

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Бумай Ю. А., Ульяшин А. Г., Шакин И. А., Шлопак Н. В.

Исследовались изменения электрофизических свойств имплантированных и эпитаксиальных слоев кремния, легированных фосфором, в результате введения атомарного водорода. Установлено, что наиболее значительное снижение концентрации электрически активных центров фосфора в n -Si, сопровождающееся также увеличением подвижности электронов, происходит при гидрогенизации материала в температурном интервале 20—80 °С. Полученный эффект связывается с образованием нейтральных комплексов донор—водород в результате кулоновского взаимодействия H^- и P^+ .

Уникальная способность атомарного водорода пассивировать глубокие и мелкие дефекты в различных полупроводниках исследовалась в ряде работ (см. обзоры [1-3]). К настоящему времени хорошо установленным фактом является нейтрализация доноров и акцепторов в арсениде галлий и акцепторов в кремнии. В то же время в большинстве работ отмечалось отсутствие пассивации мелких доноров в Si, и лишь в [4] впервые наблюдались незначительные уменьшения концентрации и увеличение подвижности электронов в n -Si после гидрогенизации при 150 °С. Это связывалось с образованием нейтральных комплексов донор—водород, что позднее было подтверждено исследованиями ИК поглощения [5]. Энергия связи этих комплексов оказалась ниже, чем энергия связи комплексов акцептор—водород [1]. Вместе с тем авторы [6] показали, что наблюдаемые после гидрогенизации при температуре 150 °С различия диффузионных профилей распределения дейтерия в n - и p -кремнии отсутствуют в образцах, гидрогенизированных при 480 °С. Таким образом, имеющиеся к настоящему времени экспериментальные данные указывают на необходимость проведения более детальных исследований взаимодействия атомарного водорода с мелкими донорами в кремнии.

В настоящей работе исследовались свойства кремния, легированного фосфором, после обработки в водородной плазме.

Для исследования были использованы эпитаксиальные (2—10 мкм) с концентрацией электронов $(0.6 \div 6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и имплантированные ионами P^+ с энергией 75 кэВ, дозой 150 мкКл/см² слои n -Si на подложках p -типа проводимости. Профили распределения электрически активных центров в Si до и после гидрогенизации получены измерением при комнатной температуре на частоте 1 МГц вольт-фарадных ($C-V$) характеристик барьера Шоттки, создаваемого с помощью ртутного зонда. Концентрация и подвижность электронов в образцах, на которые перед гидрогенизацией были нанесены алюминиевые контакты, измерены методом Ван-дер-Пау при 78 и 293 К. Структурные нарушения в приповерхностной области образцов, образующиеся в результате обработки в плазме, контролировались методом резерфордского обратного рассеяния ионов He с начальной энергией 2 МэВ.

Гидрогенизация образцов осуществлялась в плазме водорода при температурах —180 ÷ +150 °С в течение 10—120 мин. Энергия ионов водорода составляла 300 эВ, плотность тока — 30 мкА/см². Результаты измерений профилей

электрически активных центров в эпитаксиальных слоях Si в зависимости от температуры обработки в водородной плазме показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что значительные изменения профиля распределения происходят в температурном интервале 20—80 °С. При этом наиболее глубокое проникновение водорода с образованием нейтральных комплексов донор—водород наблюдается при температуре 50 °С независимо от исходных параметров материала. Для дополнительного подтверждения факта диффузии водорода с последующей нейтрализацией доноров, которая приводит к наблюдаемым изменениям профилей распределения, была проведена обработка образцов в водородной плазме в течение 60 мин при температуре —180 °С. В этом случае обнаружены незначительные изменения профилей распределения концентрации электрически актив-

