

ОБ АНОМАЛЬНОЙ ДОЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ VV-ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА

Добанова Н. Е., Карзанов В. В., Тетельбаум Д. И.

В последнее время повысился интерес к изучению свойств азотированного ионной имплантацией кремния в связи с наметившейся возможностью создания изолирующих слоев в структурах типа КНИ при относительно малых дозах [1]. Ранее было показано, что поверхностные слои $\alpha\text{-Si:N}$, полученные при дозах $\Phi = (1 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17}) \text{ см}^{-2}$, обладают достаточно высоким удельным сопротивлением и сохраняют аморфность вплоть до температур отжига $850 \div 950^\circ\text{C}$. Вместе с тем выявилось anomальное (немонотонное) изменение свойств таких слоев по мере роста дозы — существование некоторой оптимальной дозы ($5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), при которой температура кристаллизации принимает максимальное значение, а тангенс угла диэлектрических потерь и плотность поверхностных состояний минимальны [2]. Естественно предположить, что такое поведение коррелирует с изменением электронных свойств слоев $\alpha\text{-Si:N}$, в частности, со степенью заполнения оборванных связей или так называемых VV-центров (спектр ЭПР с g -фактором 2.0055), характерных для аморфного кремния [3].

В настоящей работе исследовались монокристаллы кремния p -типа с $\rho = 2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Имплантацию ионов азота с $E = 40 \text{ кэВ}$ проводили в интервале доз $3 \cdot 10^{15} \div 4.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при плотности ионного тока не более 10 мкА/см^{-2} . Сигнал ЭПР регистрировался как с неотожженных образцов, так и отожженных в аргоне при 600 и 800°C в течение 1 ч (отжиг проводился последовательно на одних и тех же образцах).

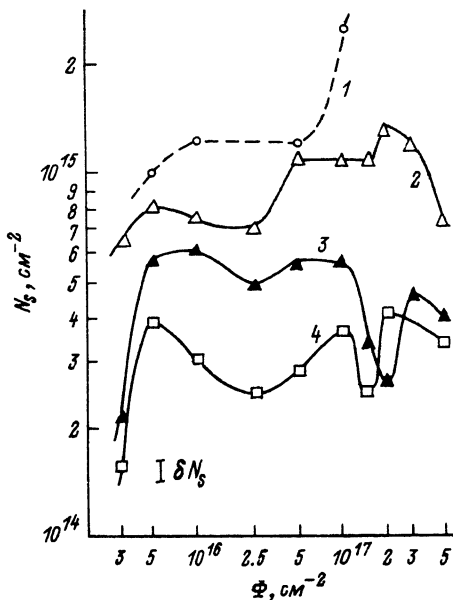
Для сравнения проводили имплантацию ионами инертного газа (Ne^+) при тех же значениях E и j .

Спектры поглощения ЭПР снимались на спектрометре трехсантиметрового диапазона при фиксированной температуре 80 К . Предельная чувствительность прибора при регистрации первой производной линии поглощения не хуже $5 \cdot 10^{11} \text{ спин/Гс}$ при постоянном времени магнитной развертки 3 мин.

При облучении кремния ионами Ne^+ поверхностная концентрация VV-центров N_s растет с увеличением дозы облучения (см. рисунок), выходя на насыщение при дозе аморфизации. Величина при насыщении составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (объемная концентрация $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), что совпадает с литературными данными [3]. При $\Phi > 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается вторичный резкий рост N_s . Этот рост подробно обсуждался в литературе [4] и связан, скорее всего, с образованием пор или пузырьков в облученном слое. Таким образом, полученная нами дозовая зависимость N_s для образцов, облученных Ne^+ , полностью согласуется с результатами известных работ [3, 4].

Показательно, что для N^+ в области субстехиометрических доз N_s существенно меньше, чем для Ne^+ . Так как объемная концентрация VV-центров в аморфизованном слое (в области насыщения) практически не зависит от массы ионов [3], а пробеги ионов и толщины аморфных слоев при равных энергиях для N^+ превышают соответствующие значения для Ne^+ , указанное обстоятельство свидетельствует о способности азота заполнять оборванные связи.

Зависимость N_s от Φ имеет anomальный характер — наблюдаются 2 экстремума: минимум при $\Phi = 2.5 \cdot 10^{16}$ и максимум при $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Наличие минимума объясняется изложенными ранее [2] представлениями о двух конкурирующих процессах: с ростом дозы до значений $2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ преобладает процесс образования Si—N-связей преимущественно по границам блоков аморфной фазы, что приводит к уменьшению N_s . После того как этот процесс заканчивается, начинает преобладать процесс образования включений Si_xN_y (в



Зависимость концентрации VV -центров N_s от дозы облучения Φ ионами Ne^+ (1) и N^+ (2—4).

