

СТАБИЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ (СОСТАВ, СТРУКТУРА)
 ПАССИВИРОВАННОЙ ВОДОРОДОМ Si (001)
 ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕДЭПИТАКСИАЛЬНОЙ
 ТРЕМООБРАБОТКИ

В.Г. Антипов, Р.В. Каллион,
 С.А. Никишин, Д.В. Синявский

Процесс пассивации водородом Si (001) поверхности интен-
 сивно изучается последнее время [1,2], так как сулит большие
 перспективы в снижении температуры обработки подложек, предназ-
 наченных для молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния
 термообработки на состав и структуру поверхности пассивированных
 водородом Si (001) подложек, а также обсуждены методические
 приемы, обеспечивающие получение атомарно-чистых поверхностей
 Si (001), пригодных для МПЭ в системе $GaAs/Si$.

Все эксперименты выполнены на установке МПЭ ЭП-1301,
 разработанной в НТО АН СССР и модифицированной в ФТИ им.
 А.Ф. Иоффе. Состав и структура поверхности подложек исследова-
 лась в аналитической камере ЭП-1301 методами оже-электронной
 спектроскопии (ОЭС) и дифракции медленных электронов (ДМЭ) с
 помощью 4-х сеточного энергоанализатора с обратным обзором
 дифракционной картины [3]. Структура поверхности во время термо-
 обработки подложек в парах мышьяка, парциальное давление кото-
 рых составляло (10^{-6} – 10^{-8}) Па, изучалась методом дифракции от-
 раженных быстрых электронов (ДОБЭ) в ростовой камере ЭП-1301.

Длительные низкотемпературные (~ 400 К) обработки подложек
 проводились в камере накопления образцов ЭП-1301. При этом ос-
 таточное давление в этой камере поддерживалось на уровне (5 – 7) \times
 $\times 10^{-8}$ Па при комнатной температуре, или на уровне (10^{-6} – 10^{-7}) Па
 при температуре исследуемых образцов ~ 400 К.

В качестве подложек использовались пластины кремния р-типа
 с удельным сопротивлением от 5 до 10 Ом·см, как ориентирован-
 ные в направлении [100] (точность не хуже $\pm 20^\circ$), так и разориен-
 тированные на $(2.5$ – $4)^\circ$ в направлениях [100] и [110]. Пред-
 варительная химическая обработка подложек, аналогичная [1, 4],
 сводилась к следующей последовательности: 1) отмывка в толуо-
 ле и ацетоне, 2) окисление в кипящей HNO_3 , 3) травление в HF ,
 4) формирование тонкого окисла в смеси $HCl + H_2O_2 + H_2O$, 5)
 отмывка в воде. Операции 3 и 4 повторялись несколько раз. Пос-
 ле отмывки в воде подложка помещалась в тефлоновый держатель.
 установленный на центрифуге, обеспечивавшей скорость вращения

более 1000 об/мин. Во время сушки подложки на ее поверхность периодически подавались капли раствора плавиковой кислоты в этиловом спирте. Применение аналогичной обработки по данным [1] обеспечивает образование на поверхности подложки защитной фазы дигидрида кремния.

По данным ДМЭ и ДОБЭ у подложек $Si(001)$, прошедших обработку в растворе плавиковой кислоты в этаноле, поверхность имела структуру (1×1) , что свидетельствовало об образовании пассивированной водородом поверхности [5]. Отметим, что картина ДМЭ на такой поверхности наблюдалась при энергиях первичного электронного пучка $E_p \geq 70$ эВ. После такой обработки на лучших образцах интенсивность оже-сигнала кислорода (510 эВ) была ниже уровня шумов спектрометра, если время выдержки на воздухе после последней стадии химической обработки не превышало (15–20) мин. Типичное соотношение интенсивностей (1) оже-сигналов кислорода (510 эВ) и кремния (92 эВ) после загрузки в ЭП-1301 составляло $(I_O / I_{Si}) = (0.9–1.5) \cdot 10^{-3}$. Соотношение $I_C(272 \text{ эВ})$ и I_{Si} для лучших образцов было менее $1 \cdot 10^{-3}$. Обычно отношение (I_C / I_{Si}) находилось на уровне $(1.3–3.3) \cdot 10^{-3}$, если время выдержки на воздухе после последней стадии химической обработки не превышало (15–20) мин.

При увеличении времени выдержки на воздухе пассивированных водородом $Si(001)$ подложек до 1–2 ч по данным ОЭС соотношения (I_O / I_{Si}) и (I_C / I_{Si}) возрастали не более чем на порядок. При этом по данным ДМЭ и ДОБЭ структура поверхности $Si(001)$ сохранялась (1×1) , но яркость дифракционной картины падала, а минимальная энергия электронного пучка, при которой отчетливо наблюдалась картина ДМЭ, возрастала до $E_p = 130–200$ эВ. Сохранение структуры пассивированных водородом поверхностей $Si(001)$ наблюдалось и при длительном низкотемпературном (~ 400 К) прогреве их в вакууме при $p \approx 1 \cdot 10^{-6}$ Па. Такой прогрев приводил к возрастанию соотношений (I_C / I_{Si}) и (I_O / I_{Si}) на порядок и более. При этом структура поверхности сохранялась (1×1) , а картину ДМЭ можно было наблюдать при минимальной энергии электронного пучка $E_p \geq 120$ эВ.

Анализ представленных данных ДОБЭ, ДМЭ и ОЭС позволил сделать вывод о том, что сорбция углерод- и кислородосодержащих молекул на пассивированной водородом $Si(001)$ поверхности не сопровождается заметным разрушением $Si-H$ связей.

