FE}$, см ² · эВ ⁻¹	$V_{th \text{ ext}}$, В	S_s , мВ/дек	$D_{it} \cdot 10^{12}$, см ⁻² · эВ ⁻¹
O2	3.9	12.4	1275	19.7	0.03	18.6	2876	48.4
D-O2	9.9	6.2	728	14.9	–	–	–	–
N2O	17.1	4.7	481	7.4	3.2	16.1	1604	28.4
D-N2O	20.1	4.6	492	9.6	10	11.6	619	12.2
AGON	20.2	5.5	562	9.2	11.9	12.8	782	14.4
POCL	52.3	1.8	561	7.5	–	–	–	–
P-N2O	79.5	–4.9	354	4.9	13.1	9.9	651	10.6
As-N2O	184	–1.1	359	5.0	8.4	13.5	1068	18.4
BC	–	–	–	–	21.5	4.5	235	3.5

добиться высокой подвижности носителей заряда в канале ($52.3 \text{ см}^2 \cdot \text{эВ}^{-1}$). Плотность состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ с введенными на нее атомами Р была получена методом спектроскопии адмиттанса в диапазоне энергий $E_c - E_{it} = 0.2 \dots 0.6 \text{ эВ}$, а концентрация фосфора на границе раздела – методом ВИМС на образцах, изготовленных ионной имплантацией фосфора в 4H-SiC непосредственно перед термическим ростом ПД в атмосфере O₂ (P-O2). Снижение D_{it} наблюдается при концентрации Р на границе раздела более $(4 \dots 6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (рис. 4). Методом ECV-профилирования (Electrochemical capacitance-voltage profiling – электрохимическое вольт-фарадное профилирование) было показано, что термический рост ПД приводит к частичной активации имплантированных ионов Р (рис. 5: 1 – электрически активная примесь (ECV); 2 – фосфор (ВИМС); x – глубина). Изготовление подзатворного диэлектрика по технологии P-N2O

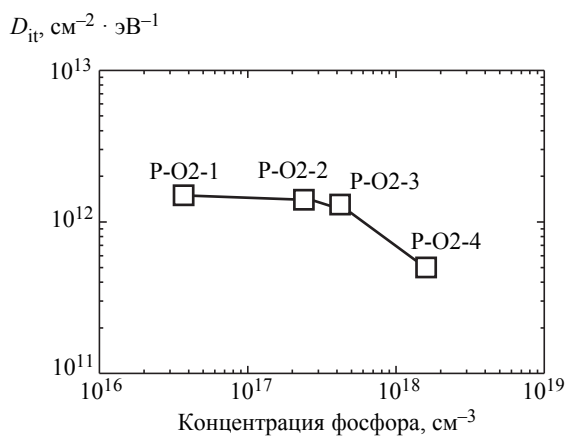


Рис. 4

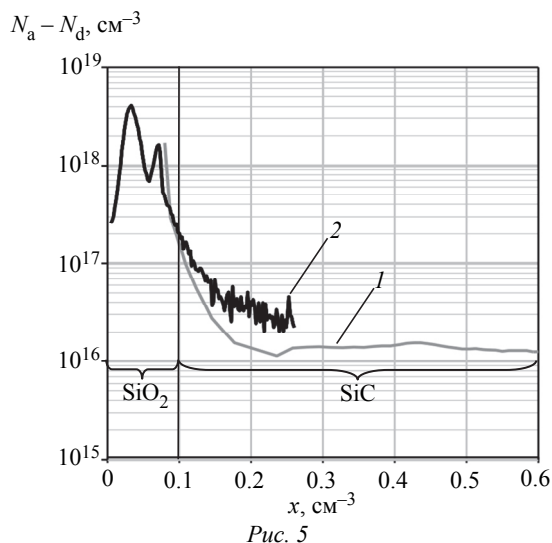


Рис. 5

приводит к увеличению μ_{FE} до $80 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Отрицательное пороговое напряжение $V_{th \text{ ext}}$ транзистора P-N2O вызвано положительным встроенным зарядом и образованием встроенного канала из-за высокой концентрации Р. Можно заключить, что при введении N, Р, As, Sb (элементов V группы Периодической таблицы) у поверхности карбида кремния может формироваться тонкий слой n -типа проводимости (при концентрации доноров N_d больше концентрации акцепторов N_a), что влечет за собой увеличение концентрации свободных носителей заряда и μ_{FE} , а также к снижению $V_{th \text{ ext}}$.

