

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.1.04

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ В КРЕМНИИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ АЗОТА И АРГОНА

© 2007 г.

Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, К.А. Марков, В.В. Сдобняков

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

vestnik@unn.ru

Поступила в редакцию 5.04.2007

Методами просвечивающей электронной и зондовой микроскопий, ИК-спектроскопии и регистрации вольтамперных характеристик осуществлялся поиск способов увеличения температурного интервала стабильности ионно-синтезированного нитрида кремния. Проводился ряд экспериментов для исследования дальнего действия при последовательном облучении кремния встречными пучками ионов азота и аргона.

Введение

Работа посвящена исследованию двух проблем. Совершенствование технологии создания систем «кремний на изоляторе» (КНИ), а именно случая, когда изолятором является нитрид кремния, создаваемый ионной имплантацией. Выяснение одного из механизмов так называемого эффекта дальнего действия (ЭД) при ионной бомбардировке. Эти исследования представляют интерес как с познавательной, так и с практической точки зрения.

Интерес к слоям, полученным ионной имплантацией азота в кремний (кроме возможности синтеза диэлектрика в едином цикле в технологии с имплантаторами), связан с возможностью получения очень актуальных структур кремний на изоляторе. При облучении кремния ионами азота с энергией приблизительно 200 кэВ и дозой около 10^{18} см⁻² (достаточной для формирования стехиометрического Si₃N₄) можно получить «захороненный» диэлектрический слой, отделяющий тонкий порядка 200 нм слой кремния для создания в нём микроэлектронных схем. Проблема состоит в том, что в процессе отжига таких нитридных слоёв при температурах порядка 1000°C происходит их растрескивание из-за кристаллизации. Превращение аморфного нитрида кремния в кристаллический в ионно-синтезированных слоях происходит при температурах на 200–

300°C ниже, чем в случаях других вариантов формирования Si₃N₄. В результате портится структура поверхностного слоя кремния, резко ухудшаются изолирующие свойства слоя Si₃N₄.

Ранее было установлено [1–8], что если облучить ионами аргона при температуре 500°C и дозе 10^{17} см⁻² пластину кремния толщиной 600 мкм, то происходит существенное увеличение сопротивления азотированного слоя.

К началу выполнения данной работы имелись данные только о факте существования этого эффекта. Дозовая зависимость была определена с большим шагом, что не позволяло однозначно утверждать: изменения имеют пороговый характер или плавно нарастают с ростом дозы. Также оставалась невыясненной зависимость данного эффекта от температуры облучения ионами аргона.

В связи с этим представляли интерес следующие исследования:

- подробное изучение интервала доз облучения Ar⁺ 10^{16} – 10^{17} см⁻²;
- исследование изолирующих и структурных свойств гетероструктур Si_xN_y-Si от температуры имплантации Ar⁺;
- выяснение возможности предотвращения кристаллизации слоев нитрида кремния, облученных ионами аргона при термообработках;
- сопоставление свойств слоев прошедших обработку ионами Ar⁺ и отжигом.

Методика эксперимента

В экспериментах использовались пластины кремния промышленных марок БКЭ-100, БКД-2000 и КЭМ-0,005 с ориентацией (111), толщиной 0,3–0,6 мм. Все образцы подвергались стандартной ХМП-обработке.

Для получения приповерхностных азотированных слоев ионы азота имплантировались в кремний с энергией пучка $E_N=40$ кэВ, дозой внедрения $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см⁻², температурой внедрения азота $T_N=400^\circ\text{C}$, а плотность ионного потока не превышала $j_N \leq 10^{14}$ см⁻²с⁻¹. Затем проводилось облучение с обратной стороны ионами аргона (или неона, кремния) со следующими параметрами: $E_{Ar,Ne,Si}=40$ кэВ, доза внедрения $\Phi_{Ar}=10^{15}-3 \cdot 10^{17}$ см⁻² ($\Phi_{Ne,Si}=10^{17}$ см⁻²), плотность потока ионов $j_{Ar,Ne,Si} \leq 10^{14}$ см⁻²с⁻¹. Температура образца при имплантации аргона изменялась от комнатной до 500°C . В некоторых сериях экспериментов образцы после последовательного облучения встречными пучками ионов азота и аргона подвергались постимплантационному отжигу при температурах от 500°C до 1200°C в атмосфере осушенного азота.

