

СТРУКТУРНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЖДОУЗЕЛЬНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

*В. В. Мельников**

*Томский государственный университет
634050, Томск, Россия*

Поступила в редакцию 27 октября 2014 г.

Представлены результаты теоретического исследования структурных и энергетических характеристик междуузельного молекулярного водорода в монокристаллическом кремнии. Исследована зависимость потенциальной энергии системы от положения и ориентации дефекта внедрения, рассмотрен механизм взаимодействия молекулы с кристаллом. В рамках трехмерной модели рассчитан энергетический спектр H_2 в Si, проведен анализ полученного закона дисперсии.

DOI: 10.7868/S0044451015060105

1. ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллический кремний является одним из базовых материалов для разработки и производства полупроводниковых устройств и элементов. Междуузельный водород оказывает значительное влияние на физические и химические свойства материала [1], что, в свою очередь, существенно для многих технологических процессов. Важным аспектом ряда технологий, например “Smart Cut” [2], является контроль диффузии и распределения водорода в объеме полупроводника. Для дальнейшей миниатюризации полупроводниковых элементов в нанометровом масштабе, для развития и оптимизации существующих технологий, повышения контролируемости и управляемости характеристик полупроводниковых элементов, моделирования техпроцессов и свойств материалов актуально детальное исследование эффектов присутствия водорода в кремнии и других полупроводниках.

Анализ доступных результатов экспериментальных и теоретических исследований системы H_2 -Si (см., например, работы [1–20] и ссылки, приведенные в них) позволяет сделать следующие заключения. В структуру полупроводника атомарный водород проникает практически на всех стадиях технологических процессов. Из части внедренных атомов

формируется молекулярный водород [3–6]. Молекула H_2 достаточно сильно взаимодействует с матрицей кремния, что ведет к заметному увеличению длины связи H–H и уменьшению колебательных частот [7–11]. Однако, наряду с этим, H_2 проявляет свойства свободного волчка, т. е. вращательные степени свободы не «заморожены», и интерпретацию спектров дефекта внедрения удается выполнить с использованием модели свободной молекулы [12–19]. В равновесной конфигурации центр масс H_2 находится в тетраэдрической позиции (T -позиции) кристаллической решетки Si, молекула ориентирована вдоль направлений эквивалентных [100] с вращательным потенциальным барьером порядка 0.01 эВ [13, 19]. Согласно результатам работы [20], в которой рассматривается кинетика комплексов O–H в кристаллическом кремнии, энергия активации диффузии молекулярного водорода приблизительно равна 0.78 эВ.

В данной работе представлены результаты исследования структурных и энергетических характеристик междуузельного молекулярного водорода в монокристаллическом кремнии на основе обширных *ab initio* расчетов рассматриваемой системы. Проведен анализ энергии системы в зависимости от положения дефекта внедрения, рассчитан путь с минимальной энергией (ПМЭ) между положениями равновесия водорода в кристалле с учетом вращательных степеней свободы молекулы, проведена оценка отклика кремниевой матрицы на присутствие H_2 ,

*E-mail: melnikov@phys.tsu.ru

рассмотрен механизм взаимодействия молекулы с кристаллом. С учетом того факта, что водород, будучи самой легкой молекулой, находится в периодическом потенциале кристаллического кремния, были проведены расчеты энергетического спектра H_2 в 3D-потенциале кремниевой матрицы.

2. МЕТОД РАСЧЕТА

Расчеты атомной и электронной структур системы H_2 -Si проводились с использованием теории функционала плотности с обменно-корреляционным функционалом PW91 [21] в обобщенном градиентном приближении [22, 23], реализованных в пакете программ CRYSTAL09 [24].

Система рассматривалась в рамках модели кубической суперячейки с периодическими граничными условиями. Размер ячейки подбирался таким образом, чтобы исключить взаимодействие молекулы водорода со своими образами. В расчетах использовались суперячейки, состоящие из 4 и 32 примитивных ячеек кристаллического кремния, т. е. структуры, включающие соответственно по 8 и 64 атомов кремния. В основном массивные вычисления проводились с использованием ячейки меньшего размера, однако для контроля полученных результатов и исследования критических случаев расчеты для отобранных конфигураций атомов повторялись с использованием увеличенной структуры.

