

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ СЛОЯ КРЕМНИЯ НА ЕМКОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МДП/КНС–СТРУКТУР

© 2012 г. К. Л. Енишерлова, В. Г. Горячев, Э. М. Темпер, С. А. Капилин
Федеральное государственное предприятие
«Научно–производственное предприятие «Пульсар»

Исследовано влияние особенностей эпитаксиального слоя кремния, а также самой границы кремний–сапфир в структурах кремний–на–сапфире (КНС) на емкостные параметры МДП–структур, сформированных на КНС с субмикронными слоями кремния. В процессе исследований выявлено наличие сильной частотной зависимости емкостных характеристик тестовых МДП–структур, формируемых на таких КНС. Экспериментально показано, что $C-V$ -характеристики тестовых структур в большей степени определяются размерами и конфигурацией кремниевого слоя МДП–структур а также концентрацией глубоких компенсирующих уровней в пограничном слое у границы кремний–сапфир. В частности, показано, что значительные изменения частотно–емкостных зависимостей при переходе от тестов, сформированных на стандартных КНС, к тестам на КНС с перекристаллизованным слоем кремния связаны с наличием большой концентрации глубоких компенсирующих уровней в пограничном слое у границы кремний–сапфир для стандартных КНС–структур.

Ключевые слова: КНС–структуры, перекристаллизованный слой, эквивалентная схема, емкостные характеристики, частотно–емкостная зависимость, пространственный заряд, донорные глубокие уровни.

Введение

В настоящее время, в связи с усовершенствованием и удешевлением технологии изготовления сапфировых подложек, структуры кремний–на–сапфире (КНС–структуры) продолжают оставаться ведущей элементной компонентной базой при производстве ряда современных сверхбольших интегральных схем [1, 2]. Однако новые перспективные современные интегральные схемы требуют использования КНС–структур с субмикронными и нанометровыми слоями. Поэтому актуальной становится проблема получения КНС с бездефектными слоями такой толщины и изучение их электрофизических параметров. Основной недостаток КНС–структур — высокая плотность дефектов в слое кремния с локализацией основной массы дефектов на границе кремний–сапфир [1]. Таким образом, проблема дефектности эпитаксиального кремния особенно актуальна для ультратонких пленок. На сегодняшний день разработан ряд методов трансформации структуры эпитаксиальных слоев, позволяющих резко снизить их дефектность. К таким методам, в частности, относятся использование твердофазной рекристаллизации эпитаксиального слоя путем начальной аморфизации

слоя имплантацией ионов кремния (UTSI–технология) или кислорода с последующей рекристаллизацией слоя путем высокотемпературного отжига [1–3]; перекристаллизация слоя кремния с помощью лазерного отжига [4] и ряд других методов. Но проблема негативного влияния структурного несовершенства на электрофизические параметры формируемых на КНС приборов при толщине пленки 0,3 мкм и менее остается во многом нерешенной. Кроме того, традиционные методы контроля электрофизических параметров, применяемые для оценки толстых гетероэпитаксиальных слоев той же пары кремний–сапфир, при измерении параметров тонких слоев напрямую не пригодны из–за наличия области пространственного заряда на границе кремний–сапфир. Одним из путей частичного решения проблемы контроля субмикронных слоев может быть измерение на тестовых структурах, сформированных на КНС.

Цель работы — исследование влияния особенностей эпитаксиального слоя кремния, а также самой границы кремний–сапфир в КНС на электрофизические параметры структур «металл–диэлектрик–полупроводник» (МДП), сформированных на КНС с субмикронными слоями кремния.

Образцы и методы исследования

Объекты исследования можно разделить на две группы.

1. Стандартные КНС–структуры (КНС–Ст) диаметром 100 мкм, полученные на установке гетероэпитаксиального наращивания ЭТМ100/150 (изготовитель — ЗАО «Монокристалл») со слоем кремния n -типа проводимости с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 8 \div 12 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (данные изготовителя) и толщиной слоя кремния 0,3 мкм.

2. Аналогичные КНС–структуры с перекристаллизованным слоем кремния (КНС–Пр), полученным путем аморфизации этого слоя ионной имплантацией кислородом (энергия $E = 130 \text{ КэВ}$ и доза ионов кислорода $D = (8 \div 12) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) с последующей кристаллизацией слоя высокотемпературным отжигом (изготовитель ИИТ при РНЦ «КИ») [3].

Для измерений емкости (C) на КНС–структурах изготавливали два типа специальных тестовых МДП–структур с подзатворным оксидом толщиной 30 нм, поликремниевым затвором и контактами из алюминия с площадью затвора $S = 0,0003 \text{ см}^2$. Сформированные МДП–структуры при одинаковой площади затвора отличались не только разной площадью нижнего островка кремния на сапфире, но и разными размерами электродов в МДП–тестах. У I типа контакты к слою кремния были параллельны длинной стороне затвора (рис. 1, а), а у МДП–тестов II типа — короткой стороне затвора (см. рис. 1, б). Таким образом, последовательное сопротивление для II типа тестов значительно больше, чем для тестов I типа. Все анализируемые КНС–структуры как стандартные (КНС–Ст1 и КНС–Ст2), так и с перекристаллизованным слоем кремния (КНС–Пр3 и КНС–Пр4) проходили все стадии формирования тестовых структур в едином технологическом цикле. Кроме того, на тех же КНС–структурах и в тех же технологических процессах были сформированы тесты для оценки проводимости рабочего слоя кремния. Для этих целей использовали тестовые структуры, представляющие собой полосу кремния длиной 510 мкм, шириной 400 мкм, изолированную от остального объема кремния слоем подзатворного оксида и имеющую два подлегированных металлических контакта.

Измерения C – V –характеристик проводили на установке CSM/WIN System в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц. Для построения эквивалентной схемы измеряемой структуры емкостные зависимости снимали как по параллельной (индекс p), так и по последовательной (индекс s) схемам замещения. Кроме того, измеряли частотные зависимости емкости и проводимости в режиме аккумуляции (при смещении на затворе $U_3 = 2 \text{ В}$) и в режиме обеднения (напряжение $U_3 = -2 \text{ В}$). Для каждого конкретного варианта измерения проводили на трех тестовых кристаллах.

