

Структуры кремний-на-изоляторе с азотированным захороненным слоем SiO₂: метод создания и свойства

© И.Е. Тыщенко, В.П. Попов

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 2 августа 2010 г. Принята к печати 25 августа 2010 г.)

Исследованы электрофизические свойства структур кремний-на-изоляторе с имплантированным ионами азота захороненным слоем SiO₂ в зависимости от дозы и энергии ионов N⁺. Показано, что имплантация ионов азота дозами $> 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ с энергией 40 кэВ приводит к уменьшению фиксированного положительного заряда в окисле и уменьшению плотности поверхностных состояний в 2 раза. Усиление эффекта может быть достигнуто путем снижения энергии ионов азота. Полученные результаты объясняются взаимодействием атомов азота с избыточными атомами кремния вблизи границы раздела Si/SiO₂ и удалением связей Si–Si, являющихся ловушками положительных зарядов, а также насыщением оборванных связей на границе сращивания структуры кремний-на-изоляторе.

1. Введение

Основным ограничением области практического применения структур кремний-на-изоляторе (КНИ) является накопление заряда в диэлектрике. Генерированные в валентной зоне SiO₂ свободные дырки захватываются на границе раздела Si/SiO₂. Локализованные таким образом на границе или вблизи границы раздела положительные заряды являются, как правило, „медленными состояниями“, характеризующимися большими временными константами, и могут медленно заряжаться или разряжаться при приложении положительных или отрицательных смещений. Накопление таких „аномальных положительных зарядов“ часто приводит к деградации изолирующего SiO₂ [1], а также влияет на параметры приборов, сформированных в верхнем слое КНИ, путем ограничения их стабильности во времени и снижения их радиационной стойкости.

Азотирование термического оксида в результате взаимодействия азота с избыточным кремнием приводит к удалению кремний-кремниевых связей [2]. Этот эффект используется для уменьшения концентрации дырочных ловушек в диэлектрике. Действительно, в литературе имеются многочисленные данные, которые показывают, что азотирование слоев SiO₂ является эффективным способом улучшения их электрофизических параметров [3–11]. В результате достигаются более высокие значения пробивных напряжений [3,4], пониженная плотность состояний на границе раздела с кремнием [5], улучшаются вольт-амперные ($I-V$) и вольт-фарадные ($C-V$) характеристики [6,7], формируется барьер для диффузии бора из поликристаллического затвора в подзатворный диэлектрик [8], повышается стойкость к ионизационному излучению [9–11]. Структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) с двойным диэлектриком получили распространение при производстве n -канальных радиационно стойких интегральных схем. В частности, использование промежуточных слоев

нитрида кремния было предложено как способ устранения токов утечки, возникающих после облучения МДП приборов на основе структур кремний-на-сапфире [11]. Позднее были сформированы ионно-синтезированные КНИ структуры с захороненным диэлектриком, состоящим из оксида и нитрида кремния [12]. Последующие исследования радиационно стойких КНИ структур были связаны в основном с усовершенствованием метода ионно-лучевого синтеза. С этой целью создавались КНИ структуры с многослойным захороненным диэлектриком, состоящим из слоев SiO₂ и Si₃N₄ [6,12–15], с захороненным слоем оксинитрида кремния [16], а также с модифицированным ионами азота слоем захороненного SiO₂ [17]. Имеющиеся способы создания КНИ структур с азотированным захороненным SiO₂ имеют целый ряд недостатков, присущих как методу ионного синтеза, так и методу ионной имплантации в целом и связанных с тем, что азотирование захороненного SiO₂ имплантацией ионов азота через отсеченный слой кремния приводит к генерации радиационных дефектов в слое кремния над изолятором и к нарушению границы Si/SiO₂. Это в свою очередь сопровождается накоплением дополнительных ловушек и в слое кремния, и на границе раздела. Поэтому поиск новых решений проблемы азотирования захороненного SiO₂ КНИ структур остается весьма актуальной задачей.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании электрофизических свойств КНИ структур, сформированных методом водородного переноса пленок кремния на имплантированные ионами N⁺ термически выращенные пленки SiO₂, в зависимости от дозы и энергии ионов азота.

2. Теория

Модели анализа свойств границы раздела структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник (ПДП) подробно рассмотрены в работах [18,19]. Если напряжение V_G приложено к пленке, а подложка структуры

† E-mail: tys@isp.nsc.ru

n -Si/SiO₂/ n -Si заземлена, то основные уравнения для описания емкостных свойств такой структуры могут быть записаны в следующем виде [18]:

$$V_G = \psi_{s2} - \psi_{s1} + V_{ox} + W_{12}, \quad (1)$$

$$Q_T = Q_{s1} + Q_{it2} + Q_{f1} = -Q_{s2} - Q_{it2} - Q_{f2}, \quad (2)$$

$$V_{ox} = Q_T / C_{ox}, \quad (3)$$

где ψ_{s1} — поверхностный потенциал границы сращивания КНИ структуры (между пленкой кремния и захороненным слоем SiO₂), ψ_{s2} — поверхностный потенциал термической границы раздела Si/SiO₂ (между захороненным слоем SiO₂ и кремниевой подложкой); Q_T — полный заряд в захороненном окисле, V_{ox} — потенциал, падающий на захороненном окисле; W_{12} — объемная разность потенциалов между пленкой и подложкой; Q_{s1} , Q_{s2} — поверхностные заряды, соответствующие слою кремния и кремниевой подложке; Q_{it1} , Q_{it2} — заряды на верхней и нижней границах Si/SiO₂ КНИ структуры; Q_{f1} и Q_{f2} — фиксированный заряд в окисле вблизи верхней и нижней границ Si/SiO₂. Полная емкость C_T ПДП структуры может быть выражена следующим образом:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{s1} + C_{it1}} + \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{s2} + C_{it2}}, \quad (4)$$

где $C_{s1,2} = -dQ_{s1,2}/d\psi_{s1,2}$ — соответствующая поверхностная емкость (индекс 1 относится к слою кремния, индекс 2 относится к подложке Si), $C_{it1,2} = -dQ_{it1,2}/d\psi_{s1,2}$ — статическая емкость ловушек на соответствующей границе раздела, C_{ox} — емкость захороненного окисла.

