

06

ТРАНСПОРТ ЗАРЯДА И ПРОБОЙ МНОП СТРУКТУР С НИТРИДОМ КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫМ ПРИ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© Н.Ю.Ершова, О.Н.Ивашенков, А.Е.Ильин

Петрозаводский государственный университет,
185640 Петрозаводск, Россия
(Поступило в Редакцию 27 декабря 1994 г.
В окончательной редакции 13 июня 1995 г.)

Исследованы электропроводность, захват и электрический пробой структур металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) с нитридом кремния, синтезированным при разных температурах с модифицированным подслоем SiO_xN_y . Показано, что в пленках Si_3N_4 , полученных при пониженной температуре синтеза $T_{\text{синт}}$, наблюдается уменьшение глубины залегания кулоновских центров и уменьшение предэкспоненциального множителя в уравнении Пула-Френкеля, а также появление на вольт-амперной характеристике (ВАХ) участка типа $I \sim U^2$. По кинетике накопления заряда определено значение характеристического поля в уравнении Фаулера-Нордгейма $E_0 = 1.4 \cdot 10^8 \text{ В/см}$ для барьера Si-модифицированный подслоя. Установлено, что при пробое МНОП структур в динамическом режиме испытаний с увеличением $T_{\text{синт}}$ с 660 до 870°С напряженность электрического поля пробоя $E_{\text{бр}}$ возрастает с $7.0 \cdot 10^6$ до $1.1 \cdot 10^7 \text{ В/см}$. Показано, что можно выделить два участка как на зависимости времени запаздывания пробоя от поля $\tau_{\text{бр}}(E)$, так и на зависимости $E_{\text{бр}}$ от скорости роста напряжения. Для интерпретации результатов предложена модель, учитывающая роль объемных зарядов в развитии процесса пробоя.

Введение

Нитрид кремния Si_3N_4 является одним из основных материалов микроэлектроники, который может выступать как защитный слой и как активная среда для хранения информации в МНОП репрограммируемых запоминающих устройствах [1,2]. Тонкие пленки нитрида кремния обычно получают аммонолизом моносилана при температуре 800–900°С. Вариация температуры синтеза нитрида кремния и других параметров технологического процесса приводит к изменению состава, структуры и, как следствие, электрофизических параметров диэлектрических слоев: электропроводности, зарядовой стабильности, электрической прочности. МНОП структуры с Si_3N_4 , полученным при

пониженной температуре, могут проявиться более высокую радиационно-индуцированную стабильность при малых мощностях поглощенной дозы вследствие стекания радиационно-индуцированного заряда в процессе облучения. С другой стороны, изменение электропроводности нитрида кремния при вариации температуры синтеза позволяет проанализировать соотношение тока через контакт Si-диэлектрик и тока через объем диэлектрика и соотношение захвата и выброса заряда на ловушки. Моделирование поведения МНОП структуры в высоких электрических полях поможет лучше понять процессы развития пробоя в этих системах.

В данной работе были исследованы электропроводность, накопление заряда и пробой МНОП структур с нитридом кремния, полученным при пониженных температурах.

Методика эксперимента

Исследованные образцы были сформированы на кремнии марки КЭФ-0.1, КЭФ-15 и КДБ-1 путем нитрирования поверхности полупроводника а) с естественным окислом (нитрооксид NO) и б) с термически выращенным в стандартных условиях SiO₂ толщиной 7 нм (оксинитрид ON) при температуре 1015°C. Данная процедура обеспечивала устойчивую к внешним воздействиям (электрические поля и радиация) границу раздела [3]. Синтез нитрида кремния осуществлялся аммонолизом моносилана при температурах 660, 760, 870°C. Для обеспечения хорошего контакта с подложкой и поликремниевым затвором напылялся слой алюминия. Площади затворов равнялись $5 \cdot 10^{-3}$ и $7.8 \cdot 10^{-3}$ см². Толщины пленок Si₃N₄ лежали в диапазоне 55–135 нм.

Изучение зарядового состояния МНОП структур осуществлялось методом высокочастотных вольтфарадных характеристик (ВВФХ). Вольт-амперные характеристики измерялись в диапазоне температур 300–600°C. Экспериментальная установка позволяла проводить изотермическую деполяризацию (ИТД) предварительно заряженных образцов.

