

©1995 г.

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ ПРИ ПРОТОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

С.Е.Мальханов

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 8 июня 1994 г. Принята к печати 31 октября 1994 г.)

Приводится расчет коэффициента диффузии положительно заряженной вакансии в слое объемного заряда $n^+ - p$ -перехода p -кремния при протонном облучении ($D_{V^+} = 1.2 \cdot 10^{-12}$ см²/с). Найдена локальная температура в этом слое во время облучения ($T_s = 1300^\circ\text{C}$) путем сравнения нашего результата с литературными данными. Предположено, что присутствие дефектов, обнаруженное нами ранее на глубине, вдвое большей, чем пробег протонов с энергией 100 КэВ в кремнии, происходит благодаря диффузии нейтральных вакансий на данную аномальную глубину.

Проблема дефектообразования при облучении кремния α -частицами, дейтронами или протонами в настоящее время продолжает оставаться актуальной [1-4]. Самодиффузия в кремнии в процессе облучения определяет образование более стабильных, чем вакансии, точечных дефектов, содержащих как вакансии, так и дивакансии в своем составе [1]. В данной работе приводятся результаты исследования радиационных дефектов, образующихся вследствие диффузии положительно заряженных V^+ и нейтральных V^0 вакансий в процессе облучения протонами p -кремния в слое объемного заряда, образованного в приповерхностной области кремния путем ионного легирования фосфором.

Образцы вырезались из пластин кремния марки КДБ-10 (кремний, легированный бором, с удельным сопротивлением $\rho \approx 10$ Ом·см) толщиной $d \leq 0.5$ мм перпендикулярно кристаллографическому направлению $\langle 112 \rangle$ в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами плоских граней 2×5 мм². Со стороны одной из плоских граней методом ионного легирования фосфором создавался низкоомный слой n^+ -типа на глубину (0.2—0.3) мкм, со стороны противоположной грани аналогичным способом произведено легирование бором для создания p^+ -слоя, после чего образцы подвергались отжигу в нейтральной среде с целью

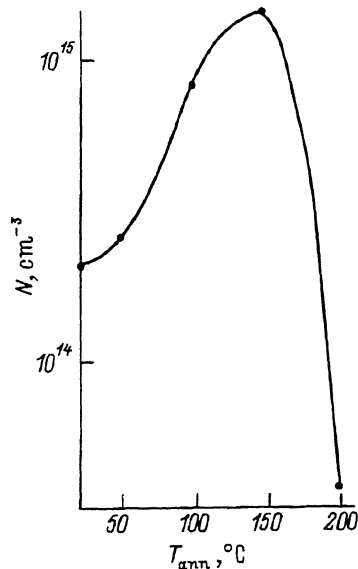


Рис. 1. Зависимость концентрации радиационных дефектов N от температуры изохронного отжига $T_{\text{анн}}$.

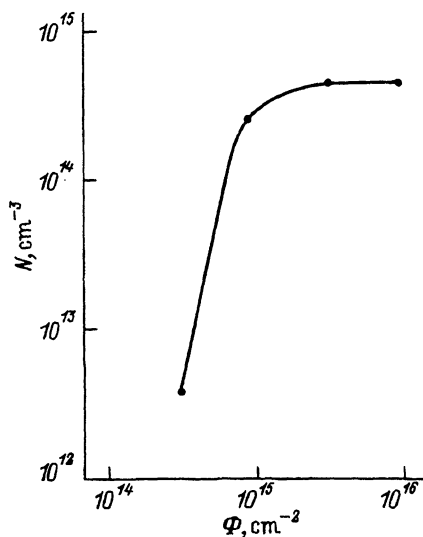


Рис. 2. Зависимость концентрации радиационных дефектов N от дозы облучения протонами Φ .

деаморфизации нарушенного при легировании слоя. Облучение кремния протонами с энергией 100 КэВ со стороны n^+ -слоя проводилось на нейтронном герераторе НГ-200У, специально перестроенном для получения и ускорения ионов водорода. По оценкам из работы [5], протоны с энергией 100 КэВ проникают в кремний на глубину 0.9 мкм.

В работе [4] нами ранее исследован сигнал индуцированной фотоемкости, соответствующий радиационным дефектам (РД), образующимся в кремнии при облучении протонами. При этом в [4] показано, что концентрация РД имеет профиль с максимумом на аномально большой глубине порядка 2 мкм.