При изменении напряжения на затворе происходит изменение поверхностного потенциала на обеих границах раздела. При этом возможно перекрытие поверхностных потенциалов, которое должно зависеть не только от свойств кремния, но и от свойств границ раздела. Введение параметра, учитывающего перекрытие поверхностных потенциалов, позволяет свести эквивалентную схему ПДП структуры к эквивалентной схеме обычного МДП конденсатора. Это позволяет воспользоваться всеми основными уравнениями теории МДП конденсатора для описания емкостных свойств каждой из границ раздела КНИ структуры. Для случая отрицательных смещений на затворе (слой кремния на изоляторе находится в режиме обогащения, а подложка — в режиме обеднения) коэффициент перекрытия поверхностных потенциалов имеет вид [18]

$$K_2(\psi_{s2}) \equiv \frac{d\psi_{s1}}{d\psi_{s2}}. \quad (5)$$

Путем дифференцирования выражения (2) коэффициент перекрытия поверхностных потенциалов может быть приведен к виду

$$K_2(\psi_{s2}) = -\frac{C_{s2} + C_{it2}}{C_{s1} + C_{it1}}. \quad (6)$$

В соответствии с теорией МДП структур [20] зависимость поверхностного потенциала от напряжения на затворе может быть выражена через поверхностную емкость, емкость диэлектрика и емкость ловушек зарядов следующим образом:

$$\frac{d\psi_{s2}}{dV_G} = -\frac{C_{ox}}{C_{s2} + C_{it2} + C_{ox}(1 - K_2)}. \quad (7)$$

После подстановки выражения (6) в (4), используя выражение (7), получим

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1 - K_2}{C_{s2} + C_{it2}}. \quad (8)$$

Из выражения (8) хорошо видно, что при $K_2 = 0$ выражение для полной емкости ПДП структуры трансформируется в выражение для емкости МДП конденсатора. Соответствующие выражения могут быть записаны и для случая положительных смещений, когда в режиме обогащения находится подложка, а в режиме обеднения — слой кремния.

3. Методика эксперимента

На рис. 1 представлена схема создания КНИ структур с захороненным слоем SiO₂, азотированным имплантацией ионов азота. В качестве исходного материала использовались пластины кремния n -типа проводимости с удельным сопротивлением 5–10 Ом·см ориентации (100). Сначала на первой пластине термически была выращена пленка SiO₂ толщиной 300 нм. Затем в слой диоксида кремния были имплантированы ионы N⁺ (рис. 1, *a*). В первой серии экспериментов энергия ионов составляла 40 кэВ, а их доза варьировалась в интервале $(1-6) \cdot 10^{15}$ см⁻². Во второй серии экспериментов доза ионов была фиксированной и составляла $3 \cdot 10^{15}$ см⁻², а энергия ионов варьировалась от 20 до 40 кэВ. Используемые энергии ионов N⁺ обеспечивали формирование гауссианоподобных профилей с максимумом распределения на глубине от 70 до 130 нм соответственно, а концентрация атомов азота в максимуме распределения составляла 0.15–1.15 ат%. Во вторую пластину кремния внедрялись ионы водорода с энергией 140 кэВ дозой $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² (рис. 1, *b*). Затем в вакуумной камере проводилось соединение пластин имплантированными сторонами с одновременным отщеплением слоя кремния по созданной имплантацией ионов H⁺ внутренней гидрофобной поверхности и его переносом со второй пластины на первую (рис. 1, *c*). Процессы соединения пластин, расщепления и переноса слоя кремния осуществлялись в одну стадию при температуре 200°C в вакуумной камере с давлением 10² Па. Заключительный отжиг проводился при температуре 1100°C в течение 1 ч. Толщина перенесенного слоя Si составляла ~ 600 нм. Затем в результате последующего окисления толщина отсеченного слоя кремния была доведена до 350–370 нм.

