

структуру в обратном направлении, φ — энергия активации глубокого примесного центра, n — константа, которая варьируется от 0.25 до 0.5 ($e=1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл и $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

На обоих рисунках приведены также температурные зависимости обратного тока (ток инверсии $I_0=57$ мкА). Можно видеть, что СПФ тока и обратный ток I через нее связаны квадратичной зависимостью в достаточно широком интервале температур. Этот результат совпадает с результатом, приведенным в работе [3] для аналогичной структуры, но относящимся к одной температуре. СПФ тока определяется экспонентой, подобной той, которая приведена выше для обратного тока (в показателе экспоненты появляется множитель 2). При фиксированном напряжении ($U=\text{const}$) в одном случае экспонента принимает вид $\exp(-2e\varphi/kT)$, если $e\varphi \gg B(T)U^n$, а в другом — $\exp(2\beta U^n/kT^2)$, если $e\varphi \ll B(T)U^n$, причем $B(T)=\beta/T$, где β — некоторая константа. Таким образом, получают объяснение наблюдаемые зависимости СПФ обратного тока при температурах, больших и меньших температуры инверсии. Наличие температурной инверсии СПФ тока следует также и из приведенных выше выражений, так как экспонента при $e\varphi T_i = \beta U^n$ (T_i — температура инверсии) принимает значение, равное единице. Это означает, что СПФ тока минимальна. В показателе экспонент имеют место разные знаки, что также объясняет различные по знаку наклоны прямых на рисунках.

Из данных температурной ветви для температур, больших температуры инверсии, можно определить энергию активации глубокого примесного центра, ответственного за токовые флуктуации. Эта энергия у глубоких центров в структуре, для которой приведена экспериментальная информация, равна ~ 0.9 эВ. Экспериментально установлено, что температура инверсии СПФ тока зависит от смещающего напряжения, причем с увеличением этого напряжения наблюдается ее рост. Это также следует из последнего приведенного выше выражения.

Список литературы

- [1] Фистуль В. И., Оржевский О. Б. // ФТТ. 1961. Т. 3. В. 4. С. 1158—1160.
- [2] Фистуль В. И., Оржевский О. Б. // ФТТ. 1960. Т. 2. В. 9. С. 2214—2217.
- [3] Дорня В. А., Савицкий О. Г. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 2. С. 404—406.

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 2.12.1988
Принято к печати 20.03.1989

ФТП, том 23, вып. 8, 1989

ГЛУБОКИЕ УРОВНИ В n -Si, ВВОДИМЫЕ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОВОМ ТРАВЛЕНИИ

Омельяновская Н. М., Итальянцев А. Г., Краснобаев Л. Я.,
Мордкович В. Н., Астахова Е. Ф.

В [1-3] показано, что высокотемпературное газовое травление монокристаллического кремния приводит к модификации свойств кристалла. Например, после данного процесса наблюдается аннигиляция собственных дефектов внедренного типа (полных и частичных дислокационных петель) [1], изменяются динамика отжига ионно-имплантированных слоев, степень активации внедренной примеси и ее диффузия [2, 3]. Совокупность перечисленных эффектов можно объяснить, предположив, что высокотемпературное газовое травление приводит к изменению спектра дефектов в приповерхностной области кристалла.

Высокотемпературная обработка монокристаллического кремния в атмосфере различных газов часто сопровождается генерацией разнообразных дефектов в объеме полупроводника. Образование дефектов может повлечь за собой

появление глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника. Наличие этих уровней может быть следствием различных процессов, например возникновения комплексов собственных дефектов или собственных дефектов с примесными атомами. Атомы примеси, входящие в эти комплексы, могут присутствовать в исходном кристалле или привноситься в образец во время термообработки.

Цель данной работы — исследование спектра глубоких уровней в монокристаллическом кремнии, возникающих после высокотемпературного газового травления методом релаксационной емкостной спектроскопии [4], который позволяет выявить наличие даже низких концентраций электрически активных дефектов в приповерхностной области кристалла.