Изохронный отжиг образцов показывает (рис. 1), что концентрация РД сначала возрастает при температуре отжига 150°C примерно в 4 раза, а затем резко уменьшается примерно в 30 раз при температуре 200°C . Концентрация РД в зависимости от дозы (рис. 2) вначале линейно нарастает, а затем выходит на насыщение при дозе равной $\Phi \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Такое поведение, вообще говоря, можно объяснить подавлением данных РД другими дефектами или, например, образованием разупорядоченных областей, содержащих скопления вакансий, которые потом, при изохронном отжиге кремния, дают дополнительный вклад в образование данных РД. Подобное поведение рассмотрено, например, в [5], где в составе дефекта, образованного в результате облучения электронами, предположено наличие углерода. Оригинальность метода индуцированной фотоемкости не позволяет найти в литературе более точного аналога для сравнения.

Диффузия положительно заряженных частиц при наличии электрического поля в твердых телах описана в работе [6]. В случае диффузии положительно заряженных вакансий V^+ из тонкого слоя перенос веще-

ства (вакансий в нашем случае) можно описать формулой из работы [6]:

$$N_{V^+} = Q/2(D_{V^+}t)^{1/2} \exp(-\Delta x^2/4D_{V^+}t).$$

Это уравнение является трансцендентным по отношению к коэффициенту диффузии D_{V^+} и решается графически или численно на ЭВМ. Концентрация N_{V^+} и ширина профиля Δx взяты нами из работы [4]; заряд $Q = 2hN_0$, где h — толщина слоя, из которого идет диффузия, (она оценивается по разбросу энергии протонов и составляет 0.1 мкм); N_0 — концентрация частиц в слое h ; t — время облучения, которые составляет 1.4 ч. Из расчета следует, что $D_{V^+} = 1.2 \cdot 10^{-12}$ см²/с. По температурной зависимости коэффициента самодиффузии в кремнии [7] и полученному нами значению D_{V^+} можно оценить эффективную температуру, развивающуюся локально во время облучения кремния протонами. Эта температура составляет примерно 1300°C. Заметим, что так как взаимодействие заряженных вакансий между собой маловероятно, образование дефектов или скоплений вакансий может идти путем взаимодействия нейтральных вакансий между собой и нейтральных вакансий с заряженными. Одновременно с положительно заряженными вакансиями V^+ , согласно, например, [1], в p -кремнии образуются и нейтральные вакансии V^0 , которые также могут диффундировать в кремний. Однако характер диффузии V^0 подчиняется совсем другим закономерностям. Оценка коэффициента диффузии нейтральных вакансий D_{V^0} может быть произведена по обычной формуле, например, из работы [1]. Если использовать все необходимые параметры из той же работы, а температуру — из наших оценок, то из расчета следует, что $D_{V^0} = 2 \cdot 10^{-15}$ см²/с.

Таким образом, механизм образования дефектов в кремнии при протонном облучении можно объяснить диффузией нейтральных вакансий на глубину порядка 2 мкм по локальным трекам вслед за положительно заряженными вакансиями с слое объемного заряда.

Автор благодарит В.Н.Ломасова за проведение протонного облучения образцов.

Список литературы

- [1] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., 1981).
- [2] Е.М. Вербицкая, В.К. Еремин, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан. *ФТП*, **27**, 113 (1993).
- [3] Л.С. Берман, А.М. Иванов, М.Л. Павлова, А.Д. Ременюк, Н.Б. Строкан. *ФТП*, **27**, 1795 (1993).
- [4] Н.В. Колесников, В.Н. Ломасов, С.Е. Мальханов. *ФТП*, **22**, 534 (1988).
- [5] Л.С. Берман, В.А. Жепко, В.Н. Ломасов, В.Н. Ткаченко. *ФТП*, **23**, 2129 (1989).
- [6] Б.И. Болтакс. *Диффузия в полупроводниках* (Л., 1961).
- [7] Б.И. Болтакс. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках* (Л., 1972).

Редактор Т.А. Полянская

Defect formation in silicon exposed to proton bombardment

S.E. Malkhanov

Diffusion coefficient of a positive vacancy in the transition region of $n^+ - p$ -junction in p -silicon under proton irradiation ($D_{V^+} = 1.2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$) has been calculated. A local temperature of the region can be obtained by means of comparison with the literature results available ($T = 1300^\circ \text{C}$). Assumption has been made that the observed earlier presence of defects at a depth twice as big occurs due to diffusion of neutral vacancies to this anomalous depth.