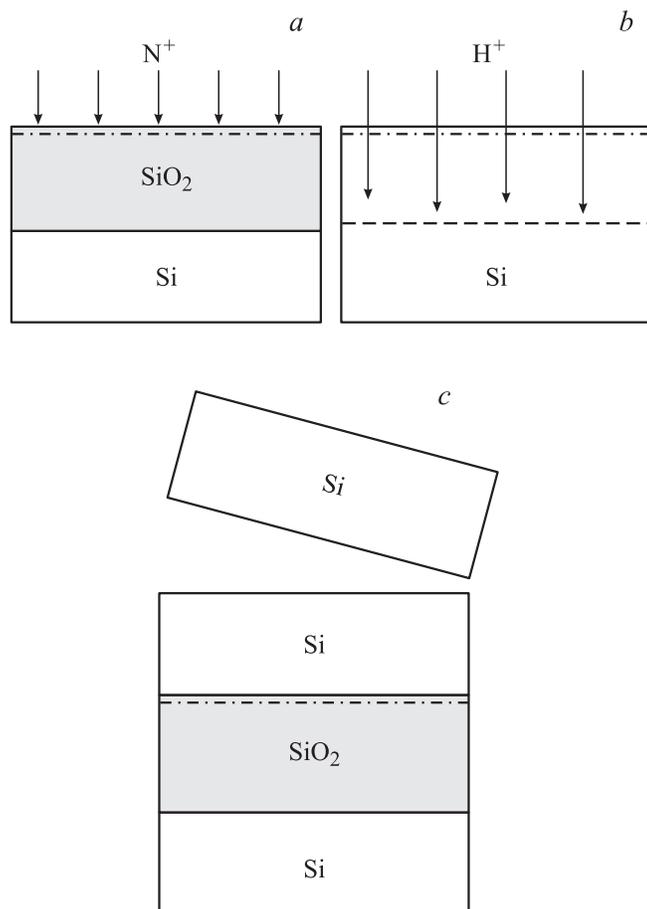


Рис. 1. Схематическое изображение формирования КНИ структуры с азотированным диэлектриком: *a* — имплантация ионов N⁺ в слой SiO₂, выращенный термически на первой пластине; *b* — имплантация ионов H⁺ во вторую пластину кремния; *c* — сращивание пластин имплантированными сторонами и перенос слоя Si.

С целью измерения влияния азота в захороненном слое SiO₂ на электрофизические свойства КНИ структур литографическим методом были сформированы мезаструктуры Al/*n*-Si/SiO₂/*n*-Si/Al площадью 700 × 700 мкм. Толщина алюминиевого затвора составляла 1000 нм. Вольт-фарадные характеристики (*C*–*V*-характеристики) и зависимости высокочастотной проводимости от напряжения (*G*–*V*-характеристики) измерялись при комнатной температуре и частоте зондирующего сигнала на затворе в интервале 10²–10⁶ Гц. Смещение прикладывалось к верхнему алюминиевому электроду, нижний электрод, со стороны подложки, был заземлен.

4. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены высокочастотные (1 МГц) вольт-фарадные характеристики КНИ конденсаторов, не содержащих азота в захороненном диэлектрике, а также структур со слоем SiO₂, имплантированным ионами N⁺

с энергией 40 кэВ дозами (1–6) · 10¹⁵ см⁻², после отжига при температуре 1100°С в течение 1 ч. Представленные на рисунке характеристики являются типичными для структур полупроводник–диэлектрик–полупроводник, представляющих собой два МДП конденсатора, включенных навстречу друг другу [18]. Здесь область отрицательных смещений соответствует режиму обеднения и затем инверсии подложки, с одной стороны, и режиму обогащения отсеченного слоя кремния, с другой. Область напряжений на затворе > 8 В, напротив, соответствует режиму обогащения основными носителями подложки и обеднению, а затем инверсии слоя кремния. Анализ концентрации легирующей примеси по минимальной высокочастотной емкости дает хорошее согласие с заданным уровнем легирования пластин, используемых в эксперименте.

Из рис. 2 видно, что имплантация азота в слой SiO₂ дозами (1–2) · 10¹⁵ см⁻² приводит к дополнительным смещениям в напряжении плоских зон (*V*_{FB}) для нижнего (*V*_{FB2}) и верхнего (*V*_{FB1}) МДП конденсаторов, что указывает на увеличение положительного встроенного заряда в диэлектрике. Дальнейшее увеличение содержания азота в SiO₂, соответствующего дозе ионов 3 · 10¹⁵ см⁻² и выше, приводит вновь к отрицательному смещению *V*_{FB} при положительных значениях напряжения на затворе, и при дозе ионов N⁺ 6 · 10¹⁵ см⁻² достигает значения, соответствующего напряжению плоских зон неазотированных структур. В области отрицательных напряжений на затворе *V*_{FB2} смещается при этом в сторону больших по сравнению с неазотированными структурами положительных значений, что является следствием уменьшения плотности положительных зарядов в диэлектрике вблизи границы раздела с кремниевой подложкой. Следует заметить, что плотность фиксированного заряда в диэлектрике КНИ структуры находится независимо в каждой из частей эксперимен-

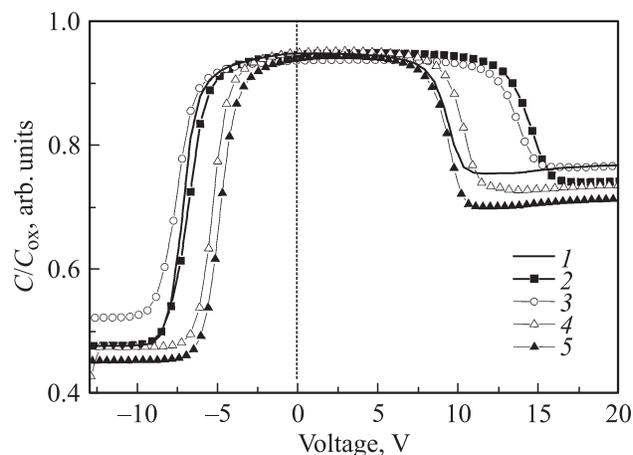


Рис. 2. Высокочастотные (10⁶ Гц) *C*–*V*-характеристики структур Al/*n*-Si/SiO₂/*n*-Si/Al с неазотированным (1) и имплантированным ионами N⁺ с энергией 40 кэВ слоем SiO₂ (2–5). Доза ионов N⁺, 10¹⁵ см⁻²: 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 6.