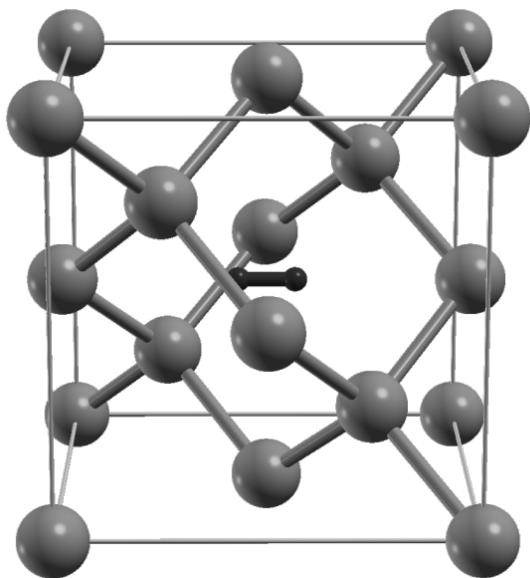


Рис. 1. Расчетная суперячейка с молекулой водорода в T-позиции

Модельная суперячейка меньшего размера схематично представлена на рис. 1. При расчете потенциальной энергии молекулы водорода в монокристалле кремния атомы Si были зафиксированы в положениях равновесия для идеального кристалла. Анализ энергии системы был проведен для большого числа возможных положений H_2 в рассматриваемой ячейке. Расчеты *ab initio* проводились с использованием $8 \times 8 \times 8$ -сетки k -точек для малой ячейки и $4 \times 4 \times 4$ -сетки для большой. В результате анализа воспроизводимых структуры и характеристик моделируемой системы при решении электронной задачи для атомов кремния был выбран оптимизированный набор базисных функций из работы [25], а для атомов водорода — базисный DZP-набор Данинга [26]. Вследствие использования локализованных базисных функций, в расчетах всегда выполнялась корректировка ошибки наложения базисных функций.

Расчетный параметр кристаллической решетки кремния ($a = 5.47 \text{ \AA}$) отличается от экспериментального ($a = 5.43 \text{ \AA}$) не более чем на 0.7%. Полученная длина связи H_2 составила 0.7487 \AA (немного больше экспериментального значения 0.7414 \AA [27]) для свободной молекулы и 0.7810 \AA для водорода в кристалле кремния. Последнее значение было использовано в *ab initio* расчетах энергии системы для различных положений молекулы водорода в монокристалле.

Полученные *ab initio* значения энергии E системы, в соответствии с адиабатическим приближением, были использованы в качестве потенциальной энергии молекулы водорода в монокристалле кремния, $V(x, y, z, \theta, \varphi)$, где θ и φ — сферические координаты с началом в центре масс молекулы, x, y, z — координаты центра масс молекулы H_2 в ячейке кристалла. Прямоугольная система координат выбрана таким образом, чтобы направления ее базисных векторов совпадали с направлениями векторов расчетной ячейки. Ориентации молекулы вдоль оси z соответствует нулевое значение угла θ . Например, на рис. 1 центр масс молекулы H_2 находится в точке $(1/2, 1/2, 1/2)$, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0$.

При расчете энергетических состояний H_2 в Si учитывались только трансляционные степени свободы. Трехмерный периодический потенциал взаимодействия молекулы с кристаллом был представлен массивом полученных *ab initio* значений энергии системы для различных положений H_2 в ячейке, усредненных по угловым переменным.