Для оценки сопротивления слоя кремния измеряли вольт–амперные характеристики на тестовых полосках в диапазоне $U = -20 \div 20 \text{ В}$. Расчет эффективного удельного сопротивления слоя проводили на линейном участке I – U –характеристик.

Результаты и их обсуждение

В таблице приведены результаты измерения сопротивления слоя кремния в тестовых структурах, сформированных на анализируемых КНС–структурах, и значение рассчитанного эффективного удельного сопротивления ρ_{eff} этого слоя с учетом толщины слоя $d = 0,3 \text{ мкм}$.

Как видно из таблицы, только для структур с перекристаллизацией слоя кремния значения эффективного удельного сопротивления слоя кремния

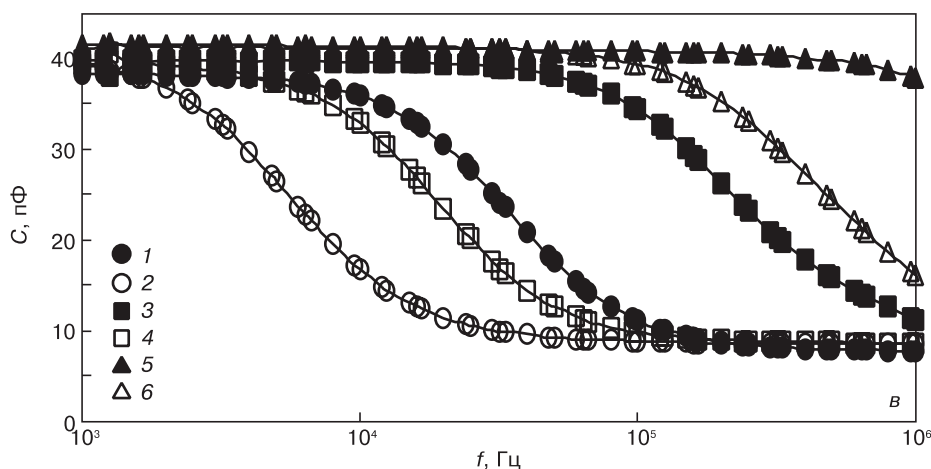
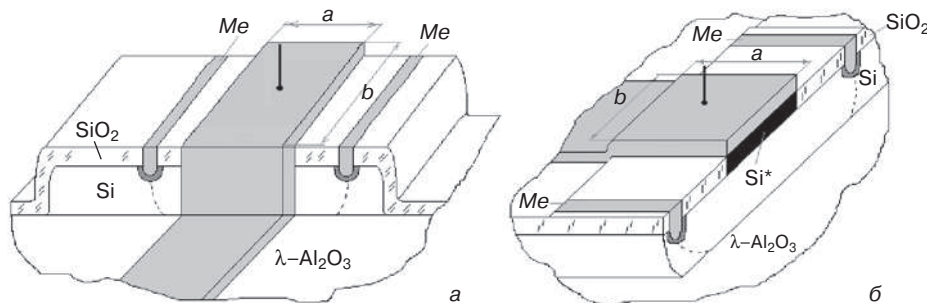


Рис. 1. Схемы МДП–тестов I (а) и II (б) типа и зависимости емкости в режиме аккумуляции $C_{s, \text{acc}}$ от частоты (в) для МДП–тестов, сформированных на стандартных структурах КНС и КНС с перекристаллизованным слоем Si (см. таблицу): 1, 2 — КНС–Ст 1; 3, 4 — КНС–Ст 2; 5, 6 — КНС–Пр (1, 3, 5 — тесты I типа; 2, 4, 6 — тесты II типа)

Результаты измерения сопротивления из вольт-амперных характеристик и расчета ρ_{eff} на тестовых структурах

| Структура | R , Ом | | ρ_{eff} , Ом·см | |
|-----------|------------------|------------------|-----------------------------|--------|
| | Эксперимент | Расчет | Эксперимент | Расчет |
| КНС-СТ 1 | $3,2 \cdot 10^7$ | $5,7 \cdot 10^7$ | 1200 | 2200 |
| КНС-СТ 2 | $3,6 \cdot 10^6$ | $5,2 \cdot 10^6$ | 140 | 200 |
| КНС-Пр 3 | $7,8 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^5$ | 3 | 8 |
| КНС-Пр 4 | $2,6 \cdot 10^5$ | $3,4 \cdot 10^5$ | 10 | 13 |

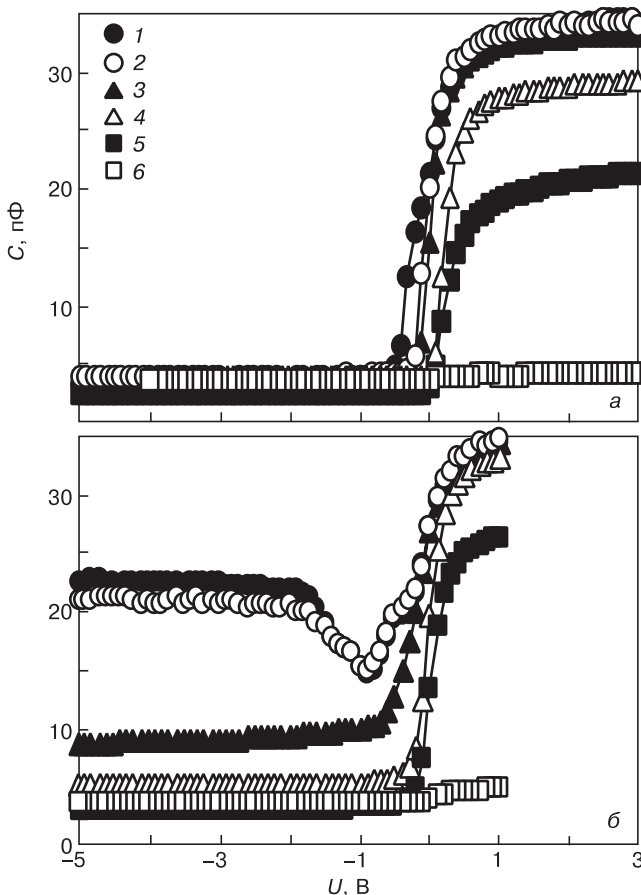


Рис. 2. C – V –характеристики МДП–тестов I (1, 3, 5) и II (2, 4, 6) типа, сформированных на стандартных структурах КНС (а) и КНС с перекристаллизованным слоем Si (б), измеренные при последовательной схеме замещения при различной частоте: 1, 2 — 1 кГц; 3, 4 — 50 кГц; 5, 6 — 1 МГц