Таблица 1. Значения напряжения плоских зон (V_{FB1} и V_{FB2}), плотности фиксированного заряда (Q_{f1} и Q_{f2}) и площади сечения σ_{n1} захвата основных носителей состояниями на границах раздела КНИ структур с захороненным SiO_2 , имплантированным ионами N^+ с энергией 40 кэВ, дозами $(1-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, после отжига при 1000°C в течение 1 ч

Доза ионов N^+ , 10^{15} см^{-2}	V_{FB1} , В	V_{FB2} , В	Q_{f1} , 10^{11} см^{-2}	Q_{f2} , 10^{11} см^{-2}	σ_{n1} , см^2
0	8.1	-5.3	6.1	3.9	$7.0 \cdot 10^{-13}$
1	13.0	-6.0	9.8	4.3	$1.7 \cdot 10^{-14}$
2	12.2	-6.6	8.9	4.8	$5.6 \cdot 10^{-15}$
3	9.1	-4.6	6.8	3.3	$9.0 \cdot 10^{-15}$
6	8.3	-4.2	6.2	3.1	$9.5 \cdot 10^{-15}$

Таблица 2. Значения напряжения плоских зон (V_{FB1} и V_{FB2}), плотности фиксированного заряда (Q_{f1} и Q_{f2}) и площади сечения σ_{n1} захвата основных носителей состояниями на границах раздела КНИ структур с захороненным SiO_2 , имплантированным ионами N^+ с энергиями 40, 30 и 20 кэВ, дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, после отжига при 1000°C в течение 1 ч

Энергия ионов N^+ , кэВ	V_{FB1} , В	V_{FB2} , В	Q_{f1} , 10^{11} см^{-2}	Q_{f2} , 10^{11} см^{-2}	σ_{n1} , см^2
0	8.1	-5.3	6.1	3.9	$7.0 \cdot 10^{-13}$
40	9.1	-4.6	7.0	3.3	$9.0 \cdot 10^{-15}$
30	8.3	-4.2	6.4	3.0	$3.4 \cdot 10^{-15}$
20	7.3	-4.2	5.7	3.0	$9.5 \cdot 10^{-16}$

тальной высокочастотной $C-V$ -кривой, поскольку приложение напряжения, соответствующего обогащению вблизи одной из границ раздела, дает фиксированный заряд в окисле вблизи другой границы раздела. В нашем случае мы определяли смещение в напряжении плоских зон по разнице между экспериментальным и теоретическим значениями V_{FB} , полученными по пересечению линейных участков обратной квадратичной зависимости полной высокочастотной емкости в области обеднения каждой из границ раздела с линией, соответствующей емкости диэлектрика. В табл. 1 приведены значения V_{FB1} и V_{FB2} , а также значения плотности фиксированного заряда в диэлектрике, привязанные к каждой из границ раздела (Q_{f1} и Q_{f2}).

На рис. 3 представлены высокочастотные (1 МГц) вольт-фарадные кривые КНИ конденсаторов, не содержащих азота в слое диэлектрика, а также МДП структур со слоем SiO_2 , имплантированным ионами N^+ дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ с энергиями 20, 30 и 40 кэВ, после отжига при температуре 1100°C в течение 1 ч. Из рисунка видно, что снижение энергии ионов азота сопровождается положительным смещением в напряжении плоских зон V_{FB2} в области отрицательных смещений и отрицательным смещением V_{FB1} в области положительных смещений. Напряжения плоских зон и

плотности фиксированного заряда в окисле для каждого из рассмотренных случаев представлены в табл. 2.

Полученные данные могут быть объяснены на основе экспериментов, полученных методом фотоэлектронной спектроскопии [2]. Согласно этим исследованиям, в окисле кремния вблизи границы раздела Si/SiO_2 существует избыточный сверхстехиометрический кремний. Возбуждение избыточных $\text{Si}-\text{Si}$ -связей может приводить к захвату дырок и фиксированного положительного заряда в окисле. Азотирование термического оксида в результате взаимодействия атомов N с избыточными атомами кремния приводит к удалению $\text{Si}-\text{Si}$ -связей. Этот эффект сопровождается уменьшением концентрации дырочных ловушек в SiO_2 . В нашем случае имплантация малых доз азота недостаточна для компенсации имеющихся $\text{Si}-\text{Si}$ -связей и приводит лишь к генерации дополнительных дефектов, в том числе и вблизи границы раздела. По-видимому, этот эффект и является причиной роста положительного фиксированного заряда в структурах, имплантированных малыми дозами ионов N^+ . Увеличение дозы азота до $(4-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ оказывается достаточным для того, чтобы компенсировать $\text{Si}-\text{Si}$ -связи вблизи границ раздела путем формирования связей $\text{Si}-\text{N}-\text{Si}$ или $\text{Si}-\text{N}-\text{O}$, в результате чего мы наблюдаем снижение положительного фиксированного заряда в диэлектрике вблизи границ Si/SiO_2 .

На рис. 4 представлены $C-V$ - и $G-V$ -характеристики структур, не содержащих азот в захороненном SiO_2 , измеренные при частотах $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^5$ Гц. Из рис. 4, а видно, что в области отрицательных напряжений на затворе > 4 В, соответствующих режиму обеднения и начала инверсии в кремниевой подложке, а также обогащения в слое кремния над изолятором, величина емкости при фиксированном напряжении падает с ростом частоты. Аналогичное поведение емкости в зависимости от частоты наблюдается и в области положительных

