

УДК 621.315.592

Влияние состояния водорода в решетке на эффективность введения донорных центров в кислородсодержащем кремнии

© В.В. Болотов[¶], Г.Н. Камаев*, А.В. Носков^{¶¶}, С.А. Черняев*, В.Е. Росликов

Омский филиал Института физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 644027 Омск, Россия

* Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 6 мая 2005 г. Принята к печати 6 июня 2005 г.)

Проведены исследования эффективности введения донорных центров в кислородсодержащем Si при термообработках при 450°С после предварительной гидрогенизации в плазме водорода и облучения γ -квантами ⁶⁰Со. Показано, что максимальная скорость введения донорных центров наблюдается в образцах, содержащих водород в атомарной форме. Облучение Si γ -квантами ⁶⁰Со с предварительно гидрогенизированным в плазме водорода слоем приводит к высвобождению атомарного водорода из связанных состояний. Это повышает скорость введения донорных центров при последующих термообработках при 450°С.

PACS: 81.40.Ef, 81.40.-g, 61.80.Ed, 73.30.+y

1. Введение

Известно, что низкотемпературные обработки кислородсодержащего Si в диапазоне температур 300–500°С приводят к образованию электрически активных донорных центров с участием атомов кислорода — термодоноров [1]. Эффективность образования таких комплексов во многом определяется дефектно-примесной подсистемой кристалла и условиями термообработок [2]. Легирующие и неконтролируемые примеси, присутствующие в исходных кристаллах, могут приводить как к ускорению, так и к замедлению скорости образования термодоноров. Так, предварительное насыщение кристаллов Si водородом приводит к возрастанию скорости генерации термодоноров [3–5]. Предполагается, что увеличение связано с существенным возрастанием подвижности кислорода за счет уменьшения энергии активации миграции в результате межпримесного взаимодействия с водородом [6]. Водород в исследуемые образцы чаще всего вводился посредством высокотемпературных (1200–1300°С) обработок в атмосфере H₂ с последующим быстрым охлаждением [3,4]. После таких режимов обработки водород при комнатной температуре находится в основном в виде молекул H₂ и только незначительная его часть — в атомарной форме. Остается неясным вопрос — атомарный или молекулярный водород вызывает ускорение диффузии кислорода.

В связи с этим цель данной работы заключается в выяснении степени влияния состояния водорода в решетке Si на рост эффективности образования донорных центров в Si, выращенном по методу Чохральского (Cz-Si).

2. Методика эксперимента

В экспериментах использовались образцы марки КДБ-20 и КДБ-7.5. Гидрогенизация осуществлялась в плазме атомарного водорода, получаемой высокочастотным разрядом (13.56 МГц), в диапазоне температур $T_{\text{hg}} = 100\text{--}200^\circ\text{C}$. Облучение γ -квантами ⁶⁰Со велось при температуре 160°С на воздухе. Термообработки проводились в цилиндрической печи на воздухе при температуре $T_{\text{ann}} = 450^\circ\text{C}$ в течение 15 мин. Профили ионизированной примеси в приповерхностной области пластины определялись путем измерений $C\text{--}V$ -характеристик полупроводниковых структур с барьерами Шоттки.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлены профили распределения концентрации ионизированной примеси $N = N_a - N_d$ в Cz-Si после ряда циклических обработок, где N_a и N_d — концентрации акцепторов и доноров соответственно. Цикл обработки представлял собой гидрогенизацию в течение 15 мин в водородной плазме при температуре $T_{\text{hg}} = 100^\circ\text{C}$ с последующим 15-минутным прогревом в печи при температуре $T_{\text{ann}} = 450^\circ\text{C}$. Такая периодическая гидрогенизация приповерхностной области кремния позволяет организовать постоянную „подпитку“ структуры атомарным водородом в процессе термообработки. При этом в качестве ограниченного источника атомарного водорода выступают электрически нейтральные комплексы типа $(\text{AH})^0$, образующиеся при взаимодействии водорода (H^+) с акцепторной примесью (A^-) в кремнии. Как следует из литературных данных, температура стабильности этих комплексов составляет 160–180°С [7]. При температуре 450°С атомы водорода высвобождаются с этих комплексов и начинают

[¶] E-mail: bolotov@phys.omsu.omscreg.ru

^{¶¶} E-mail: a_v_noskov@mail.ru

диффундировать. Из представленной на рис. 1, *b* зависимости видно, что максимальная скорость роста донорных центров (ДЦ) наблюдается в течение первых трех циклов обработки. Дальнейшие обработки не оказывают существенного влияния на рост ДЦ, и скорость роста становится сравнимой со скоростью введения ДЦ в негидрогенизированных структурах (ср. кривые 4 и 7 на рис. 1, *a*). Это может быть, в частности, связано с тем, что с каждым последующим циклом гидрогенизации доля водорода, накопленного на нейтральных комплексах $(\text{АН})^0$, уменьшается.