и заявленного изготовителем удельного сопротивления слоя ρ совпадают. Для стандартных КНС характерен значительный разброс в значениях экспериментально–расчетной величины ρ_{eff} .

Как видно из таблицы, ρ_{eff} слоя кремния у двух стандартных КНС–структур сильно (на порядок) отличаются.

На рис. 2 показаны измеренные при разных частотах (последовательная схема замещения) C – V –характеристики МДП–тестов I и II типа, сформированных на двух стандартных КНС и на одной из КНС с перекристаллизованным слоем кремния. Как видно из рис. 2, для большинства тестов как

стандартных КНС, так и с перекристаллизованным слоем измеряемая емкость в режиме аккумуляции $C_{s,\text{acc}}$ при частоте $f = 1\text{--}10$ кГц близка к емкости диэлектрика C_d , рассчитанной для МДП–структур с учетом их толщины и площади подзатворного окида ($C_{d,\text{calc.}} = 34,6\text{--}34,8$ пФ). Измерения на более низких частотах $f = 200\text{--}400$ Гц показали, что для ряда тестовых структур величина $C_{s,\text{acc}}$ достигает значений 35–36 пФ. При частотах выше 10 кГц наблюдается в основном сильная зависимость C – V –характеристик МДП–тестов от частоты для всех КНС–структур (см. рис. 1).

Как видно из рис. 2, в режиме обеднения только для тестов, сформированных на КНС с перекристаллизованным слоем, емкость $C_{s,\text{dep.}}$ возрастает с уменьшением частоты от 1 МГц до 1 кГц, не достигая значений, полученных на низкой частоте ($f = 1$ кГц) в режиме аккумуляции. Для тестов на стандартных КНС емкость в режиме обеднения $C_{s,\text{dep.}}$ практически не зависит от частоты (см. рис. 2, а). Значение $C_{s,\text{dep.}}$ для стандартных КНС, как правило, составляет 2–3 пФ, что несколько меньше расчетного значения емкости в режиме обеднения для МДП–структуры с толщиной слоя кремния 0,3 мкм.

На рис. 1 показаны зависимости емкости в режиме аккумуляции от частоты при напряжении смещения на затворе $U_{\text{gate}} = 2$ В (параллельная схема замещения) для всех тестовых структур. Как видно из рис. 1, частотно–емкостная зависимость проявляется в большей степени для стандартных КНС–структур, при этом чем больше ρ_{eff} (в частности, для КНС–СТ 1, табл.), тем больше сдвиг в сторону низких частот. Причем кривые $C_{s,\text{acc}}(f)$ для тестов I и II типа одной и той же КНС–структуры всегда сдвинуты друг относительно друга: начало резкого спада $C_{s,\text{acc}}$ у кривых для МДП–тестов II типа, с большим последовательным сопротивлением слоя кремния, всегда сдвинуто в сторону более низких частот по сравнению с зависимостями $C_{s,\text{acc}}(f)$ для МДП–тестов I типа. Все частотно–емкостные зависимости практически параллельны друг другу в масштабе $x = \lg f$. Частотно–емкостные зависимости тестов двух типов, сформированных на КНС–структурах с перекристаллизованным слоем кремния, сдвинуты в сторону высоких частот по сравнению с аналогичными зависимостями тестов на стандартных КНС (см. рис. 1).

Что касается сопротивления в режиме аккумуляции, то для тестов, сформированных на стандартных КНС, наблюдается некоторая аналогия характера изменения измеряемых сопротивления $R_{s,\text{acc}}$ и емкости ($C_{s,\text{acc}}$) от частоты: незначительному изменению емкости соответствует практически постоянное при всех измеряемых частотах $R_{s,\text{acc}}$, а существенным изменениям $C_{s,\text{acc}}$ (в 9 раз) — значительные изменения величины $R_{s,\text{acc}}$ (в 6 раз). Однако для тестов, сформированных на КНС с перекристаллизованным слоем, характер зависимости $R_{s,\text{acc}}(f)$ другой. На рис. 3 для тестов стандартных КНС и КНС с перекристаллизо-