2 — до отжига, 3 и 4 — отжиг в течение 1 ч в потоке аргона при 600 и 800 °C соответственно.

том числе Si_3N_4), что вызывает рост N_s за счет обрыва связей по границам включений из-за несоответствия «решеток» α -Si : N и Si_3N_4 и формирования вследствие этого дополнительных парамагнитных центров.

При дальнейшем росте Φ между процессами образования новых оборванных связей и их заполнением азотом устанавливается равновесие, и N_s выходит на второй уровень насыщения: $N_s = 1.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Далее, при $\Phi > 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ наблюдается второй участок резкого роста N_s . Причина его появления, по-видимому, та же, что и в случае облучения Ne^+ при $\Phi > 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (сдвиг по дозе связан с различием масс N^+ и Ne^+). Существенное отличие в случае имплантации N^+ заключается в том, что, во-первых, этот рост выражен гораздо слабее из-за указанной способности азота заполнять оборванные связи, во-вторых, при $\Phi > 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ он сменяется резким падением N_s . Снижение N_s обусловлено, очевидно, синтезом нитрида кремния, образующего при $\Phi > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ сплошной слой. Обращает на себя внимание то, что при этой дозе концентрация VV -центров все еще довольно велика. Это свидетельствует о наличии залегающего под Si_3N_4 -слоем α -Si. Не исключено и образование включений фазы α -Si в самом слое Si_3N_4 , связанное с протекающей параллельно синтезу ионной диссоциацией химического соединения [5].

Отжиг не влияет на качественный ход кривых в интервале доз $3 \cdot 10^{15} \div 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, но приводит к уменьшению концентрации VV -центров и более резко выраженному минимуму при $\Phi = 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Последнее, естественно, объясняется дополнительным вовлечением азота при отжиге в процесс заполнения оборванных связей и в образование включений Si_xN_y .

Второй экстремум при отжиге из максимума превращается в минимум. По-видимому, наличие пузырьков и пор, формирующихся в данном интервале доз, ускоряет диффузию адсорбированных на поверхности образца кислорода и (или) азота и приводит к насыщению оборванных связей.

Данные по ЭПР согласуются с электрическими свойствами ионно-синтезированных слоев Si : N [2] и подтверждают предложенную в работах [2, 6]

модель, согласно которой слои представляют собой новую фазу, отличающуюся как от аморфного кремния, так и от химического соединения азота с кремнием. Свойства этой фазы определяются двумя конкурирующими процессами — заполнением азотом оборванных связей в аморфной сетке и образованием включений Si_xN_y (или Si_3N_4).

Следует отметить, что максимальное значение температуры кристаллизации и минимальные значения тангенса угла диэлектрических потерь, плотности поверхностных состояний и скорости травления $\alpha\text{-Si}:\text{N}$ в 48%-м растворе HF наблюдались нами [2, 6] примерно при той же дозе ($\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), что и минимальное значение N_s . Некоторый сдвиг по дозе минимума по отношению к соответствующим экстремумам для указанных параметров $\alpha\text{-Si}:\text{N}$ обусловлен вкладом в ЭПР подслоя $\alpha\text{-Si}$, толщина которого непрерывно растет с дозой.

Возможность использования имплантированного азота вместо водорода ($\alpha\text{-Si}:\text{H}$) для насыщения оборванных связей имеет практическое значение, поскольку азот в отличие от водорода не улетучивается вплоть до высоких температур отжига и, кроме того, способствует термостойкости аморфного состояния кремния [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Борун А. Ф., Бузылев Н. В., Данилин А. Б., Мордкович В. Н., Темпер Э. М. // Электрон. техн. Сер. 3. 1989. № 1 (30). С. 39—41.
- [2] Лобанова Н. Е., Павлов П. В., Тетельбаум Д. И., Потапов Л. В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 11. С. 2149—2152.
- [3] Герасименко Н. Н., Двуреченский А. В., Смирнов Л. С. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 9. С. 1700—1705.
- [4] Герасименко Н. Н., Двуреченский А. В., Машин А. И., Хохлов А. Ф. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 1. С. 190—192.
- [5] Лифшиц В. Г., Котляр В. Г., Саранин А. А. // Поверхность: Физика, химия, механика. 1984. № 12. С. 76—84.
- [6] Павлов П. В., Лобанова Н. Е., Тетельбаум Д. И., Крузе Т. А., Справцева И. С. // Тез. Всес. конф. «Ионно-лучевая модификация материалов». Черногловка, 1987. С. 206.

Исследовательский физико-технический институт
при НГУ им. Н. И. Лобачевского
Нижний Новгород

Получено 11.07.1991
Принято к печати 4.03.1992