Соответствующее стационарное уравнение Шредингера с периодическими граничными условиями было решено численно в рамках вариационно-

го подхода. Блоховские волновые функции были представлены в виде разложения по плоским волнам, матричные элементы гамильтониана системы вычислялись с использованием дискретного преобразования Фурье. Энергетические уровни дефекта внедрения, $\varepsilon(\mathbf{k})$, были рассчитаны для различных значений волнового вектора \mathbf{k} , лежащих на отрезках $L-\Gamma-X/X'-K-\Gamma$. В данном случае в качестве элемента периодической структуры использовалась примитивная ячейка кремния. Размер равномерно распределенной вычислительной сетки составил $54 \times 54 \times 54$ точек, порог для кинетической энергии плоских волн был равен 16000 см^{-1} , что позволило обеспечить хорошую сходимость собственных значений в рассмотренных диапазонах энергетического спектра. Алгоритм решения был реализован в виде FORTRAN-программы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

График усредненной по вращательным переменным потенциальной энергии взаимодействия молекулы водорода с кристаллическим кремнием в плоскости $(\bar{1}10)$ приведен на рис. 2. Минимумы в точках $(1/2, 1/2, 1/2)$ и $(1/4, 1/4, 3/4)$ соответствуют равновесным положениям молекулы в матрице — две соседние T -позиции. Величина потенциального барьера

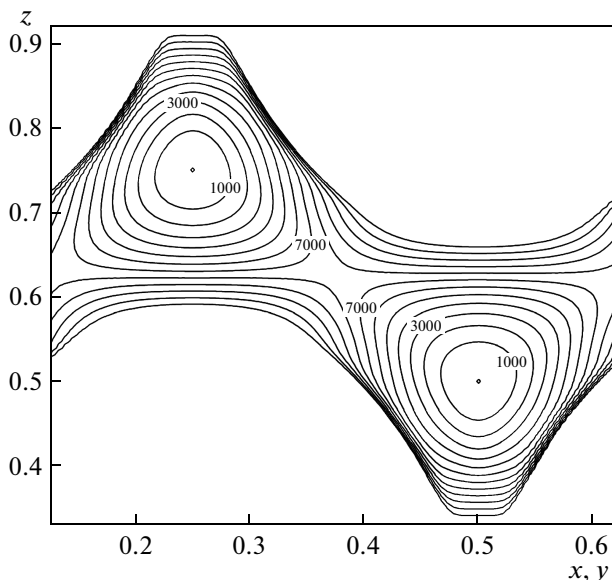


Рис. 2. Потенциальная энергия взаимодействия молекулы водорода с кристаллическим кремнием в плоскости $(\bar{1}10)$. Изоэнергетические линии отображены с шагом 1000 см^{-1}

ра между данными минимумами — седловая точка с координатами $(3/8, 3/8, 5/8)$ — примерно равна 1 эВ . Шаг для отображенных изоэнергетических линий составляет 1000 см^{-1} , максимально удаленные от минимумов изолинии соответствуют энергии 12000 см^{-1} . Рассчитанные энергии, которые превышали последнюю, при построении графика не использовались по причине больших значений градиента потенциала.

С целью оценки влияния междоузельного молекулярного водорода на внутреннюю геометрию кристалла и соответствующей энергии системы была проведена оптимизация структуры Si при фиксированном положении молекулы H_2 , расположенной в равновесном положении, в седловой точке с ориентацией молекулы, соответствующей минимальному, $\min E_{sp}$, и максимальному, $\max E_{sp}$, значениям энергии системы, а также вдоль ПМЭ. Отклик структуры на внедрение молекулы проиллюстрирован в таблице. Расчеты показали, что для T -позиции энергия системы E_{eq} уменьшается примерно на 145 см^{-1} в результате перестройки ближайшего окружения H_2 , при этом четыре соседних атома Si смещаются в направлении от молекулы на расстояние около 0.2 \AA . В седловой точке, где расстояние от H_2 до ближайших атомов кремния уменьшается, структура кристалла претерпевает более заметные изменения. Однако максимальное значение вращательного барьера в данном положении, т. е. $\max E_{sp} - \min E_{sp}$, при структурной оптимизации меняется незначительно и остается величиной порядка 10^3 см^{-1} .

На рис. 3 представлен ПМЭ молекулы водорода при переходе между соседними положениями равновесия. Здесь и далее для определенности будут рассматриваться T -позиции с координатами $(1/2, 1/2, 1/2)$ и $(3/4, 3/4, 3/4)$ с седловой точкой $(5/8, 5/8, 5/8)$. В соответствии со структурой и симметрией системы возможные ПМЭ лежат в плоскостях $\{110\}$. Видно, что разница между потенциальными энергиями системы вдоль ПМЭ, полученными без учета и с учетом релаксации атомов кремния, изменяется в диапазоне $10^2-10^3 \text{ см}^{-1}$ и монотонно возрастает при приближении к седловой точке V_{sp} . Максимальное значение вращательного барьера возрастает при перемещении молекулы из точки V_{eq} в точку V_2 , в окрестности которой достигает экстремального значения примерно 1600 см^{-1} . Далее, на участке V_2-V_5 , разница между $\max E$ и $\min E$ уменьшается до величины примерно 800 см^{-1} . В области точки перехода V_{sp} наблюдается увеличение энергии системы приблизительно на 100 см^{-1} . Среднее значение разницы $\max E - \min E$, рассчитанное вдоль всего

Таблица. Значения энергии и структурные характеристики для равновесного и переходного положений молекулы водорода в кристалле кремния

	θ	φ	Значение для фиксированной структуры, см^{-1}	Изменение величины при релаксации, см^{-1}	Среднее смещение ближайших атомов Si, Å
E_{eq}	90°	0	0	-145	0.02
$\min E_{sp}$	129.1°	45°	7961	-881	0.04
$\max E_{sp}$	54.7°	45°	8947	-916	0.04

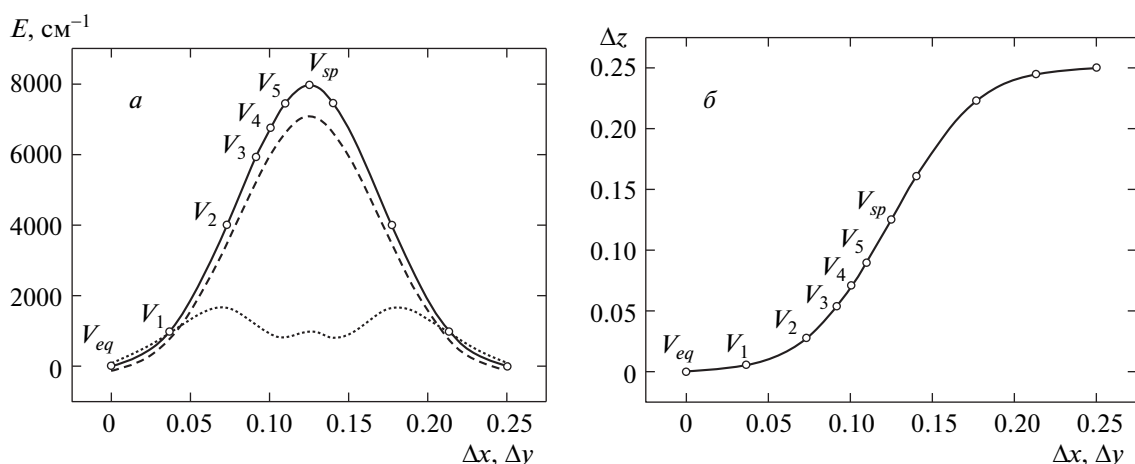


Рис. 3. Путь минимальной энергии молекулы H_2 при переходе между соседними положениями равновесия в кристалле кремния: *a* — потенциальный барьер для фиксированной структуры Si (сплошная кривая) и после структурной оптимизации (штриховая линия), точечная кривая соответствует разнице значений $\max E$ и $\min E$ в точке со смещением $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ относительно равновесного положения; *б* — соответствующая траектория движения молекулы

пути, составляет около 900 см^{-1} . Необходимо отметить, что при усреднении потенциальной энергии системы по вращательным переменным, ПМЭ вырождается в совпадающую с диагональю $[111]$ прямую.

Изменение потенциальной энергии системы в зависимости от ориентации молекулы вдоль ПМЭ проиллюстрировано на рис. 4. Величина радиус-вектора точки на приведенных поверхностях равна $V(x, y, z, \theta, \varphi)$ за вычетом минимального значения энергии для соответствующего фиксированного положения центра масс молекулы H_2 на ПМЭ (см. рис. 3). С классической точки зрения, такая угловая зависимость энергии может быть проинтерпретирована возникновением выделенной оси вращения молекулы водорода, причем, на участке ПМЭ V_1-V_3 классическая ось вращения

ориентирована преимущественно вдоль направления $[11\bar{1}]$ (рис. 4б,в). Приблизительно на участке V_3-V_5 происходит смена ориентации предполагаемой оси вращения (рис. 4в-д), и на участке V_3-V_{sp} ось ориентирована уже вдоль направления $[111]$ (рис. 4д,е). Интересным фактом является то, что в точке перехода V_{sp} положению молекулы вдоль направления $[111]$ соответствует максимальное значение энергии системы. Таким образом, при прохождении потенциального барьера молекуле предпочтительно ориентироваться параллельно плоскости (111) , что не является очевидным следствием свойств геометрии структуры и становится понятным только при рассмотрении взаимодействия H_2 с Si на микроуровне.

Анализ механизма взаимодействия молекулы с кристаллом был проведен на основе рассчитанных