Электрическая прочность образцов Si₃N₄ исследовалась на полностью автоматизированной установке в динамическом и статическом режимах испытаний методом "первых" пробоев с прижимным золотым электродом. В динамическом режиме определялась напряженность электрического поля пробоя E_{br} в диапазоне скоростей линейно растущего напряжения $dV/dt = 10-10^6$ В/с. При статических испытаниях фиксировалось время запаздывания пробоя τ_{br} — интервал времени от начала приложения к образцу прямоугольного импульса напряжения до момента резкого уменьшения напряжения при пробое. Времена измерялись в интервале $10^{-6}-10^3$ с. Экспериментальные данные обрабатывались по статистике Вейбулла. Объем выборки составлял 50–100 значений. Подробно методика эксперимента и статистической обработки результатов изложена в работе [4].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Известно, что электропроводность пленок нитрида кремния обусловлена эмиссией носителей заряда с кулоновских центров в сильном электрическом поле, т. е. эффектом Пула-Френкеля. Измерения ВАХ при разных температурах образцов МНОП структур с пленками Si₃N₄,

синтезированными при стандартной температуре ($T = 870^\circ\text{C}$), показали, что электропроводность удовлетворительно описывается уравнением Пула-Френкеля, при этом глубина залегания донорных ловушек $\Phi = 1.4 \text{ эВ}$, что соответствует данным, полученным другими авторами [5]. Постоянная Пула-Френкеля β совпадала с расчетным значением $3.7 \text{ эВ} \cdot \text{см}^{1/2} \cdot \text{В}^{-1/2}$.

Изменение температуры синтеза приводит к уменьшению глубины залегания Φ и увеличению константы σ_0 , т.е. к увеличению сквозных токов. Значения постоянных Φ и σ_0 приведены в табл. 1

Таблица 1.

$T_{\text{синт}}, ^\circ\text{C}$	$\Phi, \text{эВ}$	$\sigma_0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
660	1.1	$3 \cdot 10^{-3}$
760	1.3	$3 \cdot 10^{-5}$
870	1.4	$2 \cdot 10^{-6}$

Кроме того, при понижении $T_{\text{синт}}$ изменяется форма ВАХ — при величине внешнего поля $E > 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ появляется участок с более слабой полевой зависимостью типа $I \sim U^2$, что можно связать с протеканием токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). Постоянная Пула-Френкеля β , полученная при спрямлении ВАХ МНОП структур ($T_{\text{синт}} = 660^\circ\text{C}$) в координатах $\ln(I) = f(E^{1/2})$, была вдвое меньше, чем расчетное значение. Это может быть объяснено наличием мелких нейтральных ловушек [6]. Эксперименты по ИТД показали, что в данных пленках нитрида кремния глубина залегания таких ловушек $W = 0.35 \text{ эВ}$.

Измерение ВФХ после воздействия электрического поля позволяет анализировать зарядовое состояние диэлектрика МНОП структуры (с точностью до центроида заряда). На рис. 1 показана кинетика накопления заряда при приложении импульсов напряжения различной длительности для структур со стандартным и низкотемпературным нитридом кремния. Кривая 1 зависимости $V_{FB}(t)$ носит квазило-

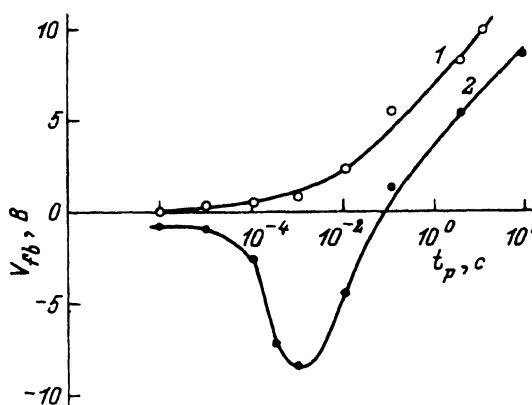


Рис. 1. Зависимость напряжения плоских зон V_{FB} от длительности импульсов напряжения t_p для МНОП структур, полученных при разных температурах синтеза $T_{\text{синт}}$.

