

ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ВОДОРОДОМ

А.В.Мудрый¹⁾, А.И.Патук¹⁾, И.А.Шакин¹⁾, Т.П.Ларионова¹⁾, В.В.Емцев²⁾, В.Ю.Давыдов²⁾,
Г.Оганесян²⁾, А.Г.Ульяшин³⁾, Р.Джоб³⁾, В.Р.Фарнер³⁾

¹⁾ Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси,
220072, г. Минск, ул. П. Бровки 17, тел. 284-12-29

²⁾ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, тел. (812) 247-99-11

³⁾ Хагенский университет, Германия, D-58084, г. Хаген, ул. Халденер 182

С использованием низкотемпературной (4.2 К) фотолюминесценции проведена идентификация дефектов в кремнии, имплантированном водородом. Установлено, что внедренные атомы водорода входят в состав основных оптически активных центров. В интервале температур 25-1100 °С определена термическая стабильность дефектов.

Введение

Водород является одной из важных технологических примесей в кремнии, влияющей практически на все физические свойства [1,2]. Хотя на настоящий момент уже накоплен значительный экспериментальный материал по поведению ионно-внедренного водорода в кремнии, однако многие важные детали взаимодействия водорода с дефектами остаются невыясненными [2]. В настоящей работе проведено дальнейшее изучение процессов образования дефектов различной природы (точечные, протяженные, поры) в кремнии, имплантированном ионами водорода.

I. Методика эксперимента

Объектом исследования являлся монокристаллический кремний n- и p-типа проводимости, легированный фосфором и бором соответственно, с удельным сопротивлением 5 – 25 Ом·см, выращенный методом Чохральского. Имплантация ионов H⁺ проводилась в интервале доз 5·10¹⁴ – 3·10¹⁶ см⁻² и энергий 40 – 80 кэВ, что соответствует пробегу < 0.4 мкм. Изохронный отжиг имплантированных кристаллов Si осуществлялся в вакууме в течение 20 минут с шагом 50 ° в интервале температур 25 – 1100 °С. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались при температуре 4.2 К по методике, описанной в [3,4].

II. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве примера на рис.1 приведены типичные спектры ФЛ, характерные для Si p-типа (КДБ-12.5), имплантированного ионами H⁺ с энергией 60 кэВ и дозой 10¹⁶ см⁻², зарегистрированные на различных стадиях изохронного отжига. Как видно из рис.1, в области края фундаментального поглощения (E > 1.02 эВ) для спектров ФЛ Si p-типа характерно наличие узких линий, связанных с излучательной аннигиляцией свободных и связанных на атомах основной легирующей примеси (бор) экситонов [5]. Наряду с узкими линиями в примесной

области спектра (E < 1.02 эВ) непосредственно после имплантации наблюдаются три широкие полосы с максимумами H1 ~ 1.029, H2 ~ 0.972 и H3 ~ 0.933 эВ, связанные с дефектами, включающими в свой состав ионно-внедренные атомы водорода. Такая связь полос с водородом основывается на том факте, что нам не удалось обнаружить их в случае имплантации других ионов (гелия, азота и т.д.) при аналогичных режимах имплантации. Ранее была установлена связь полос H1 – H3 с <111> ориентированными пластинками, содержащими водород [6]. Как видно из рис.1, отжиг ионно-легированных кристаллов приводит к значительному изменению спектров ФЛ. Так, на стадиях отжига 25-200 °С происходит сильное увеличение (~ в 10 раз) интенсивности узкой бесфононной линии W ~ 1.0186 эВ, а при 400-500 °С на фоне широкой полосы проявляется другая бесфононная линия X ~ 1.0399 эВ. В соответствии с ранее выполненными исследованиями по имплантации в Si других типов ионов предполагается, что W-центры представляют собой <111> ориентированные дефекты с тригональной симметрией, включающие собственные междоузельные атомы Si и, возможно, атомы водорода, а X-центры – вакансионные комплексы [4,7]. На стадиях отжига 500-600 °С в ионно-легированных слоях начинает формироваться дислокационная структура, ответственная за появление полос D1 ~ 0.809, D2 ~ 0.874, D3 ~ 0.932 и D4 ~ 0.996 эВ [8]. На этой же стадии отжига (рис.1) проявляется новая полоса ФЛ M' ~ 1.012 эВ (головная линия) с ее TO-фононным повторением M'_{TO} ~ 0.954 эВ. Наиболее наглядно форма этих полос показана на рис.2. Как видно из рис.1, на высокотемпературных стадиях отжига в спектрах ФЛ доминируют дислокационные полосы. Эксперименты по влиянию режимов ионного легирования показали, что с увеличением дозы от 5·10¹⁴ до 3·10¹⁶ см⁻² и энергии ионов от 40 до 80 кэВ происходит лишь увеличение интенсивности всех узких линий и широких полос, а основные закономерности видоизменения формы спектров при отжиге, отражающие кинетику перестройки оптически активных центров, сохраняются. Различие для