Введение мышьяка на границу раздела 4H-SiC/SiO₂ имплантацией перед ростом ПД в атмосфере N₂O (As-N2O) позволяет увеличить μ_{FE} до $180 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Атомы мышьяка слабо влияют на плотность ПС на границе раздела 4H-SiC/SiO₂. Это следует из полученных методом проводимости значений плотности состояний: $D_{it}(N_2O) = 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и $D_{it}(As-N_2O) = 1.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Точное определение плотности состояний методом проводимости затрудняется наличием у поверхности карбида кремния слоя, легированного As. Основной эффект от этих атомов – легирование тонкого приповерхностного слоя p -области и, следовательно, формирование встроенного канала. Это приводит к увеличению свободных носителей заряда в канале транзистора и более крутому наклону ВАХ в подпороговой области (см. таблицу). Пассивация состояний при этом происходит за счет введения азота на интерфейс в ходе роста ПД.

Формирование МДП-транзисторов на высоколегированной p -области изменяет влияние различных механизмов рассеяния электронов на их транспорт и приводит к снижению μ_{FE} (рис. 6), увеличению значения обратного наклона подпороговой ВАХ и увеличению порогового напряжения транзистора (см. таблицу). Подвижность носителей заряда в объеме SiC уменьшается с ростом уровня легирования, кроме того, возникшие в приповерхностном слое SiC в ходе бомбардировки высокоэнергетическими ионами дефекты и связанные с ними состояния дополнительно снижают подвижность носителей заряда. Снижение подвижности носителей заряда наиболее выражено у технологий, включающих окисление 4H-SiC, и наименее – у технологий с осаждением подзатворного диэлектрика (D-N2O, AGON). Это

связано с увеличением напряженности поперечного поля в канале и уменьшением толщины инверсионного слоя. Увеличение концентрации примеси в p -области также вызывает перемещение уровня Ферми и уменьшение толщины скрытого канала при одинаковых концентрации и профиле распределения компенсирующей примеси, и именно поэтому наблюдается уменьшение μ_{FE} для транзисторов P-N2O и As-N2O.

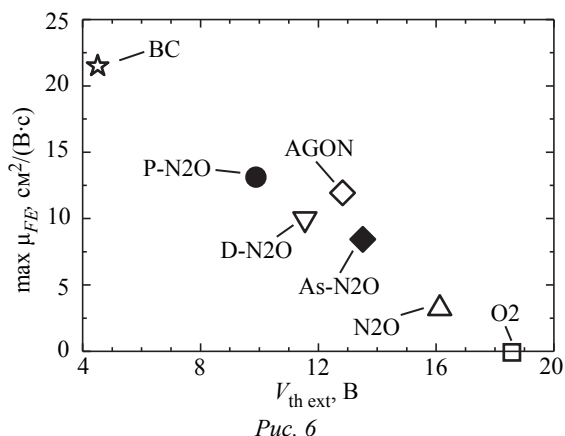


Рис. 6

Заглубление канала из двух эпитаксиальных слоев на высоколегированной p -области (BC) позволяет увеличить μ_{FE} до 22 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ по сравнению с 3 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ для транзистора N2O. Это можно объяснить: 1) уменьшением влияния кулоновского рассеяния свободных электронов на заполненных ловушках на транспорт носителей заряда в канале; 2) тем, что канал формируется в низколегированном эпитаксиальном слое, а не в p -области с высоким уровнем легирования, где присутствуют дефекты, связанные с бомбардировкой поверхности карбида кремния высокоэнергетическими ионами Al. Данные предположения подтверждаются более высокой подвижностью в транзисторе BC, чем в N2O, который сформирован на p -области с низким уровнем легирования, а также отрицательным наклоном на зависимости $\mu_{FE}(T)$ в области высоких температур (рис. 7). При низких температурах подвижность носителей заряда растет с температурой, что свойственно МДП-транзисторам, транспорт электронов в канале которых ограничивается рассеянием на кулоновских центрах (заряженных ловушках). В канале транзистора N2O μ_{FE} увеличивается с температурой до ~450 K, а далее выходит на плато. Это свидетельствует о преобладании кулоновского механизма рассеяния на заполненных ловушках для этого транзистора и уси-