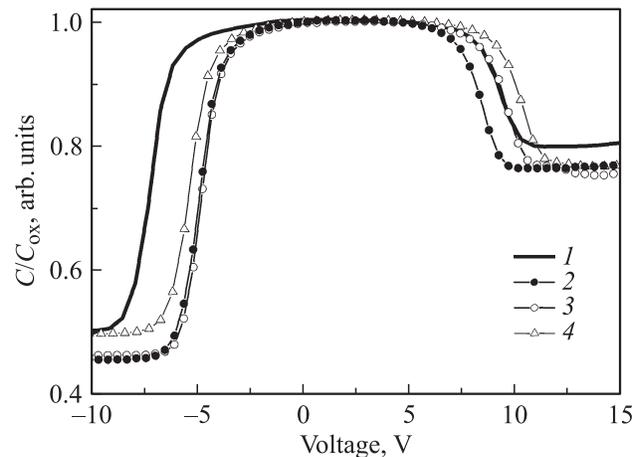


Рис. 3. Высокочастотные (10^6 Гц) $C-V$ -характеристики структур $\text{Al}/n\text{-Si}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}/\text{Al}$ с неазотированным (1) и имплантированным ионами N^+ дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ слоем SiO_2 (2-4). Энергия ионов N^+ , кэВ: 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40.

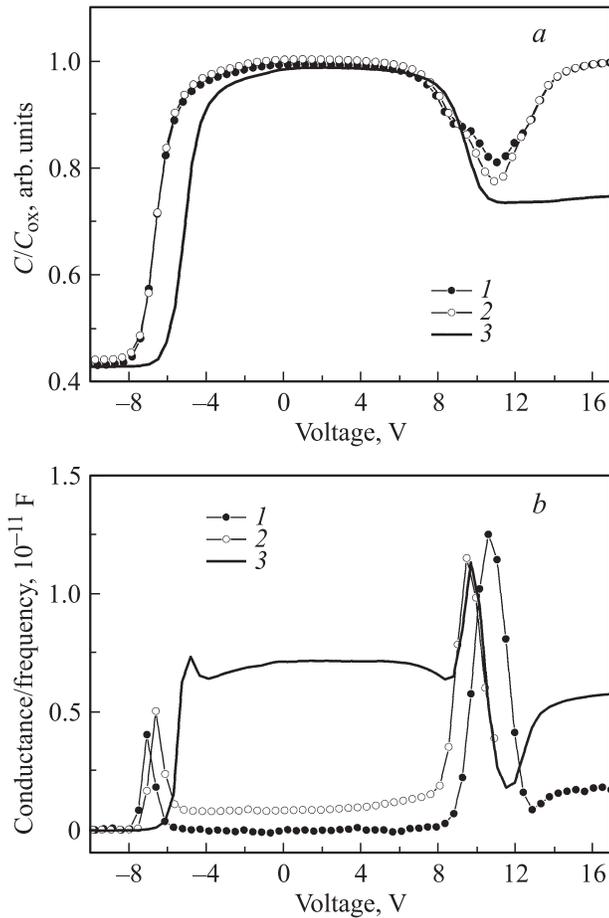


Рис. 4. $C-V$ - (*a*) и $G-V$ - (*b*) характеристики структур $Al/n-Si/SiO_2/n-Si/Al$, не содержащих азот в захороненном окисле, при частотах $5 \cdot 10^2$ (*1*), $5 \cdot 10^3$ (*2*) и $5 \cdot 10^5$ Гц (*3*).

напряжений (> 8 В), где слой кремния обедняется, а кремниевая подложка находится в режиме обогащения основными носителями. Это указывает на наличие поверхностных состояний на соответствующих границах раздела Si/SiO_2 . Представленные на рис. 4, *b* $G-V$ -характеристики имеют пики емкостной проводимости, что также свидетельствует о наличии поверхностных состояний. Интенсивность пиков проводимости, соответствующих границе сращивания КНИ структуры, мало изменяется с ростом частоты, в то время как интенсивность пиков, соответствующих термической границе Si/SiO_2 , увеличивается в 2 раза с ростом частоты в указанном интервале. С ростом частоты наблюдается и небольшое смещение положения пиков проводимости по оси напряжений. Это свидетельствует о дисперсионной зависимости плотности поверхностных состояний. Следует заметить, что пики не перекрываются друг с другом даже при самых высоких частотах, что указывает на слабое взаимодействие поверхностных потенциалов между двумя границами Si/SiO_2 . Аналогичные измерения были проведены и для структур, содержащих азот в захороненном окисле.

На рис. 5 представлены кривые емкостной проводимости, измеренные при частоте 1 кГц, в зависимости от напряжения на алюминиевом электроде для разных доз ионов N^+ , имплантированных с энергией 40 кэВ в захороненный слой SiO_2 (рис. 5, *a*), а также для разных энергий ионов азота, имплантированных дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (рис. 5, *b*). Из рис. 5, *a* видно, что в неазотированных структурах пик проводимости имеет максимум при смещениях ~ 10 В, что соответствует режиму обеднения слоя кремния. После имплантации малых доз ионов азота в области положительных смещений доминирует пик проводимости, положение которого соответствует режиму сильной инверсии. С ростом дозы ионов азота до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ пик проводимости становится бимодальным. Наряду с доминирующим максимумом проводимости в области инверсии в слое кремния на изоляторе появляется менее интенсивное плечо в области напряжений ~ 11 В, соответствующих режиму обеднения слоя. Дальнейшее увеличение дозы ионов азота сопровождается затуханием высоковольтного пика