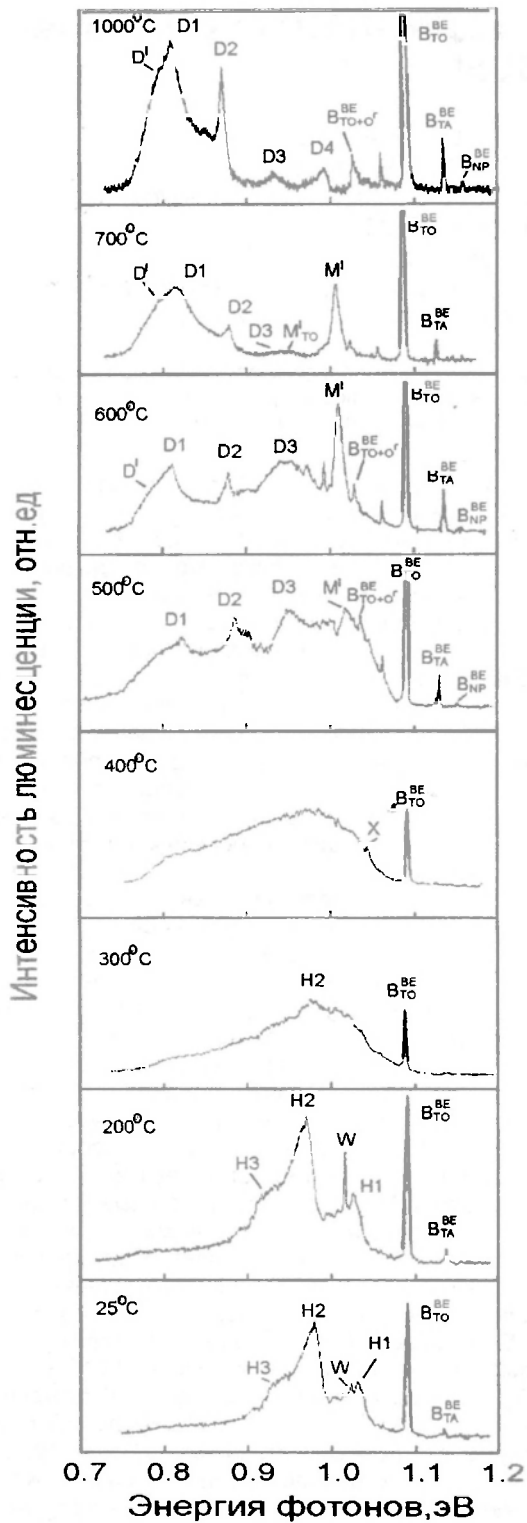


Рис. 1. Спектры ФЛ (4.2 К) Si p-типа (КДБ-12.5), имплантированного ионами H⁺ с энергией 60 кэВ дозой ~ 10¹⁵ см⁻², для различных температур отжига.