Изменения в слоях Si_xN_y отслеживались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), ИК-спектроскопии и регистрации вольтамперных характеристик (ВАХ).

В приведенных исследованиях использовался электронный микроскоп марки ЭМ-100 при ускоряющем напряжении 75 кВ. ИК-спектры записывались на спектрометре Bruker IFS 113V, здесь применялись высокоомные подложки кремния. Для электрических измерений использовались поверхностные слои Si_xN_y на пластинах КЭМ-0,005. ВАХ измерялись по двухконтактной схеме $\text{Me-Si}_x\text{N}_y\text{-Si-Me}$. Выбор низкоомной подложки КЭМ-0,005 был сделан для того, чтобы уменьшить вклад ее собственного сопротивления и барьерных эффектов в общее сопротивление структуры. В качестве контактного материала использовался эвтектический сплав In-Ga с диаметром контактных площадок 5 мм.

Состояние поверхности, облученной аргоном, изучалось с помощью атомно-силовой микроскопии и электронографии на отражение.

Результаты и обсуждение

1. Изучение состояния нитридного слоя

В результате проведенных исследований было обнаружено, что облучение ионами аргона с дозой менее 10^{16} см⁻² не вносит существенных изменений в изолирующие и структурные свойства синтезированных слоев. В диапазоне доз $10^{16}-8 \cdot 10^{16}$ см⁻² повторяемость результатов эксперимента была низкой. На рис. 1 приведены результаты исследований двух серий образцов. Конкретное значение дозы, видимо, зависит от исходного состояния кремниевых пластин. При превышении дозы $8 \cdot 10^{16}$ см⁻² изолирующие свойства существенно меняются, в частности резко возрастает величина среднего удельного сопротивления, уменьшаются токи утечки. Дальнейшее увеличение дозы (свыше 10^{17} см⁻²) не приводило к дополнительным изменениям электрических свойств ионно-синтезированных слоев.

Зависимость среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y от температуры имплантации ионов аргона ($E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=10^{17}$ см⁻²) представлена на рис. 2. Видно, что при температурах имплантации аргона ниже 500°C свойства слоя почти не меняются по сравнению со свойствами образцов, для которых дополнительной ионно-лучевой обработки ионами аргона не проводилось. Значения эффективного удельного сопротивления составляли $\sim 10^8$ ом·см. При температуре облучения 500°C и более

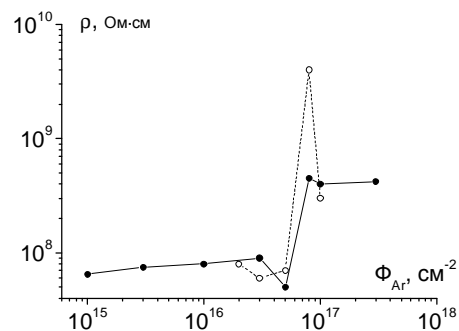


Рис. 1. Зависимость среднего удельного сопротивления ионно-синтезированного слоя Si_xN_y от дозы облучения аргоном в тыльную сторону пластины кремния

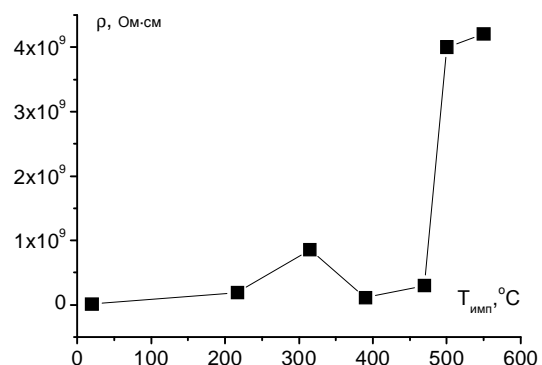


Рис. 2. Зависимость среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y от температуры имплантации аргона ($E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=10^{17}$ см⁻²) в

наблюдалось резкое увеличение сопротивления до $4 \cdot 10^9$ ом·см.

