

В результате облучения образцов концентрация доноров в них сначала растет с дозой облучения, а по достижении некоторого ее значения начинает падать (рис. 1). Зависимость величины максимальной концентрации электронов от исходной концентрации НЗ при фиксированных интенсивности и температуре облучения говорит в пользу наличия предельного значения концентрации доноров, достижимого при данных условиях. Поэтому при исходной концентрации НЗ, превышающей $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, инверсии типа проводимости не наблюдалось, хотя характер закономерности процесса накопления доноров сохранялся. Существенное влияние на скорость накопления дефектов донорного типа оказывает темп генерации первичных радиационных дефектов. Так, возрастание плотности потока протонов при дозе выше 10^{14} см^{-2} и фиксированной температуре облучения приводит к снижению эффективности создания дефектов, являющихся донорами (рис. 2). Облучение инвертированных слоев при малой плотности потока протонов сопровождается быстрым уменьшением концентрации электронов в инвертированном слое, что при величине дозы $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ приводит к обратной инверсии типа проводимости.

Полученные результаты можно объяснить в предположении, что по мере увеличения дозы облучения происходит перестройка простых дефектов, являющихся донорами, в более сложные, которые либо оказываются нейтральными, либо обладают акцепторными свойствами. Возрастание интенсивности облучения приводит к увеличению темпа генерации сложных дефектов (см., например, [4]) и соответственно к уменьшению скорости введения доноров. Аналогичное явление наблюдается и при увеличении температуры облучения [1].

Возможно, однако, и одновременное образование радиационных дефектов донорного и акцепторного типа, имеющих принципиально разную природу: например, одни связаны с дефектами в подрешетке свинца, а другие — в подрешетке селена. У таких дефектов, очевидно, должны быть и различные энергетические пороги дефектообразования.

С целью получения дополнительных сведений о природе вводимых дефектов нами использовалось облучение слоев селенида свинца электронами различных энергий. Уменьшение энергии электронов до величины, достаточной только для смещения атомов селена, не приводило к прекращению генерации доноров, причем зависимость концентрации доноров от дозы облучения имела вид, аналогичный кривым, приведенным на рис. 1. Это позволило сделать вывод, что дефекты донорного и акцепторного типа связаны со смещением атомов в подрешетке селена.

Л и т е р а т у р а

- [1] Брудный В. Н., Войцеховский А. В., Кривов М. А., Петров А. С. // Физические основы радиационной технологии твердотельных электронных приборов. Клев, 1978. С. 24—36.
- [2] Wang C. C., Tao T. F., Sunier J. W. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 19. P. 3881—3884.
- [3] Брудный В. Н. и др. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 8. С. 1606—1608.
- [4] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.

Получено 7.06.1988
Принято к печати 21.07.1988

ФТП, том 23, вып. 1, 1989

О ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В КРЕМНИИ

Омельяновский Э. М., Пахомов А. В., Поляков А. Я.,
Бородина О. М.

В последнее время внимание многих исследователей привлекает явление водородной пассивации примесей и дефектов в полупроводниках (см., например, обзор [1]). Важным аспектом проблемы является, конечно, изучение закономер-

ностей диффузии водорода в различных материалах. Для кремния экспериментальные исследования проводились в [2-6]. Сообщалось, что при температурах 100-200 °С скорость диффузии в *p*-Si значительно выше, чем в *n*-Si, а характер диффузионных профилей водорода в этих двух материалах в корне различный. В работах Пантелидеса [7] и Капицы и др. [8] для объяснения наблюдаемых эффектов предполагалось, что водород в Si — глубокий донор. Соответственно в *n*-Si нейтральный водород, легко образуя молекулы, становится сравнительно мало подвижным [2, 3]. В *p*-Si при низких температурах (меньше 200 °С) происходит движение преимущественно положительно заряженного водорода во встроенном электрическом поле, обусловленное неоднородной пассивацией [8], что позволяет хорошо описать сложный диффузионный профиль водорода в *p*-Si. Отметим, однако, что эксперименты по диффузии водорода в *n*-Si [3], на которых частично базируются модели [7, 8], проведены для тонких слоев, полученных ионной имплантацией фосфора в Si. Не исключено поэтому, что заметное торможение водорода в таких слоях может быть обусловлено наличием упругих напряжений и незалеченных радиационных дефектов на границе слоя. Более того, авторы [3] даже наблюдали накопление водорода на этой границе. Поэтому представлялось целесообразным воспроизвести эксперименты по диффузии водорода в кремнии на достаточно толстых эпитаксиальных слоях *n*- и *p*-типа, с тем чтобы исключить возможное влияние границы слоя.

