

О.Ю. Смирнова, Г.Ф. Стельмах, Ю.М. Покотило,
В.П. Маркевич, А.В. Мазаник, О.В. Королик

УО «Белорусский государственный университет», Минск, Беларусь

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЯ ОБРАБОТКОЙ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

Введение

Исследования были проведены на структурах Si/P⁺, обработанных в водородной плазме. Ориентация подложка <111>, толщина 510–540 мкм. Эпитаксиальный слой толщиной (55,2–64,8) мкм легирован фосфором ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Обработка структур в водородной плазме проводилась при температуре 150 °С длительностью до 10 часов. Температурные зависимости концентрации электронов в диапазоне 2–300 К определялись из измерений эффекта Холла. Для исследований использовался монокристаллический кремний, легированный бором ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Спектры КРС записывались при комнатной температуре с помощью Nanofinder High End (Lotis II) – микрорамановского спектрометра, совмещенного с 3D сканирующим конфокальным микроскопом. Регистрация спектров осуществлялась по схеме обратного рассеяния, разрешение спектрометра составляло 0,3 см⁻¹. Подводимая к образцу мощность составляла 2 мВт, а диаметр возбуждающего пучка – около 1 мкм. Использовалось возбуждение излучением твердотельного лазера с длиной волны 532 нм.

1. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлен спектр КРС в исходной (1) и обработанной в Н-плазме в течение 5 часов (2) Si/P⁺ структуре. Видно, что после обработки в спектре появляется полоса вблизи 2140 см⁻¹, обусловленная колебательной модой Si-H связи, локализованной в протяженных дефектах (плателетах) [1]. Согласно [2], именно такие комплексы являются основой для формирования Н-доноров двух типов в кремнии, облученном протонами при последующей термообработке в диапазоне (300–400) °С.

На рисунке 2 приведены температурные зависимости концентрации электронов в эпитаксиальном слое Si/P⁺, обработанной в Н-плазме.

Аппроксимация этих данных на основе одноуровневого уравнения нейтральности (сплошная линия) проведена при следующих параметрах – Nd-Na = 1·10¹³ см⁻³ и $\Delta E = 0,045 \text{ эВ}$. Концентрация электронов в области полного истощения примеси составляет 1·10¹⁶ см⁻³, что значительно превышает величину исходной концентрации легирующей примеси фосфора (2–3)·10¹⁵ см⁻³. На этом основании можно предположить, что в эпитаксиальном слое кремния при

обработке в плазме формируются Н-доноры. Кроме того полученное значение энергии ионизации близко к таковому для Н-доноров второго типа $\Delta E \approx 0,04$ эВ, найденному в [2]. Однако в [2] постулируется, что необходимым условием формирования Н-доноров при облучении высокоэнергетическими протонами является наличие высокой концентрации радиационных дефектов и последующая термообработка.

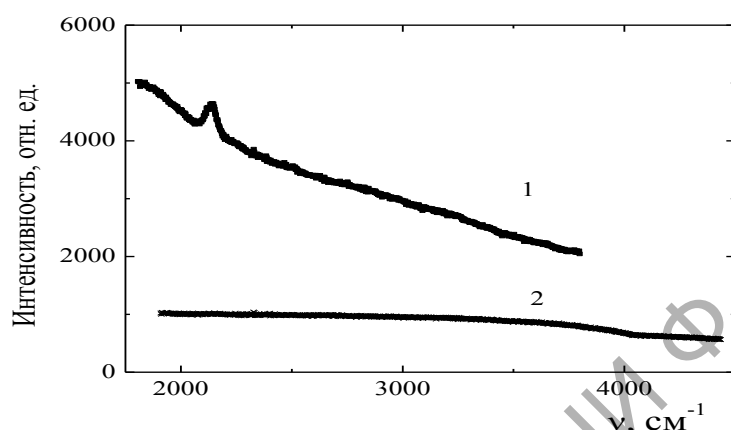


Рисунок 1 – Спектры КРС в исходном (2) и обработанном в Н-плазме (1) кремнии

Таким образом, в кремнии, обработанном в водородной плазме и имплантированном протонами, обнаружен новый тип Н-доноров образующийся без последующей термообработки и, по-видимому, без участия радиационных дефектов.

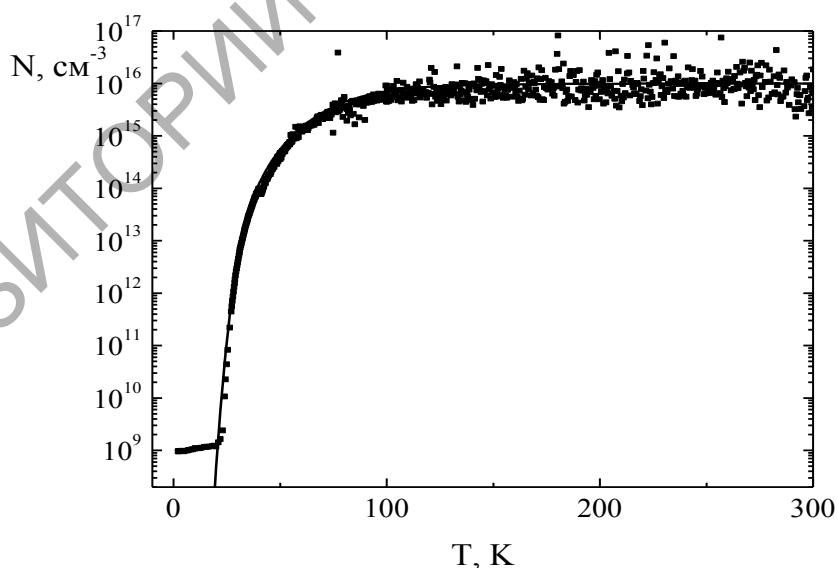


Рисунок 2 – Температурная зависимость концентрации в кремнии, обработанном в Н-плазме. Сплошная линия – расчет

На рисунке 3 представлены спектры КРС в исследуемых образцах после более длительной (10 часов) обработки в Н-плазме (1) и дополнительного отжига при 275 °С в течение 20 минут (2). Видно, что в первом случае наблюдается две перекрывающиеся полосы с максимумами при 2095 (Si-H) и 2129 см⁻¹ (1). Полоса при 2095 см⁻¹ обусловлена аморфизацией кремния после гидрогенизации за счет образования дефектов. После дополнительного краткосрочного отжига проявляется одна узкая полоса с максимумом при 2125 см⁻¹, соответствующая колебаниям связей (Si-H₂) в плателетах [1]. Дополнительная термообработка приводит к восстановлению кристаллической структуры, о чем свидетельствует исчезновение полосы при 2095 см⁻¹ за счет отжига основного радиационного дефекта донор-вакансия [2].

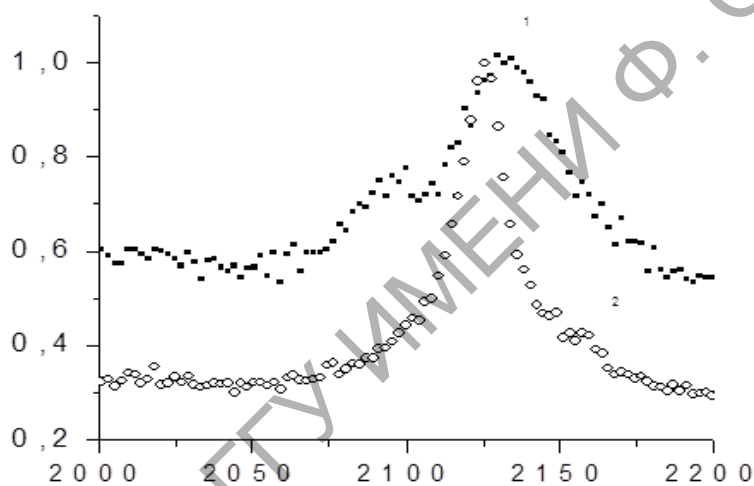


Рисунок 3 – Спектры КРС в исследуемых образцах после обработки в Н-плазме (1) и дополнительного отжига при 275 °С в течение 20 минут (2)