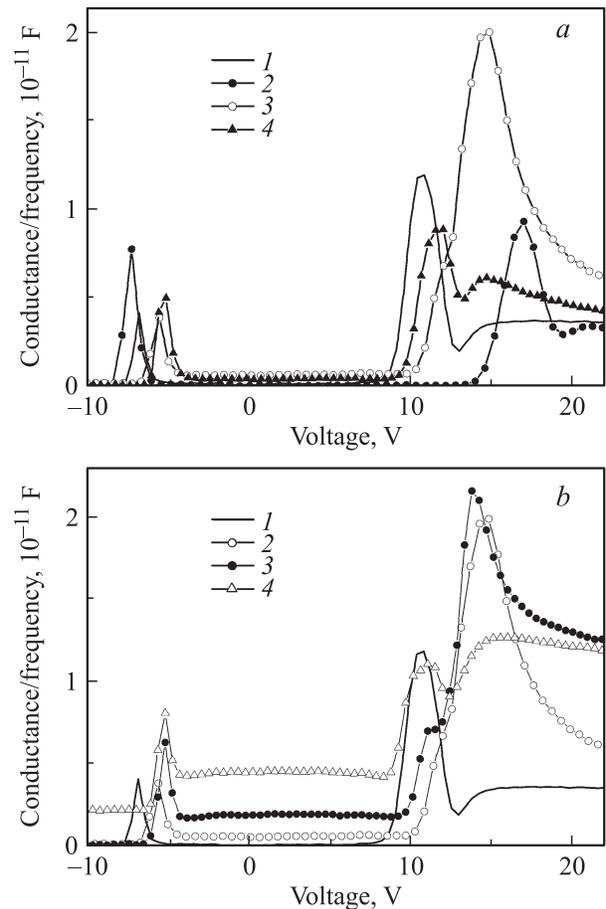


Рис. 5. $G-V$ -характеристики структур $Al/n-Si/SiO_2/n-Si/Al$ с неазотированным (*1*) и имплантированным ионами N^+ слоем SiO_2 . *a* — энергия ионов N^+ 40 кэВ, доза: $1 \cdot 10^{15}$ (*2*), $3 \cdot 10^{15}$ (*3*), $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (*4*); *b* — доза ионов N^+ $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, энергия ионов N^+ : 20 (*2*), 30 (*3*), 40 кэВ (*4*). Частота измерений 10³ Гц.

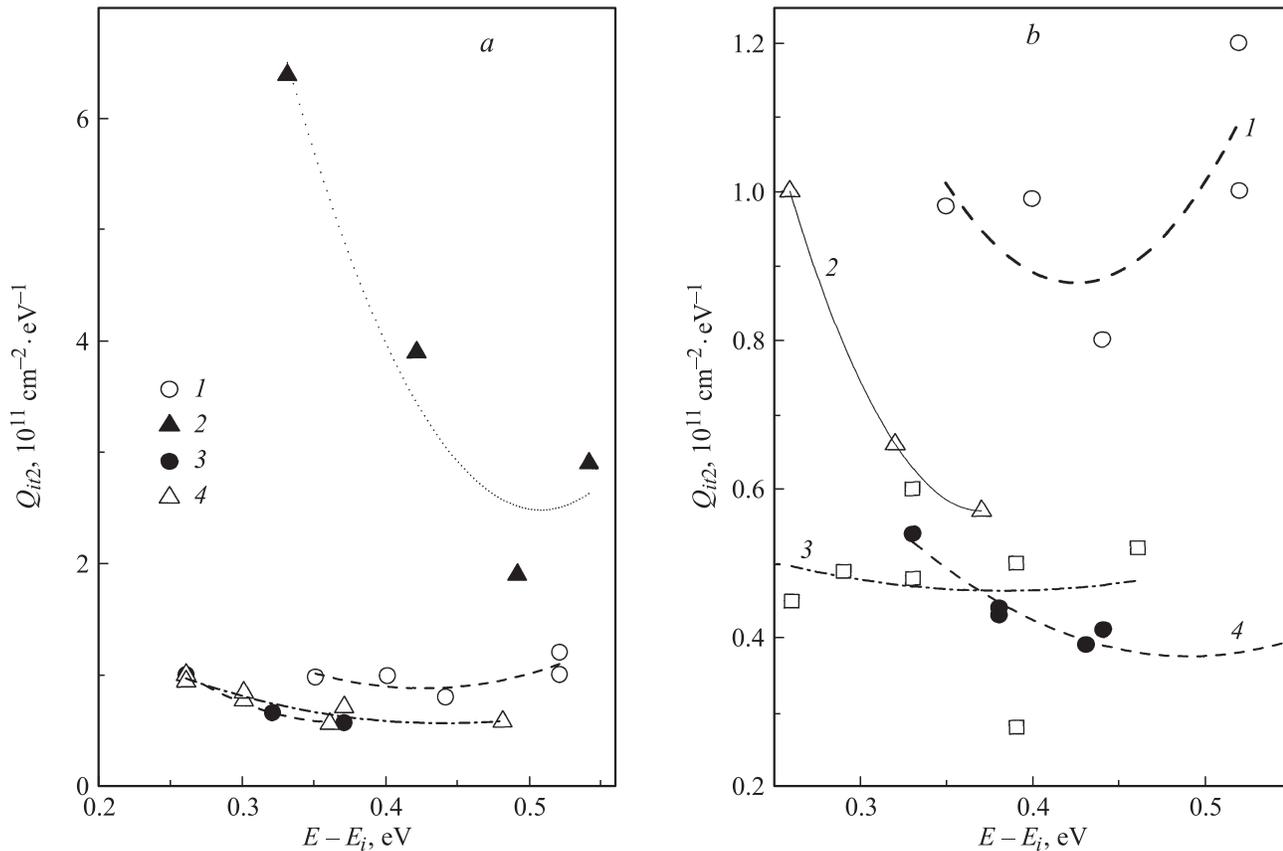


Рис. 6. Распределение плотности поверхностных состояний в верхней половине запрещенной зоны, полученное методом проводимости на границе сращивания КНИ структуры, для разных значений доз (*a*) и энергий (*b*) ионов N^+ , имплантированных в захороненный слой оксида кремния. *a* — ионы N^+ с энергией 40 кэВ, доза 0 (1), $1 \cdot 10^{15}$ (2), $3 \cdot 10^{15}$ (3), $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (4); *b* — доза ионов N^+ $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, энергия 0 (1), 40 (2), 30 (3), 20 кэВ (4).