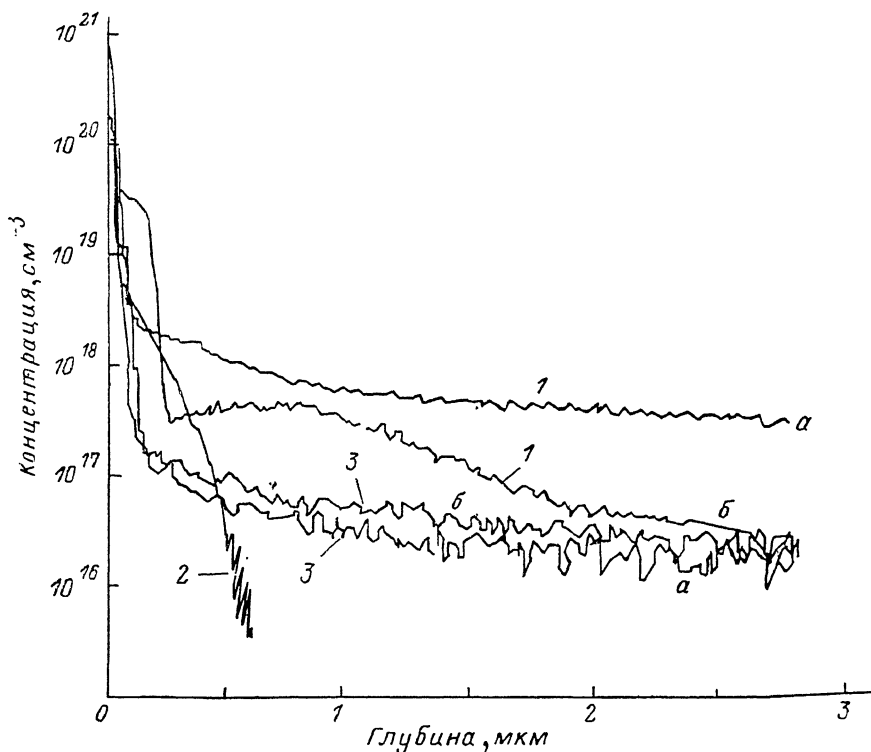
Для исследований были использованы полученные методом эпитаксии из жидкой фазы структуры n^+-p и p^+-p , в которых толщины эпитаксиальных слоев составляли ~7 мкм. n^+ -Слой был легирован фосфором (концентрация электронов $\sim 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³), p^+ -слой был легирован бором (концентрация дырок $\sim 1.5 \cdot 10^{18}$ см⁻³), *p*-подложка, легированная бором, содержала $1.3 \cdot 10^{15}$ см⁻³ дырок.

Введение атомарного дейтерия в образцы Si осуществлялось из микроволнового разряда (источник подробно описан в [9]). Температура гидрогенизации составляла 150 или 480 °С при времени обработки 15 мин. Дейтерий использовался вместо водорода для повышения чувствительности измерения профиля концентрации водорода в методе масс-спектрометрии вторичных ионов (МСВИ) [2]. Эти измерения проводились на ионном микроанализаторе IMS-3F, для распыления использовались ионы Cs⁺, ускоряющее напряжение составляло 10 кВ, ток ионного пучка (3-4) · 10⁻⁹ А. Абсолютная градуировка по концентрации проводилась с помощью измерения профиля дейтерия в имплантированных дейтерием образцах. Градуировка по глубине делалась с помощью определения профиломером глубины кратера, вытравленного в образце распыляющим ионным пучком. Подробнее методика описана в [10].