Сопоставление влияния стационарных отжигов на свойства гетероструктур $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-Si}$,

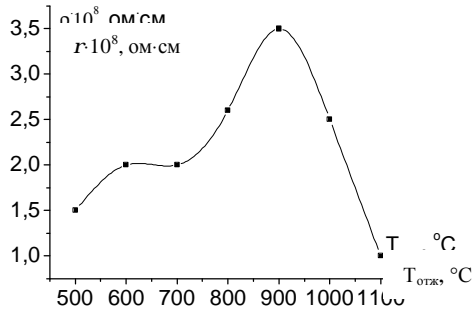


Рис. 3. Зависимость среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y ($\Phi_N = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $E_N = 40 \text{ кэВ}$, $T_N = 400^\circ\text{C}$) от температуры постимплантационного отжига для образца кремния, облученного ионами аргона при $E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 20^\circ\text{C}$

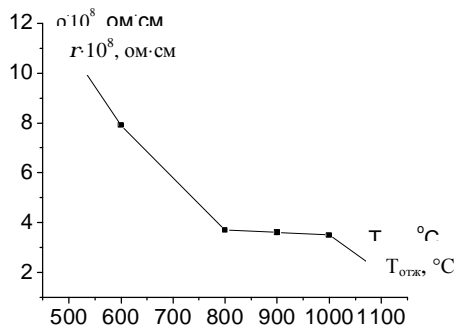


Рис. 4. Зависимость среднего удельного сопротивления нитридного слоя ($E_N = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_N = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_N = 400^\circ\text{C}$) от температуры постимплантационного отжига для образца, облученного ионами Ar^+ ($E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$)

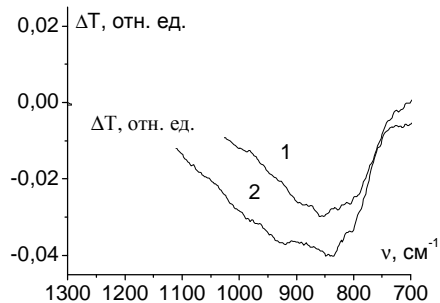


Рис. 5. Разница в ИК-спектрах пропускания $\nu, \text{см}^{-1}$ слоев кремния, облученных ионами азота с $E_N = 150 \text{ кэВ}$, $\Phi_N = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_N = 400^\circ\text{C}$ и после отжига при $T_N = 700^\circ\text{C}$ (кривая 1); облучения Ar^+ с $E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$ (кривая 2)

облученных ионами аргона при $T_{\text{имп}} = 20$ и 500°C , показало, что в случае облучения при комнатной температуре свойства ионно-

синтезированной слоя Si_xN_y с температурой отжига меняются аналогично свойствам образцов, не облученных ионами аргона [5, 8], а именно: зависимость удельного сопротивления имеет колоколообразный вид, кристаллизация начинается с температур порядка 800°C (рис. 3).

Свойства образцов, облученных ионами аргона при $T_{\text{имп}} = 500^\circ\text{C}$ и отожженных при $T = 500\text{—}1100^\circ\text{C}$ сильно отличались от облученных аргоном при комнатной температуре (рис. 4). При $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$ величина среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y максимальна и близка к таковой для образца, облученного только ионами азота и отожженного при $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$. В работах [5, 8] показано, что наибольшее значение среднего удельного сопротивления и амплитуды ИК-поглощения при термической обработке зафиксировано на образцах, отожженных именно при этой температуре. Таким образом, можно предположить, что имплантация аргона при $T_{\text{имп}} = 500^\circ\text{C}$ приводит к тому, что практически весь азот, не прореагировавший с кремнием в процессе имплантации, вступает в реакцию с кремнием. Последующий стационарный отжиг приводит к снижению величины среднего удельного сопротивления по причине выделения кремния во вторую фазу. В пользу того, что аргоновая обработка «дожигает» внедренный азот говорит и то, что высокочастотное крыло $900\text{—}1050 \text{ см}^{-1}$ на ИК-спектре пропускания даже более интенсивное, чем при отжиге 700°C (рис. 5).

Микродифракционная картина для образца, облученного Ar^+ при $T_{\text{имп}} = 500^\circ\text{C}$ и отожженного даже при $T_{\text{отж}} = 1100^\circ\text{C}$ имеет вид характерный для аморфных материалов (диффузное галло), в отличие от микродифракции образцов без облучения Ar^+ или облученных аргоном при $T_{\text{имп}} = 20^\circ\text{C}$ после отжига этой же температуре, на которых явно видны два концентрических кольца, что указывает на начало кристаллизации (рис. 6).