В пользу такого предположения свидетельствуют результаты, представленные на рис. 2. Обработка в плазме атомарного водорода исходного образца в течение

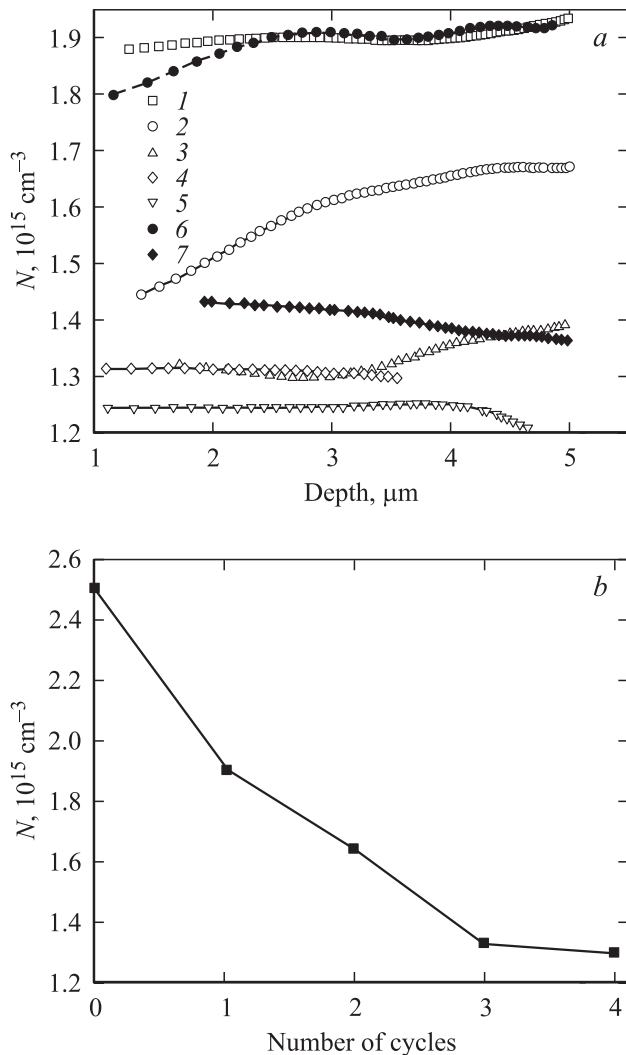


Рис. 1. *a* — профили концентрации ионизированной примеси после циклических обработок (1–5) и после — только отжига (6, 7). 1 — 1 цикл, 2 — 2 цикла, 3 — 3 цикла, 4 — 4 цикла, 5 — 5 циклов, 6 — отжиг при $T_{\text{ann}} = 450^\circ\text{C}$ в течение 30 мин; 7 — отжиг при $T_{\text{ann}} = 450^\circ\text{C}$, 60 мин. *b* — концентрация ионизированной примеси на глубине 3 μm в зависимости от числа циклов. Материал — Si марки КДБ-7.5. Цикл: 15 мин H^+ ($T_{\text{hg}} = 100^\circ\text{C}$) + 15 мин при $T_{\text{ann}} = 450^\circ\text{C}$.