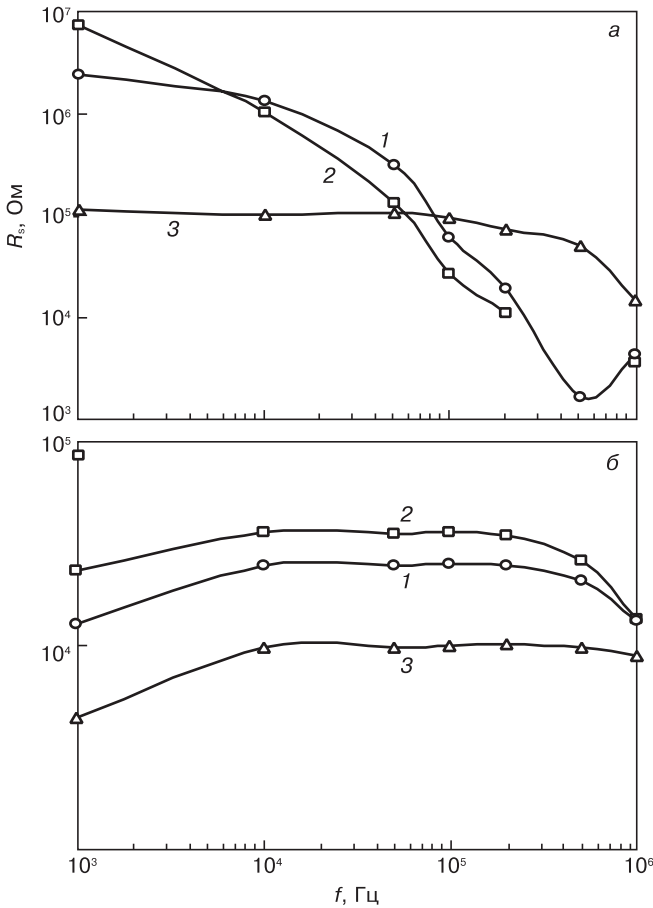


Рис. 3. Зависимости измеряемого сопротивления от частоты в режиме обогащения при разном смещении на затворе для стандартных КНС (а) и КНС с перекристаллизованным слоем (б): 1 — $U = 0$; 2 — $0,1$ В; 3 — 2 В

ваным слоем кремния показаны экспериментально полученные кривые изменения сопротивления от частоты в режиме обогащения при разном смещении на затворе. Как видно из рис. 3, б, для КНС с перекристаллизованным слоем на средних частотах (от 10 до 200 кГц) измеряемое сопротивление практически не меняется с частотой, а на низких (от 1 до 10 кГц) и высоких (от 200 кГц до 1 МГц) частотах измеряемое сопротивление уменьшается.

На рис. 4 показаны кривые изменения емкости от частоты при работе в режиме обеднения. Как видно из рис. 4, частотно-емкостная зависимость в режиме обеднения $C_{s,dep}(f)$ наблюдается только для тестов, сформированных на КНС с перекристаллизованным слоем кремния. Для тестов на стандартных КНС емкость в режиме обеднения практически не зависит от частоты.

На рис. 5 показаны кривые зависимости измеряемого сопротивления в режиме обеднения $R_{s,dep}$ от частоты для тестов стандартной КНС и КНС с перекристаллизованным слоем. Как видно из рис. 5, для тестов КНС с перекристаллизованным слоем измеряемое сопротивление практически обратно пропорционально частоте ($R_{s,dep} \sim (f)^{-1,5}$) (рис. 5, б). Причем характер зависимостей $R_{s,dep}(f)$ и значения

измеряемого сопротивления в обеднении для тестов стандартных КНС и КНС с перекристаллизованным слоем очень близки, хотя у стандартных КНС на средних частотах (50—500 кГц) просматривается участок, где изменения сопротивления с частотой менее значительны (рис. 5, а).

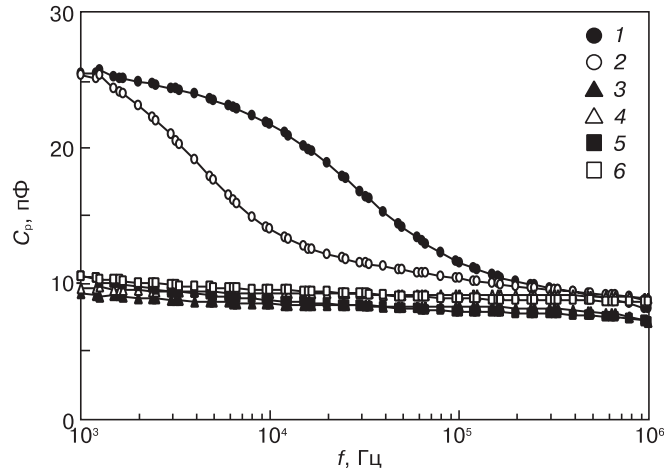


Рис. 4. Частотно-емкостные зависимости для МДП-тестов I (1, 3, 5) и II (2, 4, 6) типа в режиме обеднения при $U_{bias} = -2$ В: 1, 2 — КНС с перекристаллизованным слоем; 3–6 — стандартные КНС

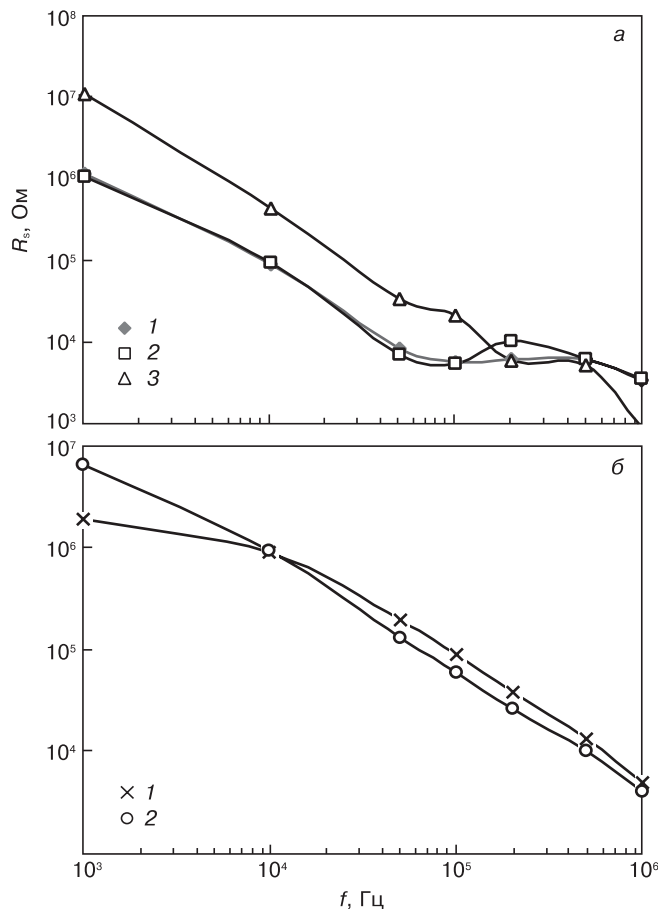


Рис. 5. Зависимости измеряемого сопротивления от частоты в режиме обеднения для стандартных КНС (а) и КНС с перекристаллизованным слоем (б) при разном смещении на затворе $U_{з3}$, В: а: 1 — -1 ; 2, 3 — -2 (Ст 1 и Ст 2 соответственно); б: 1 — -1 ; 2 — -2

Поскольку анализируемые тестовые структуры не являются в чистом виде МДП-структурами (реальная измеряемая схема значительно более сложная и может включать в себя целый ряд RC-цепочек), целесообразно при анализе полученных C—V-зависимостей рассматривать отдельно область аккумуляции и область обеднения.