Кремниевые пластины толщиной 380 мкм, *n*-типа проводимости, легированные фосфором до концентраций $(1\div 2) \cdot 10^{14}$ см⁻³, с кристаллографическими ориентациями поверхности (111) и (100) были подвергнуты газовому травлению в атмосфере водорода с добавкой HCl при температуре 1150 °C в течение 4 мин, в процессе которого был удален слой кремния толщиной $0.5\div 1$ мкм. В качестве контрольных к таким экспериментальным образцам служили идентичные пластины Si, подвергнутые аналогичной термообработке в той же камере, но в атмосфере водорода. Таким образом, отличительным признаком экспериментальных и контрольных образцов было наличие или отсутствие травления поверхности кристаллов. Кроме того, исследовались и исходные образцы, не подвергавшиеся после их выращивания никаким дополнительным термообработкам. На всех кристаллах вакуумным напылением золота сформировали барьеры Шоттки. Результаты измерений приведены в таблице. Погрешность измерения энергетического положения глубоких уровней составляла ± 0.01 эВ.

Параметры глубоких уровней, вводимых в *n*-Si при термообработке в атмосфере H₂ (контрольный) и H₂+HCl (газовотравленный)

Ориентация	Образец	$E_c - E$, эВ	τ , см ²	N , см ⁻³
(111)	Исходный	0.14	$2 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{13}$
(111)	Контрольный	0.14	$3 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{10}$
		0.24	$5 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{11}$
		0.30	$2 \cdot 10^{-14}$	$9 \cdot 10^{10}$
		0.54	$4 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{10}$
		0.12	10^{-16}	$7 \cdot 10^{10}$
(111)	Газовотравленный	0.14	$3 \cdot 10^{-16}$	$6 \cdot 10^{10}$
		0.24	$5 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{11}$
		0.30	$2 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{12}$
		0.54	$4 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{10}$
		0.14	$2 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{12}$
(100)	Исходный	0.14	$2 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{12}$
(100)	Контрольный	0.18	$3 \cdot 10^{-16}$	$4 \cdot 10^{12}$
		0.23	$7 \cdot 10^{-17}$	$3 \cdot 10^{12}$
(100)	Газовотравленный	0.27	$5 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{13}$

Как следует из таблицы, исходные кристаллы обеих ориентаций поверхности имели один глубокий уровень $E_c - 0.14$ эВ с сечением захвата электронов $\sigma = 2 \cdot 10^{-14}$ см². Термообработка контрольных образцов с ориентацией (111) привела к появлению четырех новых уровней: $E_c - 0.14$ эВ с иным сечением захвата электронов $\sigma = 3 \cdot 10^{-16}$ см², а также $E_c - 0.30$, $E_c - 0.24$, $E_c - 0.54$ эВ, значения σ для которых представлены в таблице. Газовое травление помимо перечисленных уровней привело к образованию еще одного — $E_c - 0.12$ эВ и более чем на порядок увеличило концентрацию уровня $E_c - 0.30$ эВ.

Иная картина наблюдалась на образцах с ориентацией (100). После термообработки в образцах было зафиксировано два уровня $E_c - 0.18$ и $E_c - 0.23$ эВ, а после газового травления — только уровень $E_c - 0.27$ эВ. Амплитуда этого уровня была так велика, что на его фоне другие пики в спектре не наблюдались.