нии фононного механизма с ростом температуры. В транзисторе BC подвижность носителей заряда выходит на плато после 375 K и остается почти неизменной до 475 K, после чего снижается. Это говорит о доминировании фононного механизма рассеяния электронов в канале транзистора в области высоких температур. Данные наблюдения позволяют сделать вывод, что использование технологии заглубленного канала приводит к увеличению подвижности электронов и снижению влияния кулоновского рассеяния на заполненных ловушках на транспорт носителей заряда в канале транзистора.

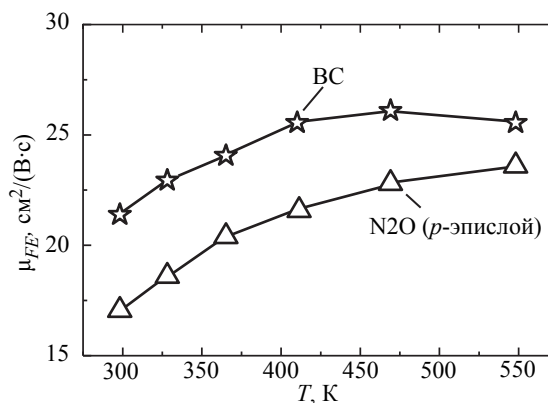


Рис. 7

Исследование ПД методом TZDB показало, что окисление в атмосфере N₂O снижает напряженность поля пробоя ПД E_b по сравнению с окислением в атмосфере O₂ (рис. 8, где $F(E_b)$ – функция распределения Вейбулла, рисунок выполнен в полулогарифмическом масштабе; для наглядности график Вейбулла разделен на две части: a и b с различными технологиями на каждой их них и масштабом по оси абсцисс). При этом имплантация фосфора и мышьяка не снижает E_b , если рост ПД проводится в атмосфере N₂O. В общем случае сформированный методом термического роста ПД (O₂, N₂O, P-N₂O, As-N₂O) имеет более высокое диэлектрическое качество и напряженность поля пробоя, чем сформированный методом осаждения (D-O₂, D-N₂O, AGON, POCL). Применение метода ALD для нанесения слоя SiO₂ (POCL) и отжиг при высокой температуре (AGON) позволяют увеличить напряженность поля пробоя по сравнению с ПД, которые были сформированы методом осаждения.

Представлено комплексное исследование электрофизических свойств подзатворного диэлектрика и канала транзистора, изготовленных по различным технологиям, на эпислоях p -типа с