Таким образом, при последовательном облучении кремниевой пластины встречными пучками ионов азота и аргона, когда внедрение аргона происходит при дозе $\Phi_{\text{Ar}} \geq 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и температуре 500°C , имеет место стимулирование реакции взаимодействия кремния с азотом, разрушаются центры кристаллизации сформированного нитрида кремния. В результате ионно-синтезированные слои Si_xN_y сохраняются в аморфном состоянии, не происходит связанного с кристаллизацией растрескивания слоев и ухудшения их

изолирующих свойств, по крайней мере, при отжиге до 1100°C.

Для объяснения изменений свойств ионно-синтезированных слоев нитрида кремния в кремнии при облучении аргоном ранее была предложена модель [6], согласно которой на азотированный слой воздействуют акустические гиперзвуковые импульсы давления, излучаемые в результате скачкообразной эволюции дислокационной сетки под облученным аргоном

слоем кремния или взрыва пузырьков аргона – блистеров в насыщенном аргоном слое кремния (рис. 7–9). Перепад давления от них даже на глубине около 600 мкм с учетом затухания составляет порядка 10^7 Па.

Представляло интерес определить величину вклада, оказываемого каждым из перечисленных механизмов, а также ответить на вопрос: почему модификация свойств при $\Phi_{Ar} \geq 10^{17} \text{ см}^{-2}$ происходила при $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$ и не

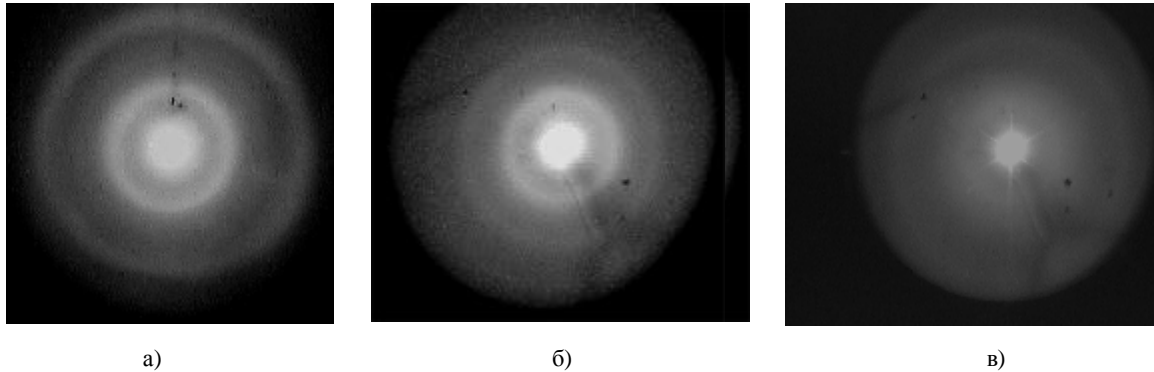


Рис. 6. Микродифракции слоев Si_3N_4 ($E_N = 40$ кэВ, $\Phi_N = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_N = 400^\circ\text{C}$) (а) – отожженный при $T_{отж} = 900^\circ\text{C}$ (без облучения ионами аргона), (б) – облученный ионами аргона с $E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{Ar} = 20^\circ\text{C}$ и отожженный при $T_{отж} = 1100^\circ\text{C}$, (в) – после облучения ионами аргона с $E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$ и отжига при $T_{отж} = 1100^\circ\text{C}$. Время отжига 30 мин

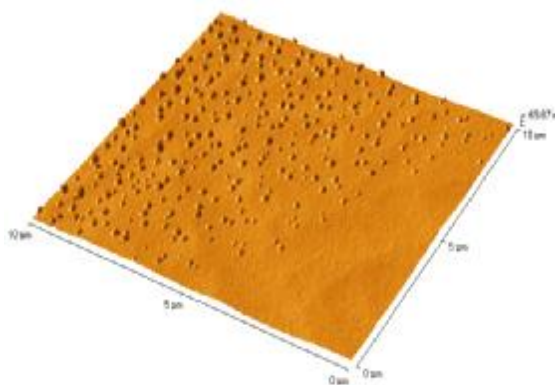


Рис. 7. AFM-изображение поверхности кремния, облученной аргоном ($E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$). Изображение получено вблизи границы тени от держателя кристалла при облучении

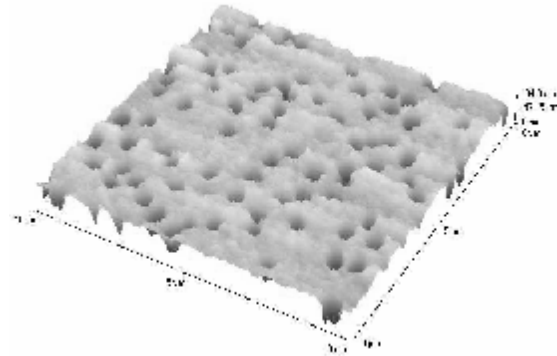


Рис. 9. AFM-изображение поверхности пластины кремния, облученной ионами аргона ($E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$)

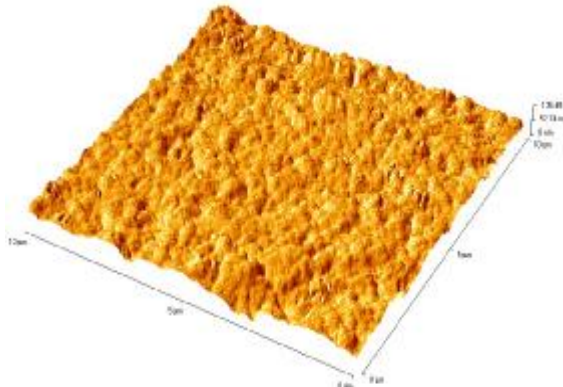


Рис. 8. AFM-изображение поверхности пластины кремния, облученной ионами аргона ($E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{Ar} = 100^\circ\text{C}$)

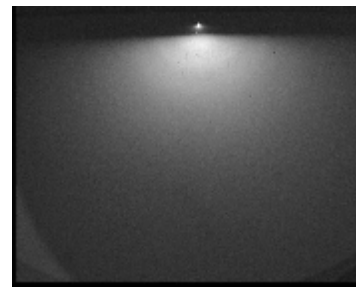


Рис. 10. Электронограмма поверхности образца, облученного ионами аргона с $E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{Ar} = 20^\circ\text{C}$, снятые на отражение при ускоряющем напряжении 50 кВ

наблюдалась при более низких температурах имплантации?

Для ответов было необходимо:

- изучить изменения морфологии и состояния поверхности кремния при различных дозах и температурах облучения Ar^+ ;
- облучить Ne^+ и Si^+ вместо Ar^+ . В случае облучения Ne^+ блистеры образуются в глубине и не взрываются, при имплантации Si^+ блистеров нет. В обоих случаях имеет место дислокационная сетка;
- проверить наличие латерального эффекта.

2. Анализ изменения поверхности в зависимости от температуры и дозы облучения ионами аргона

Установлено, что по мере увеличения дозы облучения аргоном до $\Phi_{\text{Ar}} < 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$, $E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$ на поверхности кремния образуются и растут блистеры. Образование кратеров, свидетельствующих о взрыве блистеров, наблюдалось только при $\Phi_{\text{Ar}} > 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$. Изучение состояния поверхности кремния с малым шагом по дозе и температуре позволяет утверждать, что взрыв блистеров происходит одновременно.

На электронограммах не облученных образцов наблюдались линии Кикучи, т.е. поверхность была монокристаллической. Из анализа электронограмм поверхности кремниевых образцов после облучения ионами аргона при температурах 20°C и 500°C , снятых на отражение при ускоряющем напряжении 50 кВ, следует, что поверхность после облучения ионами аргона при 20°C является аморфной (рис. 10), а при 500°C представляет смесь аморфной и кристаллической фаз. Кристаллическая фаза в анализируемом слое представляет собой систему блоков (рис. 11). Вероятно, аморфное состояние кремния в наших образцах возникает из-за больших механических напряжений на границе облученный слой – кристалл [9].

Блистеры образуются на глубине ($R_p + \Delta R_p$) на месте вакансионных комплексов [10]. Между блистерами и поверхностью кремний остается кристаллическим, но большие механические напряжения в облучаемом слое вынуждают разделяться на блоки. Стенки самого блистера, видимо, аморфны, и потому могут сравнительно легко деформироваться и растягиваться. Чем выше температура, тем тоньше должна быть аморфная оболочка. Из-за

эффекта распыления кристаллическая «корка» на поверхности становится тоньше (при $\Phi = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ распыляется слой, равный по толщине проецированному пробегу). Она уже не в состоянии удерживать давления со стороны блистеров в единицы ГПа [6] и ломается, а блистер взрывается (рис. 12).