разных материалов проявлялось в том, что на высокотемпературных стадиях отжига 600–1000 °С по-разному проявлялись

дислокационные полосы. Так, в некоторых случаях в области 0.8 эВ видна была более широкая полоса D'. На фоне которой можно выделить максимум D1, относящийся к дислокационному излучению, рис.1. Это отчетливо видно также из рис.2, где проявляются только полосы M' (M'_{TO}) и D' – 0.79 эВ. Сравнительный анализ формы спектров ФЛ для разных образцов позволяет отнести полосу D' – 0.79 эВ к излучательной рекомбинации на дефектах несколько иного типа, чем дислокации, ответственные за полосу D1. На рис.3 приведена зависимость интенсивности полос M' и D' от температуры отжига, отражающая термическую устойчивость соответствующих центров люминесценции. Полоса D' в области 0.8 эВ обнаружена нами в спектрах ФЛ Si, имплантированного H⁺ и He⁺, при отжиге кристаллов ~ 1000°C [9]. Она наблюдалась также после имплантации H⁺ и O⁺ и последующего высокотемпературного отжига при высоких

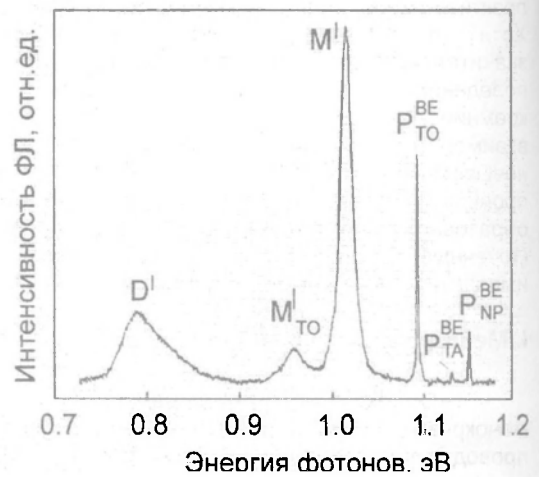


Рис. 2. Спектр ФЛ (4.2 К) Si n-типа (КЭФ-10), имплантированного ионами H⁺ с энергией 80 кэВ дозой 10¹⁵ см⁻² на стадии отжига 700 °С.

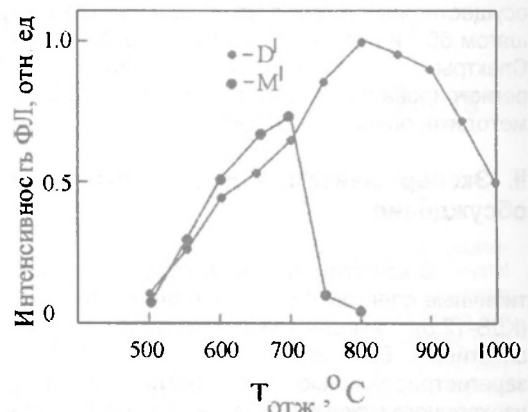


Рис. 3. Зависимость интенсивности полос D' и M' от температуры отжига.

давлениях [10], в поликристаллическом кремнии [11], в Si-Ge структурах с квантовыми точками [12]. Учитывая то, что полоса D^1 проявляется в структурах, где существуют напряжения, логично связать ее с дефектами, включающими собственные междоузельные атомы Si, или с дислокациями, модифицированными атомами углерода как изoelektronной остаточной технологической примесью в Si. Определенные предположения можно сделать и о природе взаимосвязанной пары полос M^1 и M^1_{TO} . Ранее в пластически деформированном кремнии была обнаружена близкая по энергии к M^1 полоса $D_6 \sim 1.0126$ эВ, исчезающая из спектров ФЛ при отжиге в течение 1 часа при $T = 390$ °C и приписанная дефектам упаковки [8]. В нашем случае природа дефектов, ответственных за полосу M^1 , по-видимому, несколько иная, чем D_6 из-за несовпадения режимов термического отжига. По нашему мнению наиболее вероятно, что на стадиях отжига 500-700 °C в ионно-легированном Si происходит формирование скопления атомов водорода в виде наноразмерных газовых пузырей, что и сопровождается ростом интенсивности M^1 полосы. По-видимому в области формирования наноразмерных газовых пузырей с водородом в решетке Si создаются значительные внутренние напряжения, являющиеся источником формирования дефектов, ответственных за M^1 полосу. Важно отметить, что близкая по форме и энергетическому положению пара линий WL (NP) и WL (TO) обнаружена в структурах Si-Si/Ge или Si-Ge структурах с квантовыми точками, где также из-за несоответствия постоянных решеток и других факторов возможно образование значительных напряжений на границах гетерораздела [12]. Если считать такую интерпретацию справедливой, то в дальнейшем полоса M^1 может быть использована как индикатор стадии формирования водородосодержащих газовых пузырей в ионно-легированных слоях кремния, являющихся источниками развития сплошного пористого слоя, что важно для создания структур кремний-на-

изоляторе и дальнейшего развития «Smart Si» технологии [2].