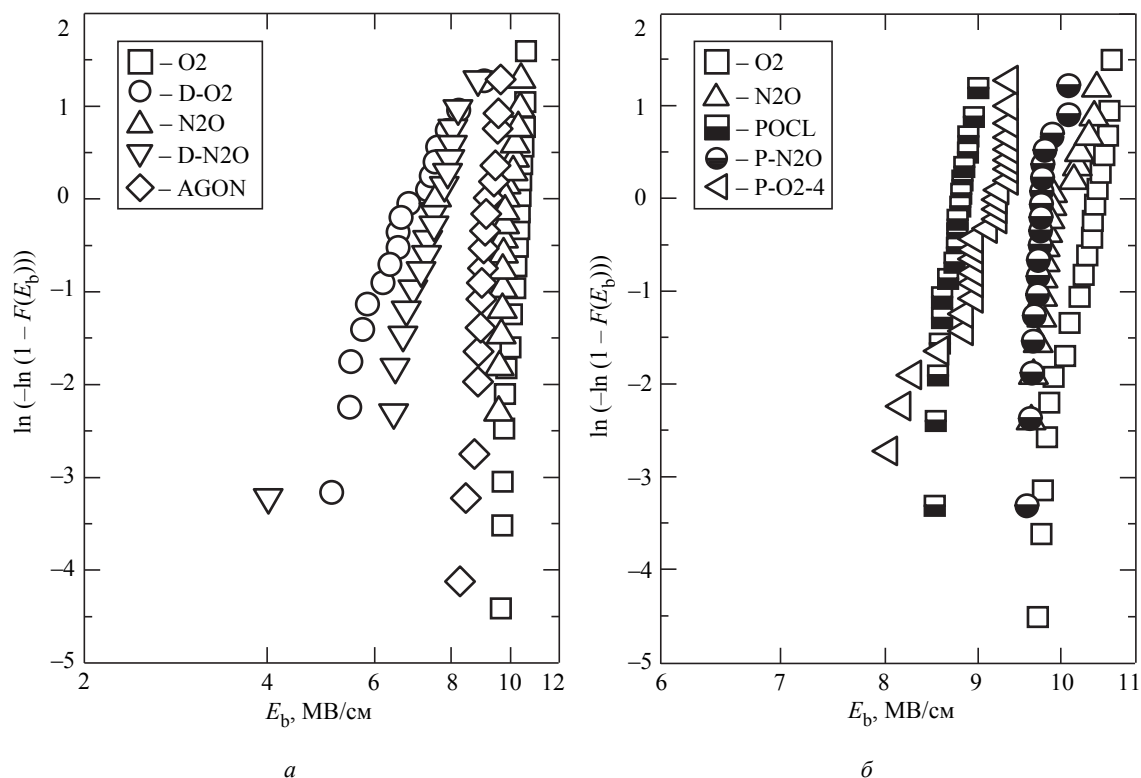


Рис. 8

уровнем легирования около $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и на высоколегированной p -области с уровнем легирования около $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Наиболее высокая подвижность носителей заряда была достигнута на образцах, сформированных на низколегированных эпислоях, с имплантированными атомами As/P перед термическим ростом подзатворного ди-

электрика в азотсодержащей среде. Также наблюдалось положительное влияние низкой шероховатости границы раздела на транспорт электронов в канале транзисторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект № 03.G25.31.0243.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучинин В. В. Технологии превосходства. Карбид кремния. Научно-технологический статус ЛЭТИ // Нано-и микросистемная техника. 2016. № 5 (18). С. 259–271.
2. Лучинин В. В. Отечественная экстремальная ЭКБ: карбидокремниевая индустрия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» // Наноиндустрия. 2016. № 65 (3). С. 78–89.
3. Liu G., Tuttle B. R., Dhar S. Silicon carbide: A unique platform for metal-oxide-semiconductor physics // Appl. Phys. Reviews. 2015. Vol. 2, № 2. P. 021307.
4. Tailoring the 4H-SiC/SiO₂ MOS-interface for SiC-based power switches / A. I. Mikhaylov, A. V. Afanasyev, V. V. Luchinin et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2016. P. 08PC04.
5. Михайлов А. И. Физико-технологические основы формирования канала силового МДП-транзистора на карбиде кремния: дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2018. 182 с.
6. Interfacial characteristics of N₂O and NO nitrided SiO₂ grown on SiC by rapid thermal processing / H. Li, S. Dimitrijevic, H. B. Harrison, D. Sweatman // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70. P. 2028.
7. Improved inversion channel mobility in 4H-SiC MOSFETs on Si face utilizing phosphorus-doped gate

- oxide / D. Okamoto, H. Yano, K. Hirata et al. // IEEE Electron Device Lett. 2010. Vol. 31. P. 710.
8. Das M. K. Recent Advances in (0001) 4H-SiC MOS Device Technology // Mater. Sci. Forum. 2004. Vol. 457–460. P. 1275.
9. Effect of nitric oxide annealing on the interface trap densities near the band edges in the 4H polytype of silicon carbide / G. Y. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 1713.
10. Low Density of Interface States in n-Type 4H-SiC MOS Capacitors Achieved by Nitrogen Implantation / F. Ciobanu, G. Pensl, V. V. Afanasyev, A. Schöner // Mater. Sci. Forum. 2005. Vol. 483–485. P. 693.
11. MOS capacitors obtained by wet oxidation of n-type 4H-SiC pre-implanted with nitrogen / A. Poggi, F. Moscatelli, Y. Hijikata et al. // Microelectron. Eng. 2007. Vol. 84. P. 2804.
12. Passivation of 4H-SiC/SiO₂ Interface Traps by Oxidation of a Thin Silicon Nitride Layer / A. I. Mikhaylov, A. V. Afanasyev, V. V. Luchinin et al. // Materials Science Forum. 2015. Vol. 821–823. P. 508–511.