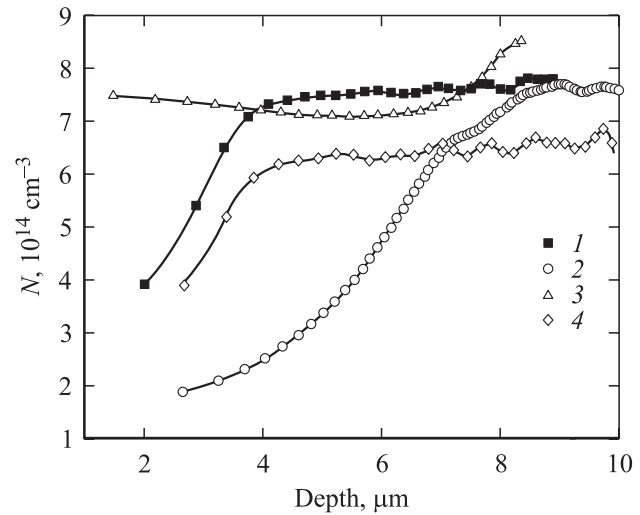


Рис. 2. Профили концентрации ионизированной примеси после гидрогенизации (H^+) и термообработки (ТО). 1 — до гидрогенизации; 2 — 10 мин H^+ ; 3 — 10 мин H^+ + ТО; 4 — 10 мин H^+ + ТО + 10 мин H^+ . Материал — Si марки КДБ-20. Гидрогенизация проводилась при $T_{\text{hg}} = 100^\circ\text{C}$. Термообработка проводилась при $T_{\text{ann}} = 450^\circ\text{C}$ в течение 15 мин.

10 мин приводит к понижению концентрации электрически активной примеси до уровня $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ на глубине 7 μm (кривая 2). Последующий прогрев при 450°C ведет к распаду образовавшихся нейтральных комплексов $(\text{АН})^0$ и восстановлению концентрации электрически активной примеси практически до исходной величины (кривая 3). После дополнительной гидрогенизации в течение еще 10 мин (кривая 4) глубина пассивированной области составила 4 μm и количество водорода в электрически нейтральных комплексах $(\text{АН})^0$ стала меньше. Поскольку условия гидрогенизации остались прежними, это свидетельствует об образовании электрически неактивных стабильных комплексов с водородом. В частности, атомарный водород может объединяться в молекулы H_2 или накапливаться на центрах захвата в составе более стабильных комплексов дефектов [8]. Из приведенных данных следует, что наблюдается корреляция между концентрацией атомарного водорода и эффективностью введения ДЦ. Поскольку известно, что воздействие ионизирующего излучения (электронами, γ -квантами ^{60}Co) приводит к освобождению атомов водорода из связанных электрически неактивных форм и перераспределению подвижного атомарного водорода между ловушками [9], нами было проведено облучение γ -квантами ^{60}Co при $T = 160^\circ\text{C}$. Полученные после облучения различной длительности результаты для образцов, прошедших предварительную гидрогенизацию в течение 60 мин при 100°C , представлены на рис. 3.

Такие условия гидрогенизации позволяют накопить водород в решетке кремния в различных формах (атомарном в составе комплексов точечных дефектов или молекулярном) [10]. Концентрация ионизированной приме-

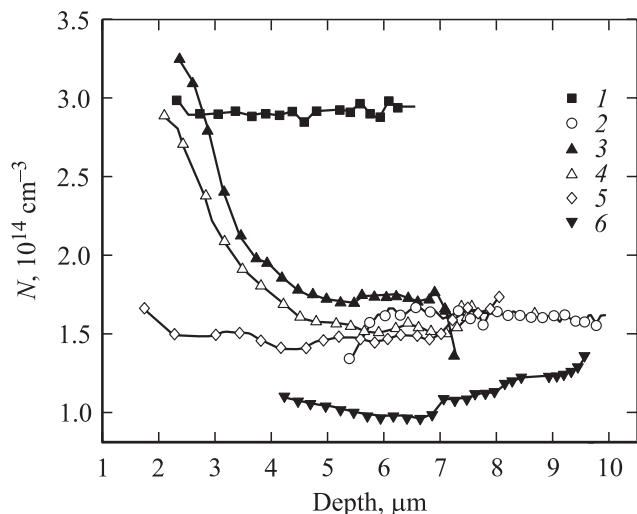


Рис. 3. Профили концентрации ионизированной примеси после различных типов обработок. 1 — до гидрогенизации, 2 — после гидрогенизации + ТО; 3 — после обработки 2 + облучение 20 мин; 4 — после обработки 2 + облучение 80 мин; 5 — после обработки 2 + облучение 140 мин; 6 — после обработки 5 + ТО. Материал — кремний КДБ-20. Гидрогенизация: при $T_{hg} = 100^\circ\text{C}$ в течение 60 мин. Термообработка (ТО): при $T_{ann} = 450^\circ\text{C}$ в течение 15 мин.