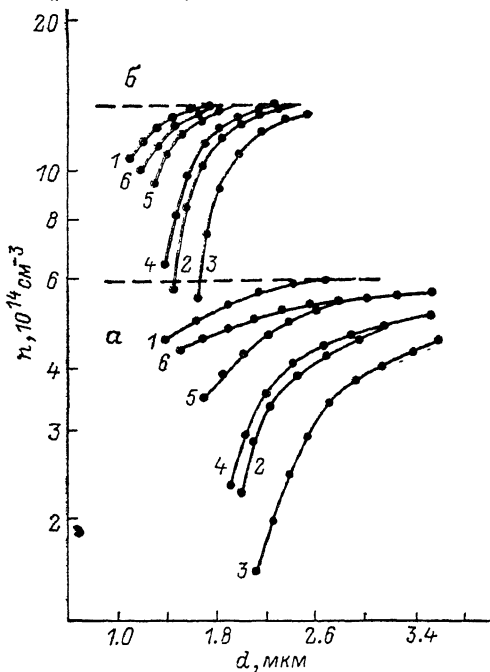


Рис. 1. Профили распределения концентрации электрически активных центров фосфора в эпитаксиальных слоях n -Si толщиной 7 (а) и 3 мкм (б) после обработки в водородной плазме в течение 20 мин при разных температурах.

T , °С: 1 — 180, 2 — 20, 3 — 50, 4 — 80, 5 — 100, 6 — 150. Штриховая линия — уровень легирования исходного (до обработки) материала.

ных центров. Эти изменения могут быть вызваны структурными нарушениями вблизи поверхности образцов. На наличие нарушения у поверхности указывают спектры резерфордского обратного рассеяния (рис. 2). Из рис. 2 видно, что аморфизации поверхностного слоя материала при указанных выше режимах обработки в водородной плазме не происходит, а размер области нарушения не превышает 50 нм, в то время как снижение концентрации электронов в приповерхностной области при температурах ≥ 20 °С происходит на глу-

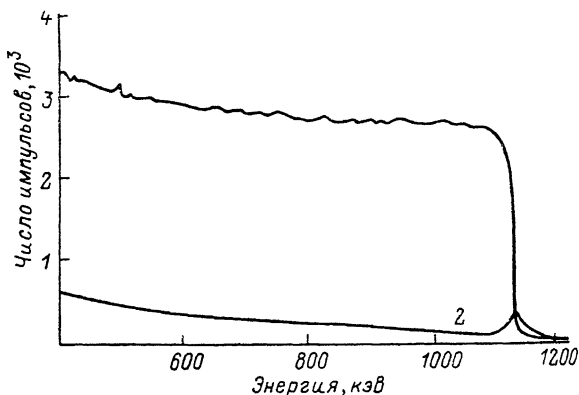


Рис. 2. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов He от эпитаксиального кремния, обработанного в водородной плазме.

1 — неориентированный, 2 — после обработки при 80 °С, 20 мин.

бину более 1 мкм. Нейтрализация водородом доноров фосфора в приповерхностном слое n -Si подтверждается, кроме того, зависимостью профилей распределения электрически активных центров от времени обработки в водородной плазме (рис. 3). Отметим, что при временах обработки > 40 мин, так же как и в случае нейтрализации акцепторов [7], наблюдается эффект насыщения

О нейтрализации мелких доноров водородом свидетельствует также наблюдаемое при температуре 78 К увеличение подвижности электронов в ионно-легированных и эпитаксиальных образцах, которое указывает на снижение концентрации пониженой примеси, ограничивающей подвижность носителей заряда в кремнии при данной температуре.

На рис. 4 представлены профили распределения электрически активных центров в гидрогенизированном эпитаксиальном n -кремнии при различных температурах отжига. Отжиг проводился в термической печи на воздухе. Из рисунка видно, что почти полное восстановление профилей происходит в результате отжига в течение 10 мин при температуре 150 °С и выше, что свидетельствует о более низких значениях энергии связи нейтральных комплексов донор—водород по сравнению с комплексами акцептор—водород [1].

Наблюдаемая нейтрализация доноров при гидрогенизации позволяет предположить, что в кремнии n -типа, в котором уровень Ферми расположен вблизи зоны проводимости, водород находится в отрицательно заряженном состоянии, что обусловлено захватом дополнительного электрона на глубокий уровень, создаваемый атомарным водородом [8]. В связи с этим вследствие кулоновского

