

ТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДОРОДНЫХ ДОНОРОВ В ИМПЛАНТИРОВАННОМ ПРОТОНАМИ ГЕРМАНИИ

Покотило Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В.

Белгосуниверситет, 220050, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by

Недавно нами установлено, что в процессе термообработки при температурах 200 - 300 °С имплантированного ионами водорода германия формируются быстро диффундирующие мелкие доноры [1]. В настоящей работе исследуется их термическая устойчивость.

Исследования проводились на пластинах p- и n-Ge ($\rho = 25-45$ Ом.см), а также на p⁺-n структурах с резким сплавным (индий) переходом и толщиной базы (100 -120) мкм. Базовым материалом структур (n-область) служил промышленный монокристаллический германий, легированный сурьмой до концентрации $(1-2) \cdot 10^{13}$ см⁻³. Облучение пластин p- и n-Ge, а также p⁺-n структур со стороны базы проводилось протонами (H⁺) с энергией 300 кэВ. Поток облучения составлял $1 \cdot 10^{15}$ см⁻². Концентрация мелких доноров в базовой области p⁺-n структур находилась из измерений вольт-фарадных характеристик при комнатной температуре. Измерение удельного сопротивления пластин производилось четырехзондовым методом с помощью прибора ИУС-3.

Распределение концентрации мелких доноров в базе диода у границы p⁺-n-перехода на разных стадиях изохронного отжига представлено на рис. 1. Уровень концентрации электронов сразу после облучения (кривая 1) определяется концентрацией легирующей примеси. После 20 минутной обработки образцов при 250 °С наблюдается существенное увеличение концентрации электронов (кривая 2). При температурах 300 и 350 °С (кривые 3 и 4 соответственно) концентрация доноров постепенно снижается. Спектры DLTS, измеряемые на всех стадиях термообработки ($T \geq 250^\circ\text{C}$) структуры, не обнаруживали каких-либо глубоких уровней у границы p⁺-n-перехода. Данные рис. 1 указывают на формирование при температурах 250-300 °С донорных центров на расстоянии порядка 100 мкм от облучаемой области, толщина которой определяется пробегом протонов в Ge и при энергии протонов 300 кэВ составляет ~ 3 мкм.

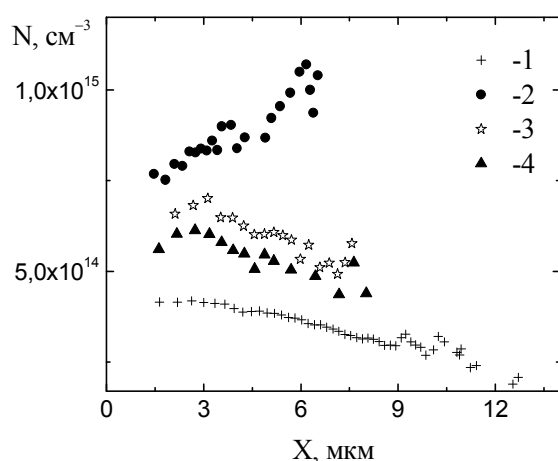


Рис.1. Профили распределения концентрации электронов в базе со стороны p-n-перехода германиевого диода после имплантации протонами (1) и последующего изохронного отжига в течение 20 минут при различных температурах T, °С: 2- 250, 3- 300, 4- 350.

Результаты исследования удельного сопротивления непосредственно облученного слоя в процессе изотермического и изохронного отжига пластин Ge p- и n-типа проводимости представлены на рис. 2 и 3. Видно, что облучение Ge протонами более чем на 2 порядка понижает удельное сопротивление облученного слоя в p-Ge и вызывает p→n конверсию типа проводимости в n-Ge. Это связано с известным фактом формирования в Ge радиационных дефектов (РД) преимущественно акцепторного типа. Часть этих РД теряют свою активность на стадии 150-200 °С изотермического отжига, вызывая некоторое увеличение удельного сопротивления (рис. 2). После повышения температуры отжига до 250 °С происходит резкая p-n-конверсия облученного слоя, свидетельствующая о формировании