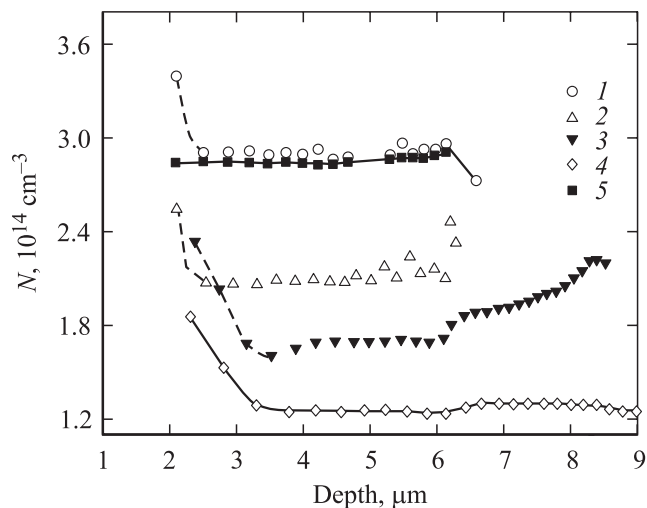


Рис. 4. Профили концентрации ионизированной примеси после облучения и термообработки. 1 — исходный Si, 2–4 — после облучения в течение времени t , мин: 2 — 20, 3 — 80, 4 — 140; 5 — после облучения в течение 140 мин и отжига при 450°C .

си после гидрогенизации и термообработки составляет $\sim 1.75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2). При последующем облучении γ -квантами с увеличением длительности от 20 до 140 мин наблюдается незначительное понижение концентрации ионизированной примеси. Оно связано как с возможной пассивацией легирующей примеси и образованием электрически нейтральных комплексов $(\text{AH})^0$ за счет высвобождения атомарного водорода, так и с введением компенсирующих радиационных дефектов.

Относительно низкую степень компенсации с ростом дозы облучения можно объяснить тем, что атомарного водорода достаточно для пассивации образующихся радиационных дефектов [9]. Проведенная последующая ТО при 450°C приводит не к восстановлению (за счет отжига радиационных дефектов), а к дальнейшему уменьшению концентрации ионизированной примеси вплоть до 10^{14} см^{-3} (кривая 6). Такое поведение может быть обусловлено быстрым ростом концентрации ДЦ в присутствии атомарного водорода, который был накоплен в кристалле кремния в составе электронейтральных комплексов. Это подтверждается результатами контрольного эксперимента (рис. 4), где представлены профили концентрации ионизированной примеси после облучения и ТО исходного (негидрогенизированного) образца. С увеличением дозы облучения концентрация ионизированной примеси монотонно понижается от $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ у исходного образца (кривая 1) до $1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ после облучения в течение 140 мин (кривая 4). После ТО при температуре 450°C (кривая 5) концентрация ионизированной примеси восстанавливается и практически достигает исходной, что связано с отжигом введенных точечных радиационных дефектов.

4. Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что увеличение концентрации водорода именно в атомарном состоянии в кремнии приводит к росту эффективности введения кислородсодержащих донорных центров при термообработках 450°C , что может быть обусловлено увеличением скорости диффузии кислорода.

Авторский коллектив выражает благодарность Ю.А. Стенькину за проведение облучений на γ -установке „Исследователь“.

Список литературы

- [1] W. Kaiser, H. Frisch, H. Reiss. *Phys. Rev.*, **112**, 1546 (1958).
- [2] В.М. Бабич, Н.И. Блещкан, Е.Ф. Венгер. *Кислород в монокристаллах кремния* (Киев, Интерпрес ЛТД, 1997).
- [3] R.C. Newman. *J. Phys.: Condens. Matter*, **12**, R335 (2000).
- [4] В.П. Маркевич, Л.И. Мушин. *ФТП*, **34**, 1039 (2000).
- [5] R. Murray. *Physica B*, **170**, 115 (1991).
- [6] S.K. Estreicher. *Phys. Rev. B*, **41**, 9886 (1990).
- [7] S.J. Pearton, J.W. Corbett, T.S. Shi. *Appl. Phys.*, **A43**, 153 (1987).
- [8] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 1990).
- [9] V.V. Bolotov, V.M. Emeksuzyan, G.L. Plotnikov. *K. Schmalz. Phys. Status Solidi (a)*, **137**, 67 (1993).
- [10] G.N. Kamaev, S.A. Chern'aeV, V.V. Bolotov, M.D. Efremov. *Sol. St. Phenomena*, **82-84**, 99 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

**The influence of condition of hydrogen
in the lattice on efficiency of donor
centers' injection in silicon with oxygen
impurity**

V.V. Bolotov, G.N. Kamaev, A.V. Noskov,
S.A. Chernyaev*, V. Roslikov*

The Omsk branch of Institute
of Physics of Semiconductors,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
644027 Omsk, Russia

* The Institute of Physics of Semiconductors,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia