

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Оджаев В.Б.¹, Панфиленко А.К.², Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.¹, Ковальчук Н.С.², Соловьев Я.А.², Филипеня В.А.², Челядинский А.Р.¹, Черный В.В.³, Шестовский Д.В.², Шпаковский С.В.²

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Электрофизические характеристики МОП транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика [1]. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела SiO₂-Si может привести как к увеличению порогового напряжения, так и к снижению тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и в области насыщения, проводимости структуры в линейной области. Возрастают также токи утечки затвора.

В работе исследовалась возможность применения азотирования подзатворного окисла методом ИИ с целью определения оптимальных режимов ИИ азота, окисления и отжига для получения силовых МОП-транзисторов с улучшенными характеристиками.

Исследовались силовые МОП-транзисторы с вертикальной структурой, полученные на основе метода двойной диффузии (DMOSFET). Приборы формировались на кремниевой пластине р-типа проводимости с $\rho=5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см ориентацией (100) с эпитаксиальным слоем р-типа ($\rho=2$ Ом·см). Области базы транзистора формировались ИИ фосфора дозой $5 \cdot 10^{14}$ см⁻². Азот имплантировался в активную область структуры прибора через защитный окисел толщиной 20 нм энергиями 20 кэВ и 40 кэВ в диапазоне доз $1 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{14}$ см⁻². Пластины подвергались быстрому термическому отжигу (БТО) при температурах 900 °С или 1000 °С длительностью 15 с и травлению защитного окисла. Для одной группы пластин проводилось сначала БТО, затем снятие окисла (прямой порядок), а для другой группы – сначала снятие окисла, а затем пластины подвергались БТО (обратный порядок). Затем проводилось выращивание оксида затвора толщиной 42 нм и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы формирования прибора без ИИ азота.

Измерения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик проводились на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A с зондовой станцией Cascade

Summit 11000B-AP. ВАХ измерялись в режиме ограничения тока $I_{\max}=1$ А. Вольт-фарадные характеристики измерялись в диапазоне напряжений от -10 В до 10 В на частоте 1 МГц. Контроль параметров времязависимого пробоя диэлектрических слоёв проводился автоматизированным измерительным комплексом HP4061 А.

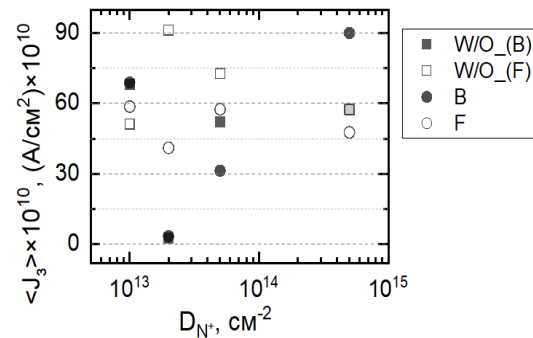


Рисунок 1 – Зависимость средней величины плотности тока утечки затвора транзистора ($\langle J_3 \rangle$) от дозы ионно-имплантированного азота (D_{N^+}) при обратном (B) и прямом (F) порядке термообработки для образцов, имплантированных N⁺, и контрольных образцов (W/O)

Установлено, что ток утечки затвора в интервале напряжений на затворе существенно меньше для образцов, имплантированных ионами азота (рис. 1). Данный эффект имеет место как для прямого процесса, так и для обратного процесса и наиболее выражен для энергии ионов азота 40 кэВ при дозе $2 \cdot 10^{13}$ см⁻². Это свидетельствует о том, что электрическое сопротивление пленок подзатворного диэлектрика у приборов, созданных с дополнительной операцией ИИ азота выше, чем у аналогичных контрольных структур. Следует отметить, что напряжение пробоя для всех исследованных транзисторов практически не зависело от технологии изготовления приборов. Однако величина заряда пробоя у приборов с дополнительной операцией ионного легирования ионами азота существенно отличается от аналогичного значения для контрольных образцов. Так, например, для дозы имплантации ионов азота $1 \cdot 10^{13}$ см⁻² для прямого порядка БТО при 900 °С, 15 с удельный заряд пробоя $0,853$ Кл/см² выдерживало около

60% приборов, для контрольных образцов данный заряд пробоя выдерживало не более 20% приборов. При удельном заряде пробоя не более 0,3 мкКл/см² для контрольных образцов пробивалось около 10% приборов, в то время как для приборов, созданных с дополнительной операцией ионного легирования азотом ни один прибор не был пробит. Емкость окисла подзатворного диэлектрика в случае имплантации ионов азота как для энергий ионов 20 кэВ, так и 40 кэВ при прямом порядке отжига меньше, чем для контрольных образцов. С увеличением дозы имплантации данные различия уменьшаются (рис. 2).

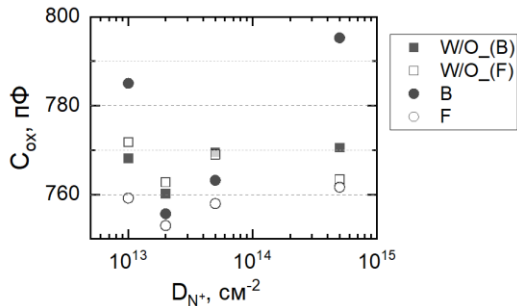


Рисунок 2 – Зависимость величины емкости подзатворного окисла транзистора (C_{ox}) от дозы имплантированного азота (D_{N^+} , см⁻²) при прямом (F) и обратном (B) порядке термообработки для образцов, имплантированных N⁺, и контрольных образцов (W/O)

При обратном порядке отжига схожие различия величин ёмкости наблюдаются для режима с энергией ионов азота 40 кэВ и дозой $2 \cdot 10^{13}$ см⁻². Сравнение отношения удельных емкостей подзатворного диэлектрика, определенных из данных по проводимости в области насыщения ($C_{i^{лин}}/C_{iN^+^{лин}}$) и величине тока насыщения ($C_{i^{In}}/C_{iN^+^{In}}$) показало, что наибольшие различия наблюдаются при прямом порядке обработки (табл. 1).

Таблица 1 – Отношение величин удельных емкостей подзатворного диэлектрика, полученных из данных по крутизне ВАХ в линейной области $C_{i^{лин}}/C_{iN^+^{лин}}$ и по величине тока насыщения $C_{i^{In}}/C_{iN^+^{In}}$

D_{N^+} , см ⁻²		1·10 ¹³	2·10 ¹³	5·10 ¹³	5·10 ¹⁴
$C_{i^{лин}}/C_{iN^+^{лин}}$	B	1,01	1,73	1,21	1,39
	F	2,02	1,83	2,32	2,12
$C_{i^{In}}/C_{iN^+^{In}}$	B	0,99	1,11	1,21	1,03
	F	1,04	1,14	0,97	0,93

В этом случае величина удельной емкости для приборов, созданных с применением операции дополнительной ИИ азота практически везде меньше аналогичной величины для контрольных образцов (C_i). Это может быть обусловлено присутствием в слое окисла и на границе раздела Si-SiO₂ контрольных образцов четырех различных по своей природе источников заряда: заряд быстрых поверхностных состояний в полупроводнике,

постоянный заряд в окисле, заряд на ловушках в слое окисла и заряд подвижных ионов [2,3].

Величина постоянного заряда в окисле зависит от режима окисления, вида предокислительных обработок кремниевых пластин и загрязнения системы Si-SiO₂ ионными примесями. Заряд на ловушках в стехиометрическом участке слоя окисла представляет собой объемный заряд, захваченный на энергетические уровни дефектов в SiO₂. Этот тип заряда ассоциируется с медленными состояниями. Заряд подвижных ионов связан с присутствием в окисле ионов щелочных (Na⁺, K⁺, Li⁺) и тяжелых металлов, попадающих в окисел из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе. Влияние азотирования обычно связывают с процессами накопления азота вблизи границ раздела Si-SiO₂ и включением атомов азота в структуру этих границ [4,5]. Связи Si-N заменяют напряженные или нескомпенсированные связи в нестехиометрическом слое Si_xO_y, уменьшая энергию деформации границы раздела SiO₂. В результате в процессе термических обработок уменьшается вероятность адсорбирования на оборванных связях границ раздела ионных примесей атомов металлов. Меньшее влияние ИИ азота на параметры силовых МОП транзисторов при обратном порядке обработки, вероятно, обусловлено тем, что после снятия окисла при проведении БТО значительная часть внедренных ионов азота испаряется в реактор из приповерхностной области пластин и не участвует в формировании связей Si-N.

Таким образом, установлено, что проведение азотирования методом ионной имплантации при изготовлении силовых МОП транзисторов позволяет уменьшить токи утечки затвора, увеличить величину заряда пробоя подзатворного диэлектрика. Показано, что для обеспечения положительного эффекта с целью предотвращения испарения азота из приповерхностной области пластин следует проводить прямой порядок обработки (сначала БТО, а затем снятие окисла).

Литература

- Оджаев, В.Б. Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора / В.Б. Оджаев [и др.] // Весці НАНБ, Сер. фіз.-тэх. навук. – 2014. – № 4. – С. 14–17.
- Денисенко, В. В. Новые физические эффекты в нанометровых МОП-транзисторах / В. В. Денисенко // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 157–162.
- Sze, S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, M.K. Lee – 3rd ed. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582 p.
- Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов / Г.Я. Красников. – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2011. – 800 с.
- Adam, L.S. On implant-based multiple gate oxide schemes for system-on-chip integration / L.S. Adam, C. Bowen, M.E. Law // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50, № 3. – P. 589–600.