Полученные данные позволили нам разработать методические приемы, обеспечивающие получение чистых поверхностей $Si(001)$, пригодных для МПЭ в системе $GaAs/Si$, при достаточно низких ($T_s \sim 700$ К) температурах предэпитаксиальной термообработки. При разработке этих приемов было учтено, что связи $Si-H$ разрушаются при температурах более 530 К [1], а следы окисла с поверхности подложки достаточно эффективно удаляются, если термообработку ведут в потоке Si с интенсивностью порядка $J_{Si} \approx 1 \cdot 10^{14}$ ат/см² · с [8].

Термообработка при $T_s \approx 900$ К пассивированных водородом $Si(001)$ подложек, проведенная в ростовом модуле ЭП-1301 без внеш-

него потока Si при фоновом парциальном давлении мышьяка порядка 10^{-7} Па, приводила по данным ДОБЭ и ДМЭ к структурной перестройке поверхности $(1 \times 1) \Rightarrow$ смесь доменов (2×1) и (1×2) . По данным ОЭС это обеспечивало получение поверхностей, свободных от кислорода, и в отдельных случаях от углерода (интенсивность оже-пиков углерода и кислорода была ниже уровня шумов спектрометра). В ряде экспериментов при такой термообработке полного удаления углерода не происходило, а соотношение (I_c / I_{Si}) составляло $(1-1,5) \cdot 10^{-3}$. Причинами наблюдаемого эффекта, по нашему мнению, являются как перенос углерода с молибденового подложкодержателя на поверхность Si подложки, так и частичное разложение десорбирующихся во время прогрева углеродосодержащих молекул. В пользу этого предположения свидетельствует то, что по данным ОЭС содержание углерода на поверхности подложкодержателя в несколько раз превышает содержание углерода на подложках Si , прошедших описанную выше химическую обработку. При этом термообработка молибденовых подложкодержателей в указанных выше условиях практически не меняет содержания углерода на их поверхностях. К тому же после длительных относительно низкотемпературных (~ 700 К) термообработок в потоке кремния $J_{Si} = (1-10) \times 10^{10}$ ат./см².с в течение нескольких часов наблюдалось удаление углерода и кислорода (интенсивность соответствующих оже-пиков ниже уровня шумов спектрометра) с пассивированных водородом Si подложек. При этом содержание углерода на молибденовых подложкодержателях практически не менялось. Влияние осажденного Si на величину Оже-сигнала от углерода являлось несущественным, так как общее количество кремния, осажденное в указанных режимах, не превышало $(0,5-1)$ монослоя, а глубина выхода оже-электронов C_{KLL} (~ 273 эВ) при этих условиях составляет величину $\sim 10 \text{ \AA}$ [7].

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о высокой температурной и временной стабильности свойств пассивированных водородом $Si(001)$ поверхностей, а также о возможности получения атомарно-чистых поверхностей при температурах ~ 700 К, если использовать внешние потоки Si на уровне $(1-10) \cdot 10^{10}$ ат./см².с.

На подложках $Si(001)$, прошедших описанную выше обработку, были получены однодоменные слои $GaAs$. Результаты МПЭ в системе $GaAs/Si$ на подложках, прошедших низкотемпературную обработку в потоке кремния, будут представлены в следующей работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Fenner D.B., Biegelsen D.K., Bringans R.D. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 1. P. 419-424.
- [2] Hirashita N., Kinoshita M., Aikawa I., Ajioka T. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 5. P. 451-453.

- [3] Антипов В.Г., Большунов И.Б., Романов С.С. // ПТЭ, 1990, № 3.
- [4] Ishizaka A., Shiraki Y. // J. Electrochem. Soc. 1986. V. 133. N 4. P. 666-671.
- [5] Kaplan R. // Surf. Sci. 1980. V. 93. N 1. P. 145-158.
- [6] Varibeau J.M., Jackman T.E., Maigne P., Houghton D.O., Denhoff M.W. // J. Vac. Sci. Technol. 1987. A5(4). P. 1898-1902.
- [7] Райх Т., Яржемский В.Г., Нефёдов В.И., Чернышева Л.В., Амусья М.Я. // Поверхность. Физика, химия, механика, 1987, № 10, С. 135-140.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
28 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 19

12 октября 1990 г.

Об.3

© 1990

ЭЛЕКТРОАБСОРБИЦИОННАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ
ВОЛНОВОДНОЙ $P-i-N$ ДГС
С ТУННЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНЫМ МЕХАНИЗМОМ
ВЫНОСА ФОТОГЕНЕРИРУЕМЫХ НОСИТЕЛЕЙ

И.Н. Д о л м а н о в, В.И. Т о л с т и х и н

Развитие систем цифровой обработки информации методами интегральной оптоэлектроники требует создания различного рода нелинейных элементов, совместимых конструктивно и технологически с источниками (приемниками) излучения. Универсальным устройством такого типа может служить оптический бистабильный элемент (ОБЭ) на основе волноводной $P-i-N$ ДГС, работающей в режиме электроабсорбции [1]. Обусловленный взаимной зависимостью темпа межзонной фотогенерации в электрическом поле и напряженностью этого поля в активной области (АО) [2], электроабсорбционный механизм нелинейности в $P-i-N$ ДГС не требует больших мощностей, обладает малой инерционностью и легко реализуется в условиях, допускающих монолитную интеграцию [3, 4]. Для получения бистабильности необходима еще положительная обратная связь [5], осуществление которой менее тривиально и зависит как от типа структуры (классическая или квантово-размерная), так и от спектрального состава излучения (энергия кванта $\hbar\omega$ меньше или