13. Yano H., Hatayama T., Fuyuki T. POCl₃ Annealing as a New Method for Improving 4H-SiC MOS Device Performance // ECS Trans. 2012. Vol. 50, № 3. P. 257.
14. Comparative study of gate oxide in 4H-SiC lateral MOSFETs subjected to post-deposition-annealing in N₂O and POCl₃ / P. Fiorenza, L. K. Swanson, M. Vivona et al. // Appl. Phys. A. 2014. Vol. 115. P. 333.
15. Development of 4H-SiC MOSFETs with Phosphorus-Doped Gate Oxide / D. Okamoto, H. Yano, K. Hirata et al. // Mater. Sci. Forum. 2012. Vol. 717–720. P. 733.
16. Reduction of density of 4H-SiC/SiO₂ interface traps by pre-oxidation phosphorus implantation / T. Sledziewski, A. Mikhaylov, S. Reshanov et al. // Mater. Sci. Forum. 2014. Vol. 778–780. P. 575.
17. Correlating macroscopic and nanoscale electrical modifications of SiO₂/4H-SiC interfaces upon post-oxidation-annealing in N₂O and POCl₃ / L. K. Swanson, P. Fiorenza, F. Gianazzo et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 193501.
18. SiO₂/4H-SiC interface doping during post-deposition-annealing of the oxide in N₂O or POCl₃ / P. Fiorenza, F. Gianazzo, M. Vivona et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. P. 153508.
19. Comparative study of gate oxide in 4H-SiC lateral MOSFETs subjected to post-deposition-annealing in N₂O and POCl₃ / P. Fiorenza, L. K. Swanson, M. Vivona et al. // Appl. Phys. A. 2014. Vol. 115, № 1. P. 333.
20. Passivation of 4H-SiC/SiO₂ interface traps by oxidation of a thin silicon nitride layer / A. I. Mikhaylov, A. V. Afanasyev, V. V. Luchinin et al. // Mater. Sci. Forum. 2015. Vol. 858. P. 651.
21. High channel mobility 4H-SiC MOSFETs by antimony counter-doping / A. Modic, G. Liu, A. C. Ahyi et al. // IEEE Electron Device Lett. 2014. Vol. 35, № 9. P. 894.
22. High channel mobility in normally-off 4H-SiC buried channel MOSFETs / S. Harada, S. Suzuki, J. Senzaki et al. // IEEE Electron Device Lett. 2001. Vol. 22, № 6. P. 272.
23. Energy- and time-dependent dynamics of trap occupation in 4H-SiC MOSFETs / S. Potbhare, N. Goldsman, G. Pennington et al. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100, № 4. P. 44515.
24. La Via F., Camarda M., La Magna A. Mechanisms of growth and defect properties of epitaxial SiC // Appl. Phys. Rev. 2014. Vol. 1, № 3. P. 31301.
25. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // J. Appl. Mech. 1951. Vol. 103. P. 293–297.
26. Dodson B. The Weibull analysis handbook. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2006. 184 p.
27. Schroder D. K. Semiconductor material and device characterization. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 800 p.

A. I. Mikhaylov, A. V. Afanasyev, V. A. Ilyin, V. V. Luchinin
Saint Petersburg Electrotechnical University

S. A. Reshanov, A. Schöner
Ascatron AB (Sweden)

CONTROL OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF 4H-SiC POWER MOSFET CHANNEL

Various technological approaches for channel properties control of silicon carbide power MOSFET have been described and summarized. Among them are gate oxide thermal growth or deposition with subsequent anneal, introduction of group V elements to the 4H-SiC/SiO₂ interface, and buried channel formation by epitaxial CVD growth. Characteristics of lateral MOSFETs fabricated on low doped p-type epilayer with Al concentration of $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and high doped Al-implanted p-well with Al concentration of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ have been compared. To increase the channel mobility and dielectric breakdown field, as well as to reduce transistor threshold voltage we recommend the following approaches: formation of the p-region of transistor on low-doped epilayer and P/As implantation prior to oxide thermal growth combined with interface states passivation by nitrogen.

Power electronics, silicon carbide, MOSFET, interface, gate oxide, channel, mobility