Режим аккумуляции. Для всех КНС характерно следующее:

- почти всегда уменьшение $C_{s,acc}(\ln f)$ при возрастании частоты;
- параллельный сдвиг в широком диапазоне частот зависимостей $C_{s,acc}(\ln f)$, измеренных на тестах КНС-структур с различными свойствами и геометрическими параметрами нижнего слоя кремния МДП-структур, в частности конфигурацией и размером этого слоя (см. рис. 2);
- параллельный сдвиг в сторону более низких частот зависимости $C_s(\ln f)$ для тестов, сформированных на стандартных КНС, по сравнению с аналогичными зависимостями для тестов КНС с перекристаллизованным слоем;
- параллельный сдвиг в сторону более низких частот зависимости $C_s(\ln f)$ для МДП-тестов II типа по сравнению с аналогичными зависимостями для МДП-тестов I типа.

Кроме того, частотно-емкостные зависимости измеряемого сопротивления при работе в режиме сильного обогащения $R_{s,acc}$ по виду близки к частотно-емкостным зависимостям тех же тестов,

сформированных на стандартных КНС. Для тестов на КНС с перекристаллизованным слоем зависимости $R_{s,acc}(f)$ носят несколько другой характер и включают практически плоский участок на средних частотах — от 10 до 200 кГц (см. рис. 3).

Наличие в реальной схеме измеряемой структуры частотно-зависимого сопротивления (всегда более 10 кОм), параллельного емкости, может во многом определять характер наблюдаемых частотных зависимостей. Значение измеряемого активного сопротивления частично определяется значением сопротивления полоски слоя кремния квазинейтральной области анализируемой тестовой МДП-структуры, а для субмикронных слоев кремния — также особенностью пограничной области кремний—сапфир. Таким образом, реальный МДП-тест в режиме аккумуляции можно представить в виде последовательной цепочки, состоящей из емкости диэлектрика МДП-структуры C_d ; емкости слоя аккумуляции свободных носителей $C_{s,acc}$; специально введенной RC-цепочки с емкостью $C_{pak,acc}$ и параллельного сопротивления $R_{pak,acc}$, а также добавочного сопротивления R_m квазинейтральной области (рис. 6, а). В этом случае при измерении по последовательной схеме замещения измеряемая емкость в режиме аккумуляции с учетом активной и реактивной составляющей емкости определяется по формуле

$$C = \frac{C_d}{1 + \frac{K_p w^2 T_p^2}{K_p + w^2 T_p^2}}, \quad (1)$$

где $T_p = R_{pak,acc} C_d$; $K_p = C_d / C_{pak,acc}$.

Причем емкостью $C_{s,acc}$ из-за ее большого значения можно пренебречь. Расчетное значение емкости C_d определяется непосредственно из размеров затвора МДП-тестов: $C_d = 35 \div 40$ пФ. Примем $C_{pak,acc} = 10 \div 14$ пФ, равное расчетному значению емкости на нижнем плато частотно-емкостных зависимостей (см. рис. 6). Проведенные расчеты C_{meas} с учетом полученных значений $R_{pak,acc}$ дают хорошее соответствие расчетных кривых с экспериментальными данными для всех КНС (см. рис. 6).

При таком рассмотрении смещение частотно-емкостных характеристик относительно друг друга для тестов I и II типа целиком определяется значениями сопротивлений $R_{pak,acc}$ и R_m этих тестов. Конструктивно для тестов II типа сопротивление слоя кремния больше сопротивления аналогичного слоя тестов I типа ($R_{test,2} > R_{test,1}$) в 6—7-раз. Такое рассмотрение объясняет и параллельность кривых $C(f)$ при сдвигах по оси зависимости $x = \lg(f)$, поскольку вид кривых определяется одним и тем же уравнением.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показал, что особенности частотно-емкостных характеристик тестовых структур, формируемых на КНС с субмикронным слоем кремния, в большей степени зависят от степени компенсации слоя кремния

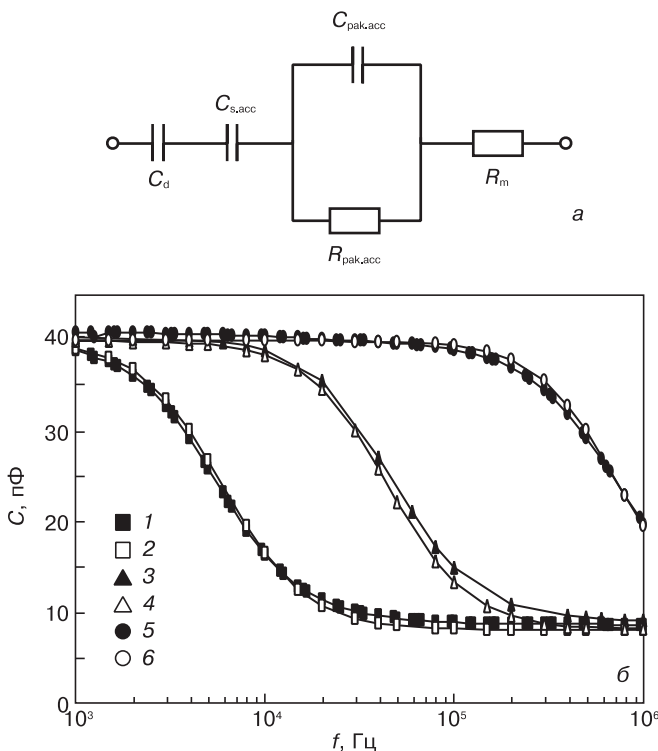


Рис. 6. Эквивалентная схема замещения в режиме аккумуляции (а) и экспериментально-расчетные частотно-емкостные зависимости для анализируемых образцов (б) КНС-Ст 1 (1, 2); КНС-Ст 2 (3, 4); КНС-ПР (5, 6): б: 1, 3, 5 — расчет; 2, 4, 6 — эксперимент

КНС-структур, а степень компенсации определяется наличием или отсутствием высоких концентраций компенсирующих уровней (дефектов) у границы кремний—сапфир или в самом слое кремния. Значение сопротивления слоя кремния, получаемое при измерении электропроводности (см. таблицу) в исследуемых КНС-структурах с субмикронными слоями кремния, определяется не только концентрацией легирующей примеси. В частности, у стандартных КНС и КНС с перекристаллизованным слоем концентрации легирующей примеси сравнимы. (Изготовитель при определении удельного сопротивления ориентируется по результатам, полученным на тест-спутниках.) Однако существенное влияние на реальное значение оказывает близкое «соседство» и состояние границы кремний—сапфир. Различие в сопротивлении слоя кремния n -типа проводимости у анализируемых стандартных КНС-структур и КНС с перекристаллизованным слоем объясняется более высокой концентрацией глубоких компенсирующих дефектов с акцепторными уровнями в пограничном слое для стандартных КНС. Резкое сокращение количества центров, формирующих глубокие уровни, в свою очередь, обусловлено улучшением в процессе перекристаллизации кристаллического совершенства слоя кремния и границы раздела кремний—сапфир [5].

Проведенные в работах [2, 8] исследования показали, что при толщине менее 0,3 мкм слой кремния имеет, скорее, мозаичную, чем монокристаллическую структуру, поскольку на электронограммах фиксируется наличие аморфной фазы. Именно этим может объясняться резкое падение подвижности носителей заряда до 30—60 см²/(В·с) в таких слоях. По мнению авторов работы [8], в таких слоях проводимость в первую очередь определяется барьерным механизмом, который имеет место в поликремнии. В работе [8] также было зафиксировано наличие большой плотности поверхностных состояний на границе кремний—сапфир, которые могут приводить к образованию области пространственного заряда в кремнии. Что касается границы кремний—сапфир, то в работе [2] было сделано предположение, что на первом этапе процесса эпитаксии начальная связь между кремнием и сапфиром осуществляется через координированный кислород с образованием дополнительных связей Si—O и Al—O и формированием неких промежуточных слоев. С точки зрения электрических параметров еще в работах 70—80-х годов XX в. говорилось о наличии на границе кремний—сапфир в обычных КНС-структурах значительного количества центров, служащих ловушками для дырок [9]. В работе [10], в частности, объяснялось и экспериментально подтверждалось, что, например, деградация параметров полевых транзисторов с управляющим p — n -переходом на базе КНС (JFET/SOS-транзисторов) при радиационном воздействии связана с накоплением в сапфире дырок, генерируе-

мых радиацией и захваченных ловушками на границе раздела кремний—сапфир. Однако в работах [11, 12] было показано, что в объеме сапфира отсутствуют значительные концентрации центров захвата дырок и установлен туннельный характер обмена ловушек с дырками из подложки. На основании этого в работе [13] утверждалось, что локализация на границе ловушек для дырок может происходить в узком (несколько нм) слое вблизи границы с кремнием, и скорее всего ловушки расположены в приграничной области в слое сложной структуры со свойствами, присущими нестехиометрическому оксиду SiO_x т. е. на «дне» слоя эпитаксиального кремния. Это позволяет при описании процессов накопления и релаксации зарядов в КНС-структурах использовать численные значения сечений захвата, установленные для системы Si—SiO₂. Предполагается [13], что схематичное строение граничного слоя в КНС-структурах следующее: Si—SiO_x (0,3—5,0 нм) — x (Al₂O₃) · y (SiO₂) — Al₂O₃.

Итак, на основании сказанного выше можно предположить, что причиной появления сильных частотно-емкостных зависимостей в режиме аккумуляции стандартных КНС является наличие у границы кремний—сапфир дефектов, создающих глубокие акцепторные уровни в запрещенной зоне, влияющих на степень компенсации в слое кремния тестовых структур. Для пояснения этого утверждения рассмотрим следующую зонную диаграмму.

Схематичная зонная диаграмма для кремния n -типа проводимости КНС-структуры при наложении постоянного смещения и малосигнального переменного тестового сигнала в режиме аккумуляции представлена на рис. 7.

Хорошее соответствие расчетных кривых частотно-емкостных зависимостей в режиме аккумуляции экспериментальным кривым (см. рис. 6) свидетельствует о том, что вклад емкости, зависимой от частоты, связанной с перезарядкой глубоких уровней, в условиях эксперимента в общую измеряемую емкость $C_s(f)$ незначителен. Влияние глубоких акцепторных уровней на характер зависимостей $C_s(f)$ проявляется только за счет уменьшения концентрации свободных носителей заряда в слое кремния, и, следовательно, увеличения сопротивления $R_{p,acc}$ и R_m . Величина $C_{p,acc}$ в этом случае определяется свойствами ОПЗ у границы кремний—сапфир.

Резкое уменьшение эффективного удельного сопротивления эпитаксиального слоя кремния (см. таблицу), резкий сдвиг частотно-емкостных зависимостей в сторону высоких частот у МДП-тестов на КНС с перекристаллизованным слоем (см. рис. 3), как отмечалось выше, свидетельствуют об уменьшении концентрации глубоких центров в объеме слоя кремния и на границе кремний—сапфир. По-видимому, центры, формирующие глубокие акцепторные уровни в запрещенной зоне кремния, связаны с дислокационными скоплениями, которые характерны для

субмикронных эпитаксиальных слоев кремния на сапфире и расположены в основном в приграничных районах кремний—сапфир. Резкое уменьшение плотности дислокаций в таких КНС в результате перекристаллизации, как показано в ряде работ [1], приводит к сокращению плотности дефектов, отвечающих за эти центры.

Режим обеднения. Для режима обеднения характерно следующее:

- значение емкости $C_{s,dep}$ для тестов на стандартных КНС не зависит от частоты и составляет 2—3 пФ. Для КНС с перекристаллизованным слоем значение емкости возрастает с уменьшением частоты от 1 МГц до 1 кГц, не достигая значений, полученных на низкой частоте в режиме аккумуляции;

- для тестов КНС с перекристаллизованным слоем характерно наличие частотно—емкостных зависимостей;

- зависимости измеряемого сопротивления от частоты в режиме обеднения $R_{s,dep}$ практически

имеют одинаковый вид для тестов стандартных КНС и КНС с перекристаллизованным слоем и приблизительно определяются соотношением $R_s \sim (f)^{-1,5}$.

При сильном отрицательном смещении у стандартных КНС происходит полное обеднение слоя кремния со «смыканием» области пространственного заряда (ОПЗ) двух границ Si—SiO₂ и Si—Al₂O₃. Центры в приграничной области кремний—сапфир, формирующие глубокие акцепторные уровни, которые играли важную роль при емкостных измерениях в режиме аккумуляции, при сильном отрицательном смещении освобождаются от захваченных электронов. При наличии дефектов, формирующих донорные уровни, которые, возможно, тоже присутствуют и которые не проявляются в режиме аккумуляции, эти центры заполняются дырками.

Значение дифференциальной емкости в этом случае определяется суммой дифференциальных емкостей пространственного заряда соответствующей области сапфира и поверхностных состояний у границы кремний—сапфир. Для тестов на стандартных КНС при постоянном сильном отрицательном смещении ($U_3 < -2$ В) слой кремния под электродом полностью «залит» ОПЗ, и дифференциальная емкость определяется ОПЗ кремния и областью сапфира, примыкающей к подводящей полоске кремния тестовой МДП—структуры с малой площадью поперечного сечения (см. рис. 1, а и б). Следовательно, значение этой емкости должно быть существенно меньше соответствующей емкости для планарных МДП—структур. Отсутствие у стандартных КНС—структур частотно—зависимой емкости во всем диапазоне измеряемых частот связано, по—видимому, именно с малыми значениями эффективной емкости, находящейся на уровне величины паразитной емкости для тестов всех анализируемых стандартных КНС (2—3 пФ).

Для КНС с перекристаллизованным слоем измеряемые значения емкостей в режиме обеднения существенно выше их паразитных значений ($C_{s,dep} > 8$ пФ). Наблюдается характерное увеличение низкочастотной емкости с уменьшением частоты ($f < 10$ кГц) и наличие специфического изгиба C — V —характеристик в диапазоне напряжений $U = -0,5 \dots -2$ В (см. рис. 1, б). Это позволяет предположить, что для этих структур концентрация основных носителей заряда достаточно высока ($n_{эф} > 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³), и режим обеднения не приводит к полному заполнению объемным зарядом слоя кремния под затвором. Это еще раз указывает на то, что в процессе перекристаллизации происходит уменьшение дефектности самой границы кремний—сапфир и, как следствие, возрастание эффективной проводимости слоя кремния.

Увеличение емкости на малых частотах (см. рис. 2, б), по—видимому, объясняется появлением глубоких донорных уровней, связанных непосредственно с дефектами границы кремний—сапфир,

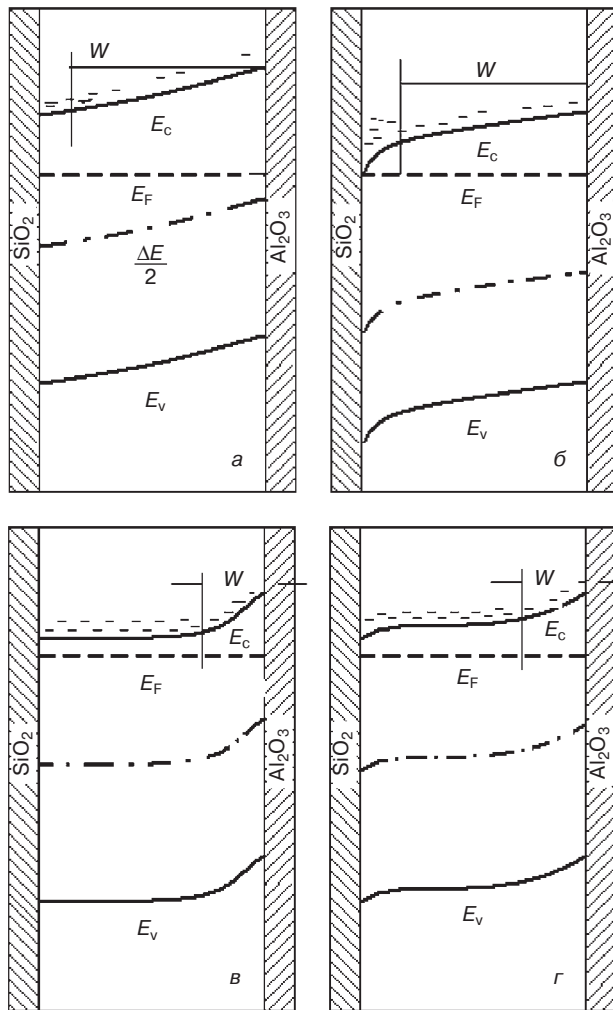


Рис. 7. Схематичная зонная диаграмма для МДП/КНС—структур, сформированных на стандартных КНС (а, б) и КНС с перекристаллизованным слоем (в, г) в режиме аккумуляции при различном смещении на затворе U_3 : а, в — 0; б, г — 2. W — ОПЗ у границы кремний—сапфир при постоянном смещении U

сформировавшихся при перекристаллизации. Именно процессами генерации и захвата носителей заряда этими уровнями при обеднении можно объяснить возрастание емкости на низких частотах (см. рис. 4). В свою очередь, появление донорных глубоких центров у КНС с перекристаллизованным слоем может быть связано со структурной перестройкой границы кремний—сапфир, формируемой при отжиге в процессе перекристаллизации в том случае, когда на начальной стадии для аморфизации кремния используется имплантация ионов кислорода. Возможно, при этом происходит формирование кислородных образований вблизи границы раздела, например, преципитатов кислорода; именно наличие таких дефектов может приводить к появлению донорных глубоких уровней и к характерному изгибу на $C-V$ -кривой при смещении: $U = -0,5 \dots -2$ В.