$V_G = 40 \text{ В}$, $n\text{-Si}$; $T_{\text{синт}}, ^\circ\text{C}$: 1 — 870, 2 — 660°.

графический характер, который связан с уменьшением инжекционного туннельного тока по мере накопления заряда и уменьшения поля на контакте полупроводник-диэлектрик. Анализ зависимости $V_{FB}(t)$ при некоторых упрощениях (как, например, в работах [7-9]) дает возможность оценить характеристическое поле E_0 , фигурирующее в уравнении Фаулера-Нордгейма для туннельного тока через треугольный барьер,

$$E_0 = -\frac{4(2m^*)^{1/2}}{3h} \Phi^{3/2}, \quad (1)$$

где Φ — высота барьера, m^* — эффективная масса электрона при туннелировании, h — постоянная Планка.

Величина E_0 , определяющая инжектирующую способность границы Si-нитрооксид, равнялась $E_0 = 1.4 \cdot 10^2$ В/см и близка к значению $E_0 = 1.2 \cdot 10^2$ В/см для МНОП структур с тонким ($d_{\text{ox}} = 1.8$ нм) подслоем SiO₂.

Сравнивая значения инжекционного тока из Si в диэлектрик j_C и сквозного тока через объем Si₃N₄ j_N , легко видеть, что при малых длительностях действия напряжения на затворе V_G $j_C \gg j_N$. Однако по мере накопления захваченного заряда ток через контакт падает и в некоторый момент времени сравнивается с током через объем нитрида кремния. При этом, когда $j_C = j_N$, кинетика $V_{FB}(t)$ существенно отклоняется от расчетной, не учитывающей сквозной ток j_N . Несмотря на то что при малых длительностях действия электрического поля ток в МНОП структуре имеет туннельный характер, измерения квазистатической ВАХ показывают, что протекают токи Пола-Френкеля, так как в квазистационарном случае $j_C = j_N$.

Уменьшение $T_{\text{сint}}$ приводит к росту сквозных токов через Si₃N₄, когда $j_N > j_C$ при малых напряжениях V_G . Это проявляется в появлении участка на зависимостях $V_{FB}(V_G)$ и $V_{FB}(t)$, соответствующего накоплению положительного заряда при одноименном потенциале затвора $V_G > 0$. Такое поведение МНОП структуры с низкотемпературным Si₃N₄ связано с уходом электронов, эмиттированных с доноров, в сторону затвора, т. е. этот положительный заряд есть заряд ионизованных доноров. При увеличении электрического поля ток через контакт j_C возрастает быстрее, чем сквозной ток j_N , поэтому на кривой 2 (рис. 1) наблюдается появление и рост отрицательного заряда.

Наряду с изучением процессов электропроводности и накопления объемного заряда проведено исследование электрического пробоя нитрида кремния.

МНОП структуры (золотой прижимной электрод-нитрид кремния-двуокись кремний-кремний) с пленками n -Si₃N₄, полученными при разных температурах синтеза, изучались в динамическом режиме испытаний ($dV/dt = 100$ В/с) при обеих полярностях затвора. Средние значения напряженности электрического поля пробоя представлены в табл. 2. Видно, что для $V_G > 0$ с увеличением $T_{\text{сint}}$ с 660 до 870°C напряженность электрического поля пробоя возрастает, а при $V_G < 0$ E_{br} изменяется незначительно.

Наблюдается зависимость пробивного поля от полярности затвора: E_{br} при $V_G < 0$ больше, чем E_{br} при положительной полярности затвора. Обычно этот экспериментальный факт связывают с разной высотой потенциальных барьеров на межфазных границах (МФГ) Au-Si₃N₄

Таблица 2.

Образец Si_3N_4	$E_{br}, \text{В/см}$	
	$V_G > 0$	$V_G < 0$
$T_{\text{синт}} = 660^\circ\text{C}$ $d_N = 65 \text{ нм}$	$(7.00 \pm 0.09) \cdot 10^6$	$(12.70 \pm 0.01) \cdot 10^6$
$T_{\text{синт}} = 720^\circ\text{C}$ $d_N = 110 \text{ нм}$	$(9.30 \pm 0.08) \cdot 10^6$	$(12.40 \pm 0.01) \cdot 10^6$
$T_{\text{синт}} = 870^\circ\text{C}$ $d_N = 100 \text{ нм}$	$(11.00 \pm 0.04) \cdot 10^6$	$(12.00 \pm 0.01) \cdot 10^6$

и $\text{SiO}_x\text{N}_y\text{-Si}$ для носителей заряда [10], при этом чем меньше $T_{\text{синт}}$ нитрида кремния, тем больше разность значений напряженности электрического поля пробоя.