При меньших температурах толщина аморфных стенок остается достаточно большой,

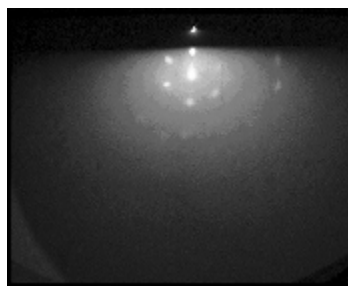


Рис. 11. Электронограмма поверхности образца, облученного ионами аргона с $E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$, снятые на отражение при ускоряющем напряжении 50 кВ



Рис. 12. Пояснение к тексту

чтобы удержать аргон. Взрыву блистеров способствует также и рост давления с увеличением температуры.

3. Сопоставление свойств ионно-синтезированной гетеросистемы $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-Si}$ после облучения противоположной стороны пластины кремния ионами Ne^+ , Si^+ и Ar^+

Было проведено сравнительное исследование воздействия дополнительного облучения Ne^+ , Si^+ и Ar^+ тыльной стороны пластины кремния, ранее облученной с «рабочей» стороны ионами азота.

Подробно результаты этой серии экспериментов приведены в работе [9]. Показано, что изменение свойств ионно-синтезированного слоя происходит не по причине изменения дислокационной системы кристалла из-за роста блистеров, а вследствие взрыва блистеров.

4. Селективное облучение ионами аргона пластины кремния, облученной с обратной стороны ионами азота

В пластину кремния, содержащую ионно-синтезированный слой Si_xN_y на

противоположной стороне, производилась имплантация ионов аргона с параметрами, достаточными для изменения изолирующих и структурных свойств ($E_{Ar} = 50$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 10^{17}$ см⁻², $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$). При этом половина образца с азотированным слоем закрывалась другой кремниевой пластиной для частичной экранировки пучка ионов аргона (рис. 13). Между экраном и образцом с азотированным слоем был зазор для предотвращения передачи акустических импульсов из экранирующей пластины кремния. Изучались электрические характеристики диодных структур металл (Al)–азотированный слой–кремний. Металлические

не отражает акустические импульсы, является эффективным поглотителем гиперзвука.

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. При последовательном облучении кремниевой пластины встречными пучками ионов азота и аргона, когда внедрение аргона происходит с $E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} \geq 10^{17}$ см⁻², $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$, облучение аргоном стимулирует реакцию взаимодействия кремния с азотом, разрушаются центры кристаллизации сформированного нитрида кремния. В результате ионно-синтезированные слои Si_3N_4 сохраняются в аморфном состоянии, не происходит связанное с кристаллизацией растрескивание слоёв и ухудшение их изолирующих свойств, по крайней мере при отжиге до температуры 1100°C .

2. Последовательное облучение встречными по отношению к пучку ионов азота ионами неона или кремния, в отличие от ионов аргона, не приводит к заметным изменениям свойств азотированного слоя кремния. Это означает, что предполагавшийся ранее вклад в эффект дальнего действия скачкообразной эволюции сетки дислокаций, формирующейся в области торможения ионов аргона, не является существенным.

3. Изменение свойств азотированного слоя кремния происходит в результате последующего, встречного по отношению к имплантации азота, облучения ионами аргона в узком интервале доз $(8-10) \cdot 10^{16}$ см⁻² ($E_{Ar} = 40$ кэВ, $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$). Главной причиной дальнего действующего влияния облучения Ar^+ являются акустические импульсы, возникающие в результате взрыва блистеров аргона, к чему поверхности пластины способствует аморфное состояние подвергнутой указанной обработкой аргоном поверхности кремния. Этот механизм является дополнительным к ранее предложенному П.В. Павловым и Д.И. Тетельбаумом механизму усиления акустических волн через дефектную систему кристалла.