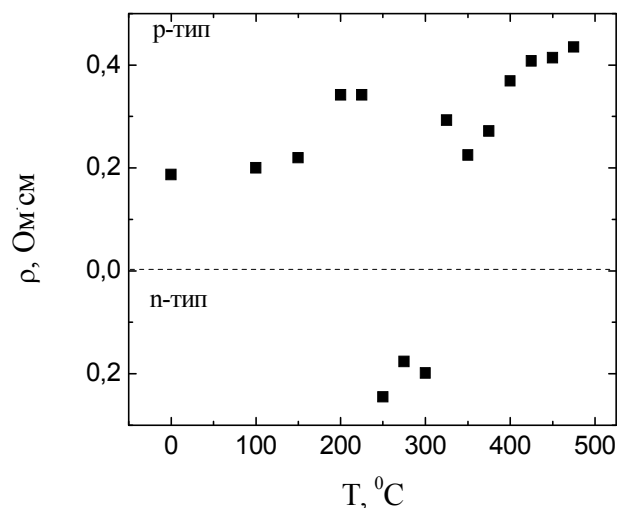


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления облученного ионами водорода слоя пластины p-Ge от температуры изохронного (20 мин.) отжига

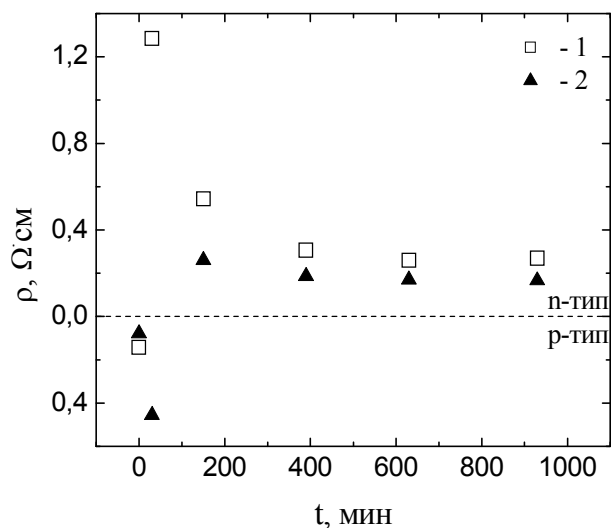


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления облученного ионами водорода слоя пластины n-Ge (1) и p-Ge (2) от длительности изотермического отжига при температуре 250 °С

доноров. Эти доноры существуют в узком температурном интервале 250-300 °С и их концентрация ($\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$) существенно превышает концентрацию легирующей примеси. При дальнейшем увеличении температуры ($> 325 \text{ }^\circ\text{C}$) мелкие доноры исчезают и образец восстанавливает p-тип проводимости. Данные рис. 3 по измерению удельного сопротивления облученного слоя в процессе изотермического отжига пластин n- и p-типа при температуре 250 °С показывают, что максимальная концентрация ($\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) доноров устанавливается в течение примерно 2 часов термообработки и соответствующее этой концентрации значение удельного сопротивления ($\sim 0.2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) сохраняется в течение длительного времени ($> 15 \text{ час.}$).

Из приведенного экспериментального материала видно, что температурный диапазон формирования мелких доноров в приповерхностном облученном слое (рис. 2 и 3) достаточно хорошо коррелирует с температурной областью наблюдения доноров вблизи границы p-n-перехода методом C-V-измерений (рис. 1). Концентрация доноров в облученном слое ($\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) более чем на порядок превышает ее значение у границы p-n-перехода, т.е. на расстоянии порядка 100 мкм от облученного слоя. Узкий температурный интервал (250-350 °С) и высокая термостабильность наблюдаемых

в обеих областях мелких доноров указывает на их одинаковую природу. Полученные данные подтверждают сделанное нами в работе [1] предположение о длиннопробежной миграции мелких доноров из облученного слоя вглубь образца. При этом найденное в работе [1] совпадение эффективного коэффициента диффузии мелких доноров с соответствующим значением для атомарного водорода указывает на возможную связь наблюдаемых доноров с атомарным водородом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Интас-Беларусь (проект №4529) и Республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф04МС-028).

1. Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов. ПЖТФ, **29**(6), 26 (2003).