Зависимость среднего времени запаздывания пробоя от поля $\tau_{br}(E)$ для образцов с разными температурами синтеза Si_3N_4 показана на рис. 2. Эксперименты проводились при приложении поля, полярность которого соответствовала инжекции основных носителей из кремниевой подложки в нитрид кремния. Сравнивая МНОП структуры с *n*- и *p*-Si, заметим, что знак носителей заряда, инжектируемых из кремния, практически не влияет на характер зависимости $\tau_{br}(E)$. В том и другом случае можно выделить два участка на зависимости $\tau_{br}(E)$: первый участок в диапазоне времен $\tau_{br} = 10^{-2} - 10^3$ с и второй — $10^{-2} - 10^{-6}$ с, который характеризуются более сильной полевой зависимостью τ_{br} . С уменьшением $T_{\text{синт}}$ графики зависимости $\tau_{br}(E)$ параллельно сдвигаются в область меньших полей.

На рис. 3 представлена зависимость напряженности электрического поля пробоя от скорости роста напряжения в диапазоне $dV/dt = 10 - 10^6$ В/с. Для положительной полярности затвора можно выделить два участка: 1) рост E_{br} с увеличением dV/dt в диапазоне $10 - 10^3$ В/с и 2) независимость напряженности поля пробоя от dV/dt в интервале $10^3 - 10^6$ В/с. Отметим, что два участка зависимости $E_{br}(dV/dt)$ соответствуют двум участкам полевой зависимости $\tau_{br}(E)$: участок роста напряжения пробоя с увеличением скорости роста напряжения аналогичен первому участку зависимости $\tau_{br}(E)$, где $\tau_{br} > 10^{-2}$ с, а участок, где E_{br} не зависит от dV/dt , идентичен участку полевой зависимости, на котором при изменении τ_{br} на несколько порядков величины напряжение почти не меняется. Для отрицательной полярности напряжения на затворе наблюдается слабое увеличение E_{br} с ростом скорости подъема напряжения. Этого следовало ожидать, так как при $V_G < 0$ весь исследуемый диапазон dV/dt соответствует первому участку полевой зависимости времени запаздывания пробоя ($\tau_{br} > 10^{-2}$ с).

В работе [11] предложена модель пробоя, учитывающая перераспределение полей в структуре при накоплении объемного заряда. Возможно, что в области более сильных полей (при $\tau_{br} < 10^{-2}$ с) именно накопление объемного заряда играет основную роль в развитии про-

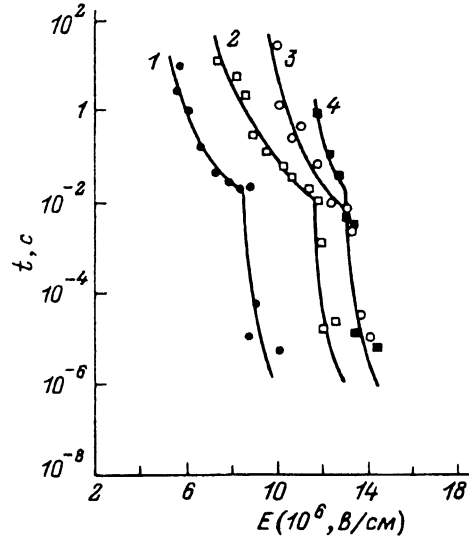


Рис. 2. Зависимость времени запаздывания пробоя τ_{br} от поля E в полулогарифмических координатах для МНОП структур, полученных при разных температурах синтеза T_{sint} , n -Si (4 — p -Si).

1-3 — $V_G > 0$, 4 — $V_G < 0$; d_N , нм: 1 — 55; 2 — 110; 3, 4 — 100; T_{sint} , °C: 1 — 660; 2 — 720; 3, 4 — 870.