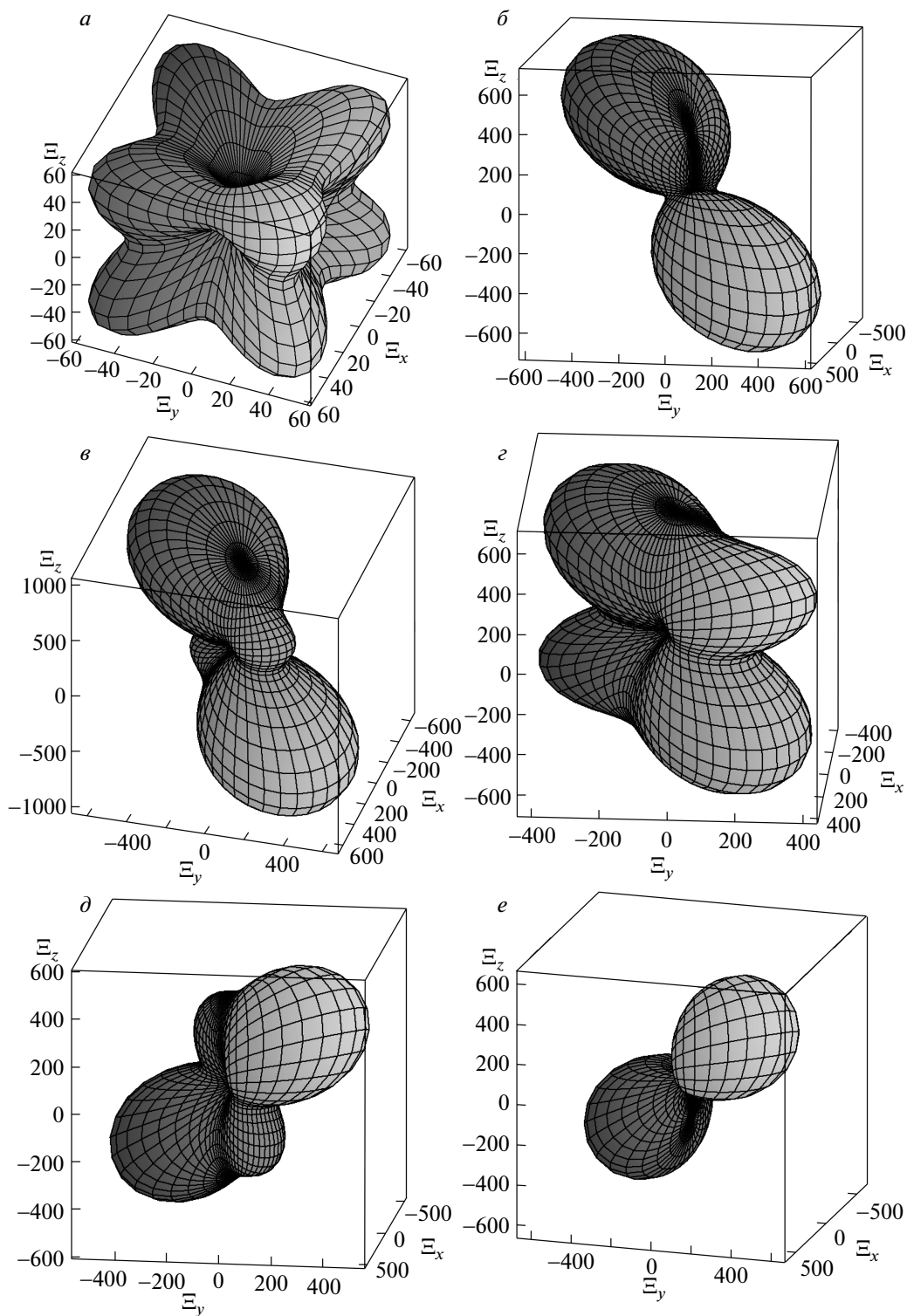


Рис. 4. Зависимости потенциальной энергии системы (в см^{-1}) от ориентации молекулы водорода. Направление радиус-вектора точки, Ξ , на приведенных поверхностях определяется углами θ и φ , а его величина равна значениям $E - \min E$, соответствующим различным положениям центра масс молекулы H_2 на ПМЭ (см. рис. 3): а — равновесное положение, V_{eq} ; б — V_1 ; в — V_3 ; г — V_4 ; д — V_5 ; е — седловая точка, V_{sp}

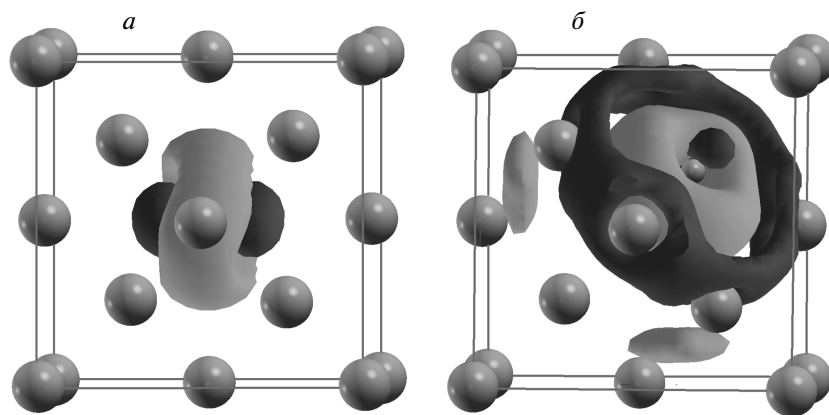


Рис. 5. Распределение разницы зарядовой плотности $\Delta\rho$: *a* — молекула водорода находится в *T*-позиции; *b* — H_2 расположена в седловой точке V_{sp} с ориентацией связи вдоль направления $[111]$. Областям светлого и темного цвета соответствуют положительные и отрицательные значения $\Delta\rho$

ab initio значений пространственного распределения разности зарядовой плотности $\Delta\rho(\mathbf{r})$,

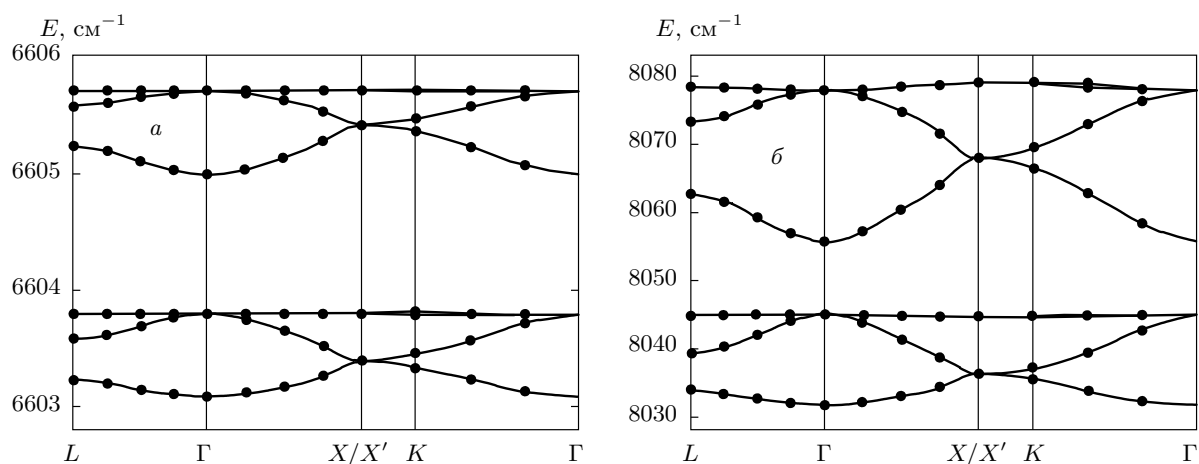
$$\Delta\rho(\mathbf{r}) = \rho_{\text{H}_2}(\mathbf{r}) + \rho_{\text{Si}}(\mathbf{r}) - \rho_{\text{H}_2/\text{Si}}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где ρ_{H_2} и ρ_{Si} — зарядовые плотности соответственно изолированной молекулы и кристалла, $\rho_{\text{H}_2/\text{Si}}$ — полная зарядовая плотность системы $\text{H}_2\text{-Si}$. Наличие областей с отрицательными/положительными значениями $\Delta\rho(\mathbf{r})$ указывает на увеличение/уменьшение электронной плотности в объеме кристалла при внедрении молекулы. В качестве примера на рис. 5 приведены распределения $\Delta\rho(\mathbf{r})$ для двух положений молекулы водорода: в *T*-позиции и в седловой точке с ориентацией связи вдоль направления $[111]$. Приведенные на графиках изоповерхности являются границами областей, в которых происходит основное перераспределение электронной плотности.

В случае равновесного положения молекулы H_2 (рис. 5*a*), перераспределение заряда в результате взаимодействия с атомами Si локализовано преимущественно в окрестности объекта внедрения. При этом вблизи атомов водорода электронная плотность увеличивается, а вокруг оси молекулы возникает область тороидальной формы с положительными значениями $\Delta\rho$. Такое перераспределение заряда свидетельствует о существенной роли ионного и поляризационного взаимодействий. Распределения $\Delta\rho$ со схожей топологией и локализацией наблюдаются также при смещении молекулы из *T*-позиции в пределах 0.3 \AA . Для смещений большей величины, при сопутствующем сокращении дистанции между H_2 и частью ближайших атомов Si, наблюдается менее локализованная перестройка электронной структуры.

При продвижении вдоль ПМЭ максимальная вовлеченность кристаллического кремния в формирование межатомных связей наблюдается в точке перехода V_{sp} с ориентацией молекулы водорода вдоль направления $[111]$ (рис. 5*b*), т. е. для положения, соответствующего максимальному значению энергии системы $\max E_{sp}$. Здесь, наряду с отрицательными областями $\Delta\rho$ вблизи атомов водорода и положительной областью тороидальной формы, возникает «гексагональный пояс» отрицательных значений $\Delta\rho$, проходящий через шесть ближайших атомов кремния. Можно допустить, что наличие такой замкнутой области с повышенной плотностью носителей заряда, при определенных обстоятельствах, приведет к возникновению объединенных квазисвязанных электронных состояний с ненулевым моментом количества движения или, с классической точки зрения, к появлению кольцевых микротоков. Однако, принимая во внимание динамику и энергетику происходящих в кристалле процессов, разумно предположить, что вероятность возникновения таких состояний должна оставаться чрезвычайно малой.

Особенности зонной структуры энергетических уровней молекулы водорода в кристалле кремния, выявленные при рассмотрении двумерной модели системы [28], в значительной степени проявляются в спектре H_2 , рассчитанном для случая трехмерного потенциала. В соответствии с симметрией системы, низколежащие энергетические уровни вырождены, при этом добавочное двукратное вырождение для фиксированных значений волнового вектора \mathbf{k} возникает вследствие наличия двух эквивалентных положений равновесия молекулы H_2 в элемен-

Рис. 6. Зонная структура энергетических уровней H_2 в кристалле Si

тарной ячейке кремния. С увеличением энергии вероятность туннельного перехода молекулы между T -позициями возрастает и происходит формирование зонной структуры.