проводимости и ростом интенсивности пика с максимумом вблизи 10 В. При этом положение последнего становится близким к положению пика проводимости незаотированной структуры. Подобным образом ведут себя и соответствующие пики проводимости в зависимости от энергии ионов азота (рис. 5, *b*). В этом случае с уменьшением энергии ионов N^+ от 40 до 20 кэВ интенсивность высоковольтного пика проводимости (вблизи 15 В) уменьшается, а низковольтного (вблизи 10 В) растет. Полученные данные указывают на наличие двух типов ловушек зарядов. В области обеднения емкостная проводимость определяется взаимодействием основных носителей (электронов) с центрами захвата, а в области инверсии процессы генерации–рекомбинации определяются неосновными носителями заряда, т. е. дырками.

Анализ плотности состояний на границах раздела КНИ структуры может быть сделан из частотных зависимостей максимума емкостной проводимости и соответствующей емкости [21]:

$$Q_{it} = \left(\frac{2}{qS}\right) \left(\frac{G_m}{\omega}\right) / \left[\left(\frac{G_m}{\omega C_{ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_{ox}}\right)^2 \right], \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, f — частота измерения, S — площадь алюминиевого электрода, G_m —

измеренное в максимуме значение емкостной проводимости, C_m — емкость, соответствующая значению G_m . Выражение (9) не учитывает перекрытия поверхностных потенциалов границ раздела КНИ структуры. Однако в режиме обеднения слоя кремния основными носителями, в котором как раз и наблюдаются пики проводимости, подложка находится в режиме обогащения, т. е. влияние термической границы раздела в этом случае будет чрезвычайно мало. Согласно литературным данным [18], ошибка в определении плотности поверхностных состояний без учета коэффициента перекрытия поверхностных потенциалов составляет $\sim 10\%$.

На рис. 6 представлено распределение плотности поверхностных состояний в верхней половине запрещенной зоны, полученное методом проводимости на границе сращивания КНИ структуры, для разных значений доз (рис. 6, *a*) и энергий (рис. 6, *b*) ионов N^+ , имплантированных в захороненный слой оксида кремния. Энергия залегания уровней $E - E_i$ (E_i — середина запрещенной зоны кремния) рассчитывалась для значений поверхностного потенциала, при которых достигался максимум емкостной проводимости. Поверхностный потенциал ψ_s может быть определен из низкочастотной $C-V$ -харак-

теристики в том случае, когда при данной частоте достигается условие равновесия. В нашем случае мы воспользовались данными $C-V$ -измерений при частоте 100 Гц для определения поверхностного потенциала границы сращивания. Интегрирование зависимости $d\psi_s/dV = 1 - C/C_{ox}$ проводилось в интервале напряжений от V_{FB} , где величина поверхностного потенциала равна нулю, до $V = V_i$, при котором начинается инверсия:

$$\psi_s = \int_{V_{FB}}^{V_i} (1 - C/C_{ox}) dV.$$

Эффективная плотность поверхностных состояний, соответствующая пику с энергией $E - E_i$ (рис. 6), позволяет получить полную плотность поверхностных состояний в запрещенной зоне путем интегрирования кривых рис. 6 по всей запрещенной зоне.

По данным емкостной проводимости в зависимости от частоты можно определить времена рекомбинационно-генерационных процессов τ_R с участием поверхностных состояний на границе сращивания. Величина емкостной проводимости достигает максимума, когда $\omega\tau_R = 1$. Величина τ_R в случае n -типа проводимости (τ_{Rn}) может быть описана следующим выражением [20]:

$$\tau_{Rn} = \frac{1}{\bar{v}\sigma_n N_D} \exp[q\psi_s/kT], \quad (11)$$

где $\bar{v} = \sqrt{3kT/m_e}$ — средняя тепловая скорость, m_e — масса электрона, σ_n — поперечное сечение захвата электронов, T — температура, k — постоянная Больцмана. Из выражения (11) видно, что при нулевом поверхностном потенциале поперечное сечение захвата носителей обратно пропорционально временной постоянной процессов генерации—рекомбинации. Таким образом, построив зависимость τ_{Rn} от ψ_s , мы оценили сечения захвата электронов поверхностными состояниями на границе сращивания в зависимости от дозы и энергии имплантированных атомов азота. Эти значения представлены в табл. 1. Видно, что с ростом концентрации атомов азота внутри захороненного окисла сечение захвата основных носителей на границе сращивания уменьшается более чем на 2 порядка величины. С уменьшением энергии ионов N⁺ до 20 кэВ, т.е. с приближением азотсодержащего слоя к границе раздела Si/SiO₂, падение σ_n по сравнению с неазотированной границей сращивания может достигать 3 порядков величины (табл. 2).

Полученные данные показывают, что эффективная плотность поверхностных состояний на границе сращивания имеет такую же зависимость от дозы и энергии ионов N⁺, как и фиксированный заряд в окисле. Увеличение дозы ионов азота или уменьшение их энергии, сопровождающееся ростом концентрации атомов азота вблизи границы сращивания, приводит к снижению плотности поверхностных состояний в 2 раза. Этот результат может быть объяснен насыщением оборванных связей на границе Si/SiO₂ за счет встраивания атомов азота

и формирования субнанометрового слоя оксинитрида кремния в области границы сращивания.

5. Заключение

Методом $C-V$ - и $G-V$ -характеристик исследованы электрофизические свойства структур кремний-на-изоляторе с имплантированным ионами азота захороненным слоем SiO₂ в зависимости от дозы и энергии ионов N⁺. Установлено, что имплантация малых доз ионов N⁺ ($< 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) стимулирует рост положительного встроенного заряда в окисле вблизи границ раздела Si/SiO₂ и увеличивает плотность поверхностных состояний. Увеличение дозы азота ($> 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) или снижение энергии ионов приводит к уменьшению фиксированного положительного заряда в окисле и уменьшению плотности поверхностных состояний в 2 раза. Показано, что эффективная площадь сечения захвата основных носителей заряда поверхностными состояниями падает с ростом концентрации азота вблизи границы раздела Si/SiO₂ на 2–3 порядка величины. Полученные результаты объясняются взаимодействием атомов азота с избыточными атомами кремния вблизи границы раздела Si/SiO₂ и удалением Si–Si-связей, являющихся ловушками положительных зарядов, а также насыщением оборванных связей на границе сращивания.

Авторы выражают благодарность В.А. Гриценко и С.С. Шаймееву за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] M.V. Fischetti. J. Appl. Phys., **57**, 2860 (1985).
- [2] В.А. Гриценко. УФН, **178**, 727 (2008).
- [3] M.Y. Hao, W.M. Chen, K. Lai, J.C. Lee. Appl. Phys. Lett., **66**, 1126 (1995).
- [4] S.B. Kang, S.O. Kim, J.-S. Byun, H.J. Kim. Appl. Phys. Lett., **65**, 2448 (1994).
- [5] E.C. Carr, R.A. Buhrman. Appl. Phys. Lett., **63**, 54 (1993).
- [6] Z.Q. Yao, H.B. Harrison, S. Dimitrijevic, D. Sweatman. Appl. Phys. Lett., **64**, 3584 (1994).
- [7] W.B. Yi, E.X. Zhang, M. Chen, N. Li, G.Q. Zhang, Z.L. Liu, X. Wang. Semicond. Sci. Technol., **19**, 571 (2004).
- [8] M.L. Green, D. Brasen, K.W. Evans-Lutterodt, L.C. Feldman, K. Krish, W. Lennard, H.-T. Tang, L. Manhandia, M.-T. Tang. Appl. Phys. Lett., **65**, 849 (1994).
- [9] S.K. Dixit, S. Dhar, J. Rozen, S. Wang, R.D. Schrimpf, D.M. Fleetwood, S.T. Pantelides, J.R. Williams, L.C. Feldman. IEEE Trans. Nucl. Sci., **53**, 3687 (2006).
- [10] C.W. Perkins, K.G. Aubuchon, H.G. Dill. IEEE Trans. Nucl. Sci., **S-15**, 176 (1968).
- [11] D. Neamen, W. Sheold, B. Buchanau. IEEE Trans. Nucl. Sci., **S-22**, 2203 (1975).
- [12] P.L.F. Hemment. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **33**, 41 (1984).
- [13] K.J. Reeson. Nucl. Instrum. Meth. B, **19/20**, 269 (1987).
- [14] W. Skorupa, K. Wollschlaeger. Nucl. Instrum. Meth. B, **32**, 440 (1988).

- [15] K.J. Reeson, P.L.F. Hemment, C.D. Meekison, C.D. Marsh, G.R. Booker, R.J. Chater, J.A. Kilner, J. Davis. Nucl. Instrum. Meth. B, **32**, 427 (1988).
- [16] A.B. Danilin, K.A. Drakin, V.V. Kukin, A.A. Malinin, V.N. Mordkovich, A.F. Petrov, V.V. Saraykin, O.I. Vyletalina. Nucl. Instrum. Meth. B, **58**, 191 (1991).
- [17] E. Zhang, W. Yi, J. Chen, Zh. Zhang, X. Wang. Smart Mater. Struct., **14**, N 42 (2005).
- [18] H.-S. Chen, S.S. Li. IEEE Trans. Electron. Dev., **39**, 1740 (1992).
- [19] S. Cristoloveanu, S.S. Li. *Electrical characterization of silicon-on-insulator materials and devices* (Kluwer Academic Publishers, Boston–Dordrecht–London, 1995).
- [20] E.N. Nicollian, J.R. Brews. *MOS (Metal–Oxide–Semiconductor) Physics and Technology* (N.Y., Wiley, 1982).
- [21] W.A. Hill, C.C. Coleman. Sol. St. Electron., **23**, 987 (1980).

Редактор Л.В. Шаронова

Silicon-on-insulator structures with nitrated buried SiO₂ layer: preparation and properties

I.E. Tyschenko, V.P. Popov

Institute of Semiconductor Physics,
Russian Academy of Sciences,
Siberian Branch,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Electrical properties of silicon-on-insulator (SOI) structures with the nitrogen-ion implanted buried SiO₂ layer have been investigated as a function both of dose and energy of N⁺ ions. It has been shown that the nitrogen ion implantation to doses higher than $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ at the energy of 40 keV decreases positive fixed charge in silicon dioxide as well as surface state density by the factor 2. This effect may be enhanced by the reduced nitrogen ion energy. The obtained results have been explained by interaction of nitrogen with excess silicon atoms located near the bonding interface. This results in removing of Si–Si bonds which are the positive charge traps and in saturation of silicon dangling bonds at the bonding interface of the SOI structure.