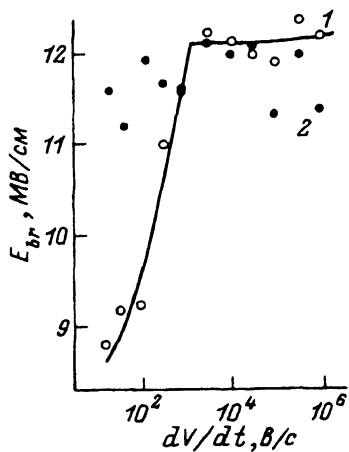


Рис. 3. Зависимость напряженности поля пробоя E_{br} от скорости роста линейнорастающего напряжения dV/dt .

Si_3N_4 , $d_N = 100$ нм; 1 — $V_G > 0$, 2 — $V_G < 0$.

боя, когда в результате перераспределения полей в некоторой точке диэлектрика достигается значение напряженности электрического поля, равное пробивному. В этом случае время запаздывания пробоя τ_{br} определяется временем накопления объемного заряда.

Однако существует некоторое значение напряженности электрического поля E_{min} , когда даже при максимально возможном накопленном объемном заряде в диэлектрике поле вблизи затвора не достигает своего критического значения. Но и в этом случае пробой также происходит.

При $E < E_{min}$ наблюдается резкий излом полевой зависимости времени запаздывания пробоя. Очевидно, в этой области преобладает другой механизм пробоя, который, возможно, обусловлен деградиционными процессами, вызывающими изменение спектра ловушечных состояний в запрещенной зоне диэлектрика. Уменьшение напряженности пробивного поля Si_3N_4 , полученного при низких температурах синтеза, можно объяснить отмеченным выше изменением спектра ловушек, т. е. диэлектрик уже до приложения напряжения “частично деградировал” по отношению к стандартному Si_3N_4 .

Выводы

1. Пленки Si_3N_4 , полученные при пониженной температуре синтеза, обладают повышенной проводимостью и имеют меньшую глубину залегания кулоновских центров захвата. ВАХ таких диэлектрических слоев имеет участок типа ТОПЗ.

2. Накопление положительного заряда при небольших положительных напряжениях на затворе $V_G > 0$ связано с ионизацией кулоновских ловушек, а в больших электрических полях наблюдается инжекция и захват электронов, как и в МНОП структурах, синтезированных при стандартных температурах ($T_{\text{сint}} = 870^\circ\text{C}$).

3. Как на зависимости времени запаздывания пробоя от поля, так и на зависимости напряженности электрического поля пробоя от скорости роста напряжения наблюдаются два участка, по-видимому, связанные с двумя механизмами пробоя.

Список литературы

- [1] Чжан Т. // ТИИЭР. 1976. Т. 64. С. 20.
- [2] Нитрид кремния в электронике / Под ред. А.В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.
- [3] Ивашенков О.Н., Листопадов А.М., Патракеев С.П., Суриков И.Н. // Микроэлектроника. 1993. Т. 22. № 2. С. 43–49.
- [4] Ершова Н.Ю., Драган И.И., Шавкера В.Л. // Заводская лаб. 1994. № 1. С. 19–20.
- [5] Gurtov V.A., Nazarov A.I. // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. Vol. 93. N 1. P. 347–351.
- [6] Райкерус П.А., Лалэко В.А. Физические основы пленочной электроники. Петрозаводск, 1987. 84 с.
- [7] Гуртов В.А., Ивашенков О.Н., Райкерус П.А. // РиЭ. 1987. Т. 32. № 8. С. 1693–1698.
- [8] Гуртов В.А., Ивашенков О.Н., Погуляев В.В. // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. № 5. С. 470–472.
- [9] Ивашенков О.Н., Листопадов А.М., Патракеев С.П., Сергеев М.С. // Тез. докл. 3 Всесоюз. конф. "Физика окисных пленок". Петрозаводск, 1991. С. 102.
- [10] Шмидт Т.В., Гуртов В.А., Лалэко В.А. // Микроэлектроника. 1988. Т. 17. № 3. С. 244–248.
- [11] Петров А.И., Рожков В.А. // РиЭ. 1993. Т. 38. № 2. С. 296–301.