Заключение

Проведенные эксперименты показа активную роль внедренного водорода как образовании точечных дефектов, так и объемн – $\langle 111 \rangle$ ориентированных пластинок водород дислокаций, наноразмерных газовых пузырей.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фон фундаментальных исследований (проект Ф(132)).

Список литературы

1. *Pearson S.J., Corbett J.W., Stavola M.* Hydrogen Crystalline Semiconductors. – Springer-Verlag, Ber 1992. – 363 p.
2. *Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н.* // Ф – 2000. – Т.34. – С.129.
3. *Tkachev V.D., Mudryi A.V., Minaev N.S.* // Phys. S Sol. (a). – 1984. – V.81. – P.313.
4. *Tkachev V.D., Mudryi A.V.* // Radiation Effects Semiconductors, ed. by N.B.Urli and J.W.Corbett, I Conference Proceedings, N 31. – Institute of Phys London. – 1977. – P.231.
5. *Dean P.J., Haynes J.R., Flood W.F.* // Phys. Rev. E 1967. – V.B161. –P.161.
6. *Johnson N.M., Ponce F.A., Street R.A., Nemanich I* // Phys. Rev. B. – 1987. – V.35. – P.4166.
7. *Mudryi A.V., Patuk A.I., Shakin I.A., Korshunov F Zuev V.A.* // Mater. Chem. and Phys. – 1996. – V.4: P.185.
8. *Sauer R., Weber J., Stolz J., Weber E.R., Kusi K.H., Alexander H.* // Appl. Phys. A. – 1985. – V.A3: P.1.
9. *Ulyashin A.G., Job R., Fahrner W.R., Mudryi A Patuk A.I., Shakin I.A.* // Mat. Sci. Semicond. Proce – 2000. – V.4. – P.297.
10. *Misiuk A., Surma H.B., Antonova I.V., Popov V Bak-Misiuk J., Lopez M., Romano-Rodriguez A., Bi A., Jun J.* // Solid State Phenomena. – 1999. – V 70. – P.345.
11. *Koshka Y., Ostapenko S., Tarasov I., McHago Kalejs J.P.* // Appl. Phys. Lett. – 1999. – V.74 P.1555.
12. *Schmidt O.G., Denker U., Eberl K., Kienle O., Ems* // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V.77. – P.2509.

THE STRUCTURAL DEFECTS IN SILICON IMPLANTED BY HYDROGEN

A.V.Mudryi¹⁾, A.I.Patuk¹⁾, I.A.Shakin¹⁾, T.P.Larionova¹⁾, V.V.Emtsev²⁾, V.Yu.Davydov²⁾, G.Oganesyan²⁾, A.G.Ulyashin³⁾, R.Job³⁾, W.R.Fahrner³⁾

¹⁾*Institute of Solid State Physics and Semiconductors, National Academy of Sciences of Belarus, P.Brovka str. 17, 220072 Minsk, Belarus*

²⁾*A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Polytekhnicheskaya str. 26, 194021 St.-Petersburg, Russia*

³⁾*University of Hagen, Department of Electrical Engineering, P.O.Box 940, D – 58084, Hagen, Germany*

The defects created by hydrogen implantation ($40 - 80$ keV, $5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ cm^{-2}) into silicon are studied by temperature (4.2K) photoluminescence (PL) spectroscopy. After high-temperature heat treatments the PL method indicates rather strong bands at about 1.012 eV and 0.8 eV. The kinetics of the formation of the main optical active defects have been studied. It is confirmed that incorporated hydrogen takes an active part in the formation of the structure of some luminescence centers. The possible nature of the main luminescence centers are discussed in this work.