На рисунке 4 представлен спектр КРС в исследуемом образце после обработки в плазме и отжиге. Видно, что наблюдается полоса 4153 см⁻¹, обусловленная колебанием связи в молекуле водорода Н₂^{*}, так как эта частота совпадает с таковой для рассеяния в газообразном водороде [3]. В случае Н₂^{*} комплекса один атом водорода занимает центральное положение на Si-Si связи, формируя Si-H связь, а второй атом Н, находясь в антисвязующем междоузельном положении, формирует Si-H связь с оставшейся оборванной связью [3]. Полная энергия Н₂^{*} меньше, чем полная энергия двух изолированных нейтральных атомов водорода, а при отжиге радиационных дефектов происходит восстановление оборванных связей и выход водорода из связанного состояния. Действительно, энергия разрыва Si-H связи составляет около 1,8 эВ, энергия диффузии атомарного водорода – около 0,48 эВ [3].

Согласно литературным данным [3], в совершенной решетке кремния конфигурация H_2^* в положении тетраэдрического междоузлия более стабильна, чем отдельные моноатомные водородные радикалы. Поэтому уже после отжига при температуре $> 200^{\circ}C$ в кремнии происходит формирование молекул H_2^* . Химическое взаимодействие между молекулами H_2^* в дальнейшем приводит к формированию водородных пузырей.

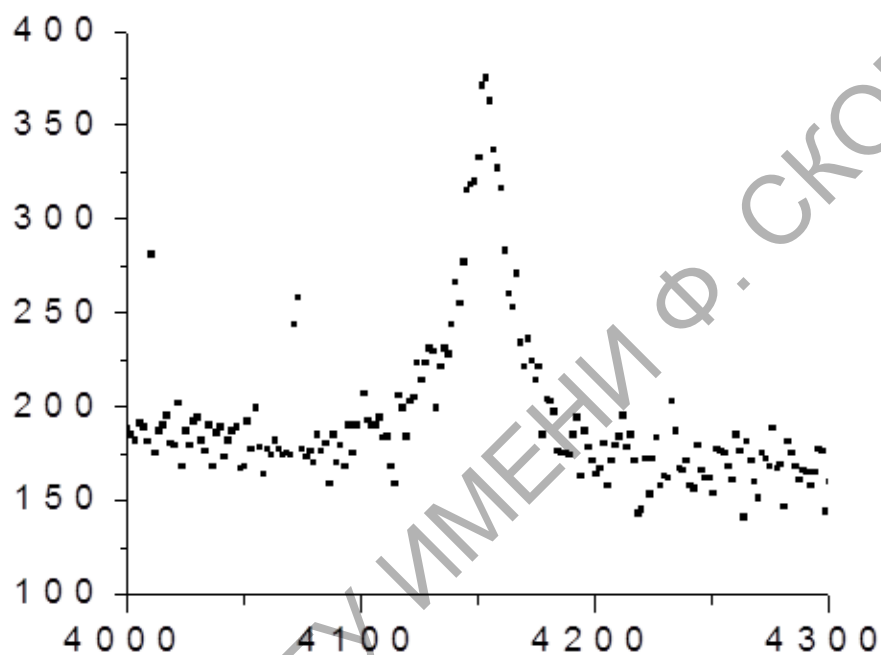


Рисунок 4 – Спектр КРС в образце обработанном в плазме и отожженном при $275^{\circ}C$ в течение 20 минут

Литература

1. Тысченко, И.Е. Кристаллизация пленок кремний-на-изоляторе, имплантированном большими дозами ионов водорода / И.Е. Тысченко, В.А. Володин, М. Фельсков, А.Г. Чернов, В.П. Попов // ФТП. – 2013. – Т. 47. – № 5. – С. 591.
2. Покотило, Ю.М. Формирование водородосодержащих доноров в эпитаксиальном кремнии, имплантированном протонами / Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов, В.Г. Цвырко // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45. – № 11. – 1285 с.
3. Leitch, A.W.R. Formation of hydrogen molecules in crystalline silicon / A.W.R. Leitch, J. Weber, V. Alex // Mat.Science and Eng. – 1999. – Vol. B58. – P. 6.