На рисунке показаны профили (кривые 1, а, б) распределения дейтерия в эпитаксиальных p^+ - и n^+ -слоях после обработки при 150 °С. Здесь же для сравнения приведен профиль распределения дейтерия в легированном фосфором образце кремния (профиль воспроизведен по данным работы [2], концентрация фосфора в образце составляла 10¹⁷ см⁻³, гидрогенизация проводилась при 150 °С). Как хорошо видно, глубина проникновения дейтерия в толстую эпитаксиальную пленку значительно больше, чем в имплантированный фосфором слой. Если сравнивать между собой образцы *n*- и *p*-типа, то в n^+ -пленке глубина проникновения заметно меньше, чем в p^+ . Однако отметим, что и в *n*-образце, как и в образце, легированном бором, наблюдается плато в концентрации дейтерия, связанное, по всей видимости, с образованием комплексов водорода с донорами [4]. Как и следовало ожидать, концентрация на этом плато ниже, чем в случае *p*-Si (см. рисунок), что отражает более низкую эффективность пассивации доноров по сравнению с акцепторами в кремнии [4].

Интересным представляется результат обработки в дейтерии при 480 °С (см. рисунок, кривые 3, а, б). Эта температура значительно выше температуры развала комплексов водорода с акцепторами и донорами в кремнии [1]. Мы видим, что никаких плато в диффузионных профилях нет, профили для *n*- и *p*-Si практически одинаковы, а концентрация дейтерия значительно ниже концентраций бора и фосфора. По-видимому, в этой области температур диффузия претерпевает над комплексообразованием, хотя результат, вероятно, будет зависеть от условий введения водорода и условий охлаждения.

Таким образом, наши результаты в общем подтверждают более высокую скорость диффузии водорода в p -Si по сравнению с n -Si. Однако различие в скоростях диффузии не так велико, как в случае ионно-имплантированных n -слоев,



Профили распределения дейтерия в образцах Si : D.

Образцы, гидрогенизированные при T , °C: 1, 2 — 150, 3 — 480; а и б соответствуют материалам p - и n -типа проводимости. Профиль 2 воспроизведен по данным работы [2].

а характер диффузионных профилей такой же, как в материале p -типа. Следовательно, явления, описанные авторами [3], в значительной мере связаны с захватом водорода на границе имплантированного слоя.

В заключение авторы хотели бы поблагодарить К. С. Головановского, А. А. Балмашнова, Э. Кампса и А. М. Левченко за проведение гидрогенизации наших образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Pearton S. J., Corbett J. W., Shi T. S. // Appl. Phys. A. 1987. V. 43. N 2. P. 153—195.
- [2] Johnson N. M., Moyer M. D. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 8. P. 787—789.
- [3] Johnson N. M. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. P. 5525—5528.
- [4] Johnson N. M., Herring C., Chadi D. J. // The Physics of Semiconductors / Ed. by O. Engstrom. Singapore, 1987. V. 2. P. 991—994.
- [5] Mogro-Campero A., Love R. P., Schubert R. // J. Electrochem. Soc. 1985. V. 132. N 8. P. 2007—2009.
- [6] Mikkelsen J. C., Jr. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 9. P. 882—884.
- [7] Pantelides S. T. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 15. P. 995—997.
- [8] Capizzi M., Mittiga A. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 14. P. 918—920.
- [9] Балмашнов А. А., Головановский К. С., Кампс Э. К., Омеляновский Э. М., Пахов А. В., Поляков А. Я. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 24. С. 1486—1489.
- [10] Бородина О. М., Гиммельфарб Ф. А., Орлов П. Б., Ухорская Т. А. // ЖАХ. 1986. № 12. С. 2164—2174.