Отметим, что для всех тестов как на стандартных КНС, так и на КНС с перекристаллизованным слоем характерны зависимости измеряемого сопротивления от частоты $R_{s,dep} \sim f^{-1,5}$ в области обеднения при измерении по последовательной схеме замещения (см. рис. 5). Наличие такой сильной частотной зависимости активного сопротивления в одном интервале для всех КНС с учетом разного характера изменения емкости от частоты (в одном случае $C_{s,dep} = const$, в другом — наличие частотно-емкостной зависимости) достаточно трудно объяснить. Возможно, это связано с особенностями используемой схемы измерения, а точнее, с используемой эквивалентной схемой замещения измеряемой структуры. Требуются дальнейшие исследования для уточнения реальной эквивалентной схемы замещения измеряемой структуры при работе в режиме обеднения.

Заключение

Выявлено наличие на границе кремний—сапфир центров, являющихся ловушками для электронов и влияющих на концентрацию свободных носителей заряда в эпитаксиальном субмикронном слое кремния в КНС-структурах.

Установлено наличие частотно-емкостных зависимостей для МДП/КНС-структур. Характер этих зависимостей определяется эффективной концентрацией носителей в слое кремния и геометрией тестируемой структуры.

Обнаружено, что проведение процесса перекристаллизации слоя кремния с помощью имплантации ионов кислорода и последующего отжига приводит к резкому уменьшению концентрации дефектов в слое кремния, формирующих компенсирующие глубокие акцепторные уровни.

Показано, что частотно-емкостная зависимость в режиме обеднения КНС/МДП-структур определяется особенностями границы кремний—сапфир. Перекристаллизация слоя кремния путем имплантации ионов кислорода с последующим отжигом может приводить к образованию центров, вносящих донорные уровни в запрещенную зону кремния, и к возникновению частотно-емкостной зависимости в области обеднения у таких структур.

Предложена эквивалентная схема замещения для КНС-структур в режиме аккумуляции.

Библиографический список

1. Nakamura, T. Silicon on sapphire (SOS) device technology / T. Nakamura, H. Matsuhashi, Y. Nagatomo // *Oki Techn. Rev.* – 2004. – Iss. 200. – V. 71, N 4. – P. 66—69.
2. Мустафаев, Аб. Г. Исследование гетерозитаксии кремния на сапфире при создании транзисторных структур / Аб. Г. Мустафаев, Г. А. Мустафаев, Ар. Г. Мустафаев // *Нано- и микросистемная техника.* – 2011. – № 8. – С. 41—43.
3. Александров, П. А. Особенности процесса твердофазной рекристаллизации аморфизированных ионами кислорода структур кремний—на—сапфире / П. А. Александров, К. Д. Демаков, С. Г. Шемардов, Ю. Ю. Кузнецов // *Физика и техника полупроводников.* – 2009. – Т. 43, вып. 5. – С. 627—629.
4. Jaron, G. Application of laser annealing techniques to increase channel mobility in silicon on sapphire transistors / G. Jaron, L. D. Hess // *Appl. Phys. Lett.* – 1980. – V. 36, N 3. – P. 220.
5. Алябьев, И. В. Состояние и проблемы КНС-технологии / И. В. Алябьев, Н. И. Блецкан, В. С. Папков // *Электронная промышленность.* – 1983. – Вып. 1(118). – С. 47—51.
6. Christoloveanu, S. Electrical characterization techniques for silicon on insulator materials and devices / G. Christoloveanu // *NATO ASI Ser.* – 1995. – V. 4. – P. 109—132.
7. Енишерлова, К. Л. Влияние γ -облучения на электрические параметры границы раздела кремний—сапфир в КНС-структурах / К. Л. Енишерлова, В. Г. Горячев, Е. Л. Шоболов // *Электрон. техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.* – 2011. – Вып. 2(227). – С. 70—80.
8. Тихов, С. В. Электрофизические свойства тонких слоев кремния на сапфире, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии / С. В. Тихов, В. Г. Шенгуров, Д. А. Павлов, П. А. Шилляев, Е. А. Питиримова, В. Н. Трушин, Е. В. Коротков, С. А. Денисов, В. Ю. Чалков // *Вестн. Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, Физика твердого тела.* – 2010. – № 2(1). – С. 60—65.
9. Neaman, D. Silicon sapphire interface charge trapping—effects of sapphire type and epi growth conditions / D. Neaman, W. Shedd, B. Buchanan // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1976. – V. NS-23, N 6. – P. 1590—1593.
10. Linda, F. H. JFET/SOS Devices—Pawrt II: Gamma—Radiation Induced effects / F. H. Linda, G. Thomas, Z. Zietlow, C. Barnts // *IEEE Transactions on Electron Devices.* – 1988. – V. 35, N 3. – P. 359—364.
11. Шулаков, А. С. Свойства межфазовой границы Al_2O_3/Si / А. С. Шулаков, А. П. Брайко, С. В. Букин, В. Е. Дрозд // *ФТТ.* – 2004. – Т. 46, вып. 10. – С. 1868—1875.
12. Schwank, J. Total dose effects in MOS devices / J. Schwank // *Short Course notebook: Radiation Effects—From Particles to Payloads. IEEE NSREC.* – 2002. – Ch. 3. – P. 1—123.
13. Сагоян, А. В. Особенности формирования и релаксации заряда в КНС-структурах при воздействии ионизирующего излучения / А. В. Сагоян, Г. Г. Давыдов // *Микроэлектроника.* – 2011. – Т. 40, № 3. – С. 209—223.