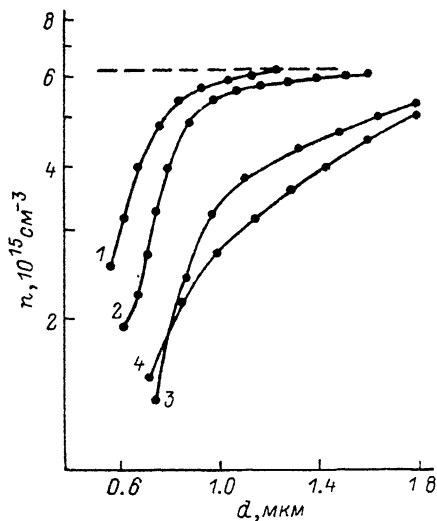


Рис. 3. Профили распределения электрически активных центров фосфора в эпитаксиальных слоях Si толщиной 10 мкм после обработки в водородной плазме при температуре 50 °С в течение различного времени.

t , мин: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 40, 4 — 120. Штриховая линия — уровень легирования исходного (до обработки) материала.

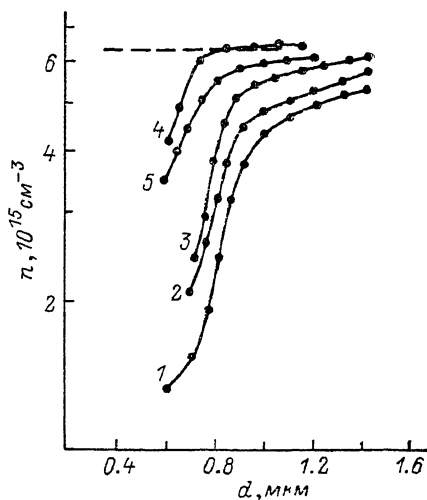


Рис. 4. Профили распределения электрически активных центров фосфора в обработанном в водородной плазме эпитаксиальном Si после отжига в течение 10 мин при разных температурах.

1 — без термообработки; T , °С: 2 — 100, 3 — 120, 4 — 150. Профиль 5 получен в результате приложения к поверхности обработанного в водородной плазме образца потенциала +20 В в течение 60 мин при комнатной температуре. Штриховая линия — уровень легирования в исходном (до обработки) материале.

взаимодействия центров P^+ и H^- наблюдается образование нейтральных комплексов $P-H$, которые стабильны при температурах, не превышающих ~100 °С. Это предположение подтверждается наблюдаемыми изменениями профилей распределения электрически активных центров в гидрогенизированном n -Si в электрическом поле, создаваемом при приложении положительного потенциала к поверхности активного слоя (рис. 4). Из рис. 4 видно, что уже при 20 °С происходит смещение водорода к поверхности образца, что эквивалентно восстановлению профилей при термическом отжиге.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в температурном интервале 20—80 °С происходит значительное снижение концентрации электронов в приповерхностной области кремния. Это может вызывать нежелательные изменения электрофизических параметров материала при различных технологических обработках, приводящих к непреднамеренному введению водорода [1, 2]. Кроме того, в кремнии n -типа атомарный водород в отличие от кремния p -типа (в котором он находится в состоянии H^+) находится в отрицательно заряженном состоянии, что подтверждается характером наблюдаемой нами ми-

грации его в электрическом поле. Это является причиной образования нейтральных комплексов донор—водород по механизму кулоновского взаимодействия H^- и P^+ , менее термически стабильных, чем комплексы акцептор—водород.

Список литературы

- [1] Pearton S. J., Corbett J. W., Shi S. // *Appl. Phys.* 1987. V. A43. P. 153—195.
- [2] Chevallier J., Aucouturier M. // *Ann. Rev. Mater. Sci.* 1988. V. 18. P. 219—256.
- [3] Омеляновский Э. М., Поляков А. Я. // *Высококичстые вещества.* 1988. № 5. С. 5—19.
- [4] Johnson N. M., Herring C., Chadi D. J. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. P. 769—772.
- [5] Bergman K., Stavola M., Pearton S. J., Lopata J. // *Phys. Rev. B.* 1988. V. 37. N 5. P. 2770—2773.
- [6] Омеляновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я., Бородин О. М. // *ФТП.* 1989. Т. 23. В. 1. С. 178—180.
- [7] Zandel T., Mesli A., Muller J. C., Siffert P. // *Appl. Phys.* 1989. V. A48. P. 31—40.
- [8] Johnson N. M., Herring C. // *Mater. Sci. Forum.* 1989. V. 38-41. P. 961—966.

Белорусский политехнический
институт
Минск

Получена 25.04.1990
Принята к печати 17.08.1990