Авторы выражают благодарность Д.О. Филатову, В.К. Васильеву и В.Л. Шаргелю за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

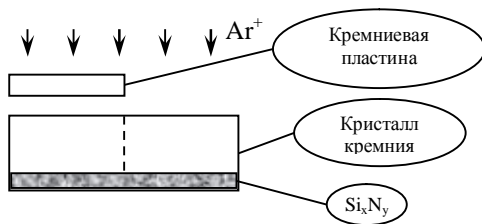


Рис. 13. Схема эксперимента

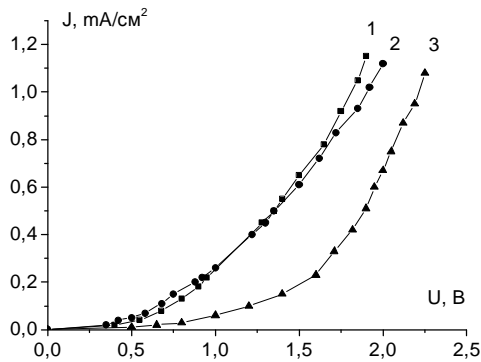


Рис. 14. Вольт-амперные характеристики образцов кремния, облученных азотом ($E_N = 50$ кэВ, $\Phi_N = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻², $T_N = 400^\circ\text{C}$): 1 – только отжиг при $T_{отж} = 500^\circ\text{C}$; 2 – закрытая от ионов аргона часть пластины; 3 – облученная аргоном часть пластины ($E_{Ar} = 40$ кэВ, $\Phi_{Ar} = 10^{17}$ см⁻², $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$)

контакты наносились напротив облученной и необлученной аргоном сторон образца. Контакты находились на расстоянии 2,5 мм от этой границы. Вольт-амперные характеристики представлены на рис. 14.

Из данных рис. 14 следует, что латерального эффекта на расстоянии более 2,5 мм от границы раздела нет. Распространение воздействующих на азотированный слой волн давления вследствие взрыва блистеров аргона происходит не по поверхности, а сквозь объём пластины кремния. Причем азотированный слой

1. Павлов, П.В. // *Высокочистые вещества* / П.В. Павлов, К.А. Марков, В.В. Карзанов, Е.С. Демидов. – 1995. – Вып. 2. – С. 56.
2. Карзанов В.В. // *Неорганические материалы* / В.В. Карзанов, К.А. Марков, Д.В. Мастеров. – 1998. – Т. 34, № 9. – С. 1138.
3. Демидов, Е.С. // *Вестник ННГУ. Серия Физика твердого тела* / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Д.И. Курицын, К.А. Марков, Д.А. Лобанов, В.В. Сдобняков. – 2000. – Вып. 1(3). – С. 271.
4. Демидов, Е.С. // *ФТП* / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Д.А. Лобанов, К.А. Марков, В.В. Сдобняков. – 2001. – Т. 35. – Вып. 1. – С. 21.
5. Демидов, Е.С. // *Вестник ННГУ. Серия Физика твердого тела* / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, К.А. Марков, Е.А. Питиримова, В.В. Сдобняков. – 2001. – Вып. 2(5). – С. 48.
6. Демидов, Е.С. // *ЖЭТФ* / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, К.А. Марков, В.В. Сдобняков. – 2001. – Т. 120. – В. 3(9). – С. 637.
7. Sdobnyakov, V.V. // *IEEE Microwave Magazin* / V.V. Sdobnyakov. – 2001. June. – Vol. 2, № 2. – P. 94.
8. Демидов, Е.С. // *ФТП* / Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, К.А. Марков, В.В. Сдобняков. – 2002. – Т. 36. – В. 9. – С. 1060.

9. Тетельбаум, Д.И. // ФТТ / Д.И. Тетельбаум, Ю.А. Менделеева. – 2004. – 46. – Вып.11. – С. 1960.
10. Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983.

**RADIATION-INDUCED FORMATION OF SILICON NITRIDE IN SILICON
BY CONSECUTIVE IRRADIATION WITH COLLIDING NITROGEN AND ARGON ION BEAMS**

E.S. Demidov, V.V. Karzanov, K.A. Markov, V.V. Sdobnyakov

By using the methods of transmission electron microscopy, IR-spectroscopy, and current–voltage characteristic, we search for ways to increase the temperature interval of stability of the ion-synthesized silicon nitride. In addition, we perform a number of experiments to elucidate the nature of the effect of long-range action at consecutive irradiation of silicon by colliding nitrogen and argon ion beams.