Поскольку при химическом травлении экспериментальных кристаллов в их приповерхностные слои могли попасть атомы хлора, различие в спектрах

глубоких уровней сравниваемых образцов, в принципе, могло быть обусловлено не только фактом травления, но и различным содержанием хлора в образцах. Для выяснения этого предположения исследовался спектр глубоких уровней в кремнии, в который атомы хлора вводились ионной имплантацией. После отжига в инертной атмосфере при температуре 1100 °С в кристалле наблюдались глубокие уровни со следующими параметрами: $E_c - 0.22$ эВ, $\sigma = 5 \cdot 10^{-14}$ см²; $E_c - 0.29$ эВ, $\sigma = 10^{-16}$ см²; $E_c - 0.44$ эВ, $\sigma = 4 \cdot 10^{-17}$ см². Следует отметить, что для одного из этих трех уровней ($E_c - 0.29$ эВ) различие в энергетическом положении с уровнем в экспериментальном образце ($E_c - 0.30$ эВ) лежит в пределах ошибки эксперимента. Однако сечения захвата электронов на эти уровни различаются на 2 порядка, поэтому они не могут быть связаны с одинаковыми комплексами дефектов. Таким образом, возможное повышение концентрации хлора в экспериментальных образцах не является определяющим фактором в различии набора глубоких уровней экспериментальных и контрольных образцов.

Проведенные исследования позволяют заключить, что химическое травление кристаллов кремния при прочих равных условиях термообработки приводит к повышенной концентрации глубоких уровней в приповерхностной области полупроводника.

На основании литературных данных [5-8] в соответствии с глубиной энергетического положения и сечением захвата электронов наблюдавшимся в работе уровням может быть дана следующая интерпретация: $E_c - 0.18$ эВ — А-центр (V—O), $E_c - (0.23 - 0.24)$ эВ — V_2 ; $E_c - 0.27$ эВ — $V_3 - O$; $E_c - 0.30$ эВ — $V_2 - O$; $E_c - 0.54$ эВ — уровень Au. Центры с уровнями $E_c - 0.12$ и $E_c - 0.14$ эВ идентифицировать не удалось.

Наблюдаемые уровни принадлежат комплексам дефектов, а не являются следствием внесения загрязнений при термообработке. Это подтверждается тем, что наблюдается ориентационная зависимость в образовании глубоких уровней после газового травления. Зафиксированные в экспериментальных и контрольных образцах глубокие уровни, по-видимому, обусловлены появлением дополнительных вакансионных комплексов, включающих и примесные атомы. Тот факт, что содержание остаточных вакансий в комплексах в экспериментальных кристаллах примерно на порядок превышает концентрацию вакансий в контрольных образцах, свидетельствует в пользу того, что высокотемпературное химическое травление, согласно модели [9], сопровождается инжекцией вакансий в объем кристалла и образованием их комплексов. Наблюдаемая зависимость образования глубоких уровней от ориентации поверхности кристалла также предсказывается этой моделью.

Список литературы

- [1] Смутьский А. С., Итальянцев А. Г., Авдеев И. И., Мордкович В. Н. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1983. № 3 (162). С. 62—69.
- [2] Итальянцев А. Г., Краснобаев Л. Я., Кузнецов А. Ю., Мордкович В. Н., Хмельницкий С. Г. // Тез. докл. VI Всес. конф. по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М., 1988. С. 142.
- [3] Итальянцев А. Г., Краснобаев Л. Я., Мордкович В. Н., Омеляновская Н. М., Пашенко П. Б. // Матер. Всес. конф. по повно-лучевой модификации материалов. Чернооголовка, 1987. С. 132.
- [4] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3033.
- [5] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 562 с.
- [6] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 294 с.
- [7] Денисов А. А., Лактюшкин В. Н., Садофьев Ю. Г. // Обзоры по электрон. техн. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1985. № 15 (114). С. 15.
- [8] Вавилов В. С., Кекелидзе Н. Ш., Смирнов Л. С. Действие излучения на полупроводники. М., 1988. 192 с.
- [9] Итальянцев А. Г. // Тез. докл. VI Всес. конф. по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М., 1988. С. 143.

Институт проблем технологии микроэлектроники
и особо чистых материалов АН СССР
Черноголовка

Получено 10.02.1989
Принято к печати 20.03.1989