Согласно результатам проведенных расчетов, слабое расщепление энергетических уровней H_2 , приводящее к возникновению зоны шириной $\Delta \approx 0.1 \text{ см}^{-1}$, появляется для энергий примерно 6000 см^{-1} (здесь и далее все значения энергии приводятся относительно основного состояния $E_0 \approx 1102.2 \text{ см}^{-1}$). Последнее значение примерно на 35 см^{-1} превышает аналогичную величину, полученную для двумерной модели. Зоны с $\Delta \approx 0.6 \text{ см}^{-1}$ формируются в диапазоне $6603\text{--}6606 \text{ см}^{-1}$ (рис. 6а). Зоны шириной около 7 см^{-1} наблюдаются для энергий в окрестности 7600 см^{-1} и 7970 см^{-1} . На рис. 6б приведена структура энергетических уровней в диапазоне $8030\text{--}8080 \text{ см}^{-1}$, где для двух зон имеем $\Delta \approx 12 \text{ см}^{-1}$ и $\Delta \approx 19 \text{ см}^{-1}$. Следует отметить, что законы дисперсии $\varepsilon(\mathbf{k})$ на отрезке $X'\text{--}K\text{--}\Gamma$, полученные в данной работе и в работе [28], качественно схожи.

Анализ зависимости групповой скорости молекулы от направления волнового вектора показал, что максимальная групповая скорость соответствует направлениям, эквивалентным $[100]$, минимальная — $[111]$. Данный результат согласуется с фактом возникновения водородсодержащих планарных дефектов (platelets) [1], которые формируются преимущественно в плоскостях $\{111\}$. Считается, что главную роль в образовании таких дефектов играет вакансионный механизм, однако даже в рамках модели идеального кристалла данная ориентация остается предпочтительной.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнены *ab initio* расчеты атомной и электронной структур междуузельного молекулярного водорода в монокристаллическом кремнии. Проведен анализ зависимости потенциальной энергии системы от положения и ориентации дефекта внедрения, рассмотрен механизм взаимодействия молекулы с кристаллом. Выполнен расчет ПМЭ молекулы H_2 между T -позициями в кремнии с учетом вращательных степеней свободы и отклика кристаллической структуры. Согласно полученным результатам, минимальная и максимальная величины энергетического барьера E_{sp} для фиксированной структуры Si составляют соответственно приблизительно 7961 и 8947 см^{-1} . При учете релаксации структуры кристалла данные значения уменьшаются примерно на 1000 см^{-1} , тем самым приближаясь к экспериментальному значению 0.78 эВ . Выявлено, что максимальное значение энергии системы в седловой точке достигается при ориентации молекулы водорода вдоль направления $[111]$.

В рамках предложенной модели проведены расчеты энергетического спектра H_2 в трехмерном потенциале кремниевой матрицы. Получено, что формирование зонной структуры происходит при энергиях, превышающих основное состояние дефекта $E_0 \approx 1102.2 \text{ см}^{-1}$ приблизительно на 6000 см^{-1} и более. Рассчитанный закон дисперсии согласуется с фактом возникновения водородсодержащих планарных дефектов, формирующихся преимущественно в плоскостях $\{111\}$.

Численные расчеты выполнены на суперкомпьютере «СКИФ Cyberia» при поддержке Межрегионального центра коллективного пользования

высокопроизводительными вычислительными ресурсами Томского государственного университета.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (Государственное задание № 2014/223, код: 727).

ЛИТЕРАТУРА

1. S. J. Pearton, J. W. Corbett, and M. Stavola, *Hydrogen in Crystalline Semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin (1992).
2. M. Bruel, *Electron. Lett.* **31**, 1201 (1995).
3. A. W. R. Leitch, V. Alex, and J. Weber, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 421 (1998).
4. A. Mainwood and A. M. Stoneham, *Physica B* **116**, 101 (1983).
5. J. W. Corbett, S. N. Sahu, T. S. Shi, and L. C. Snyder, *Phys. Lett. A* **93**, 303 (1983).
6. S. K. Estreicher, *Mater. Sci. Eng. R* **14**, 319 (1995).
7. Y. Okamoto, M. Saito, and A. Oshiyama, *Phys. Rev. B* **56**, 10016 (1997).
8. K. G. Nakamura, K. Ishioka, M. Kitajima et al., *Appl. Surf. Sci.* **130**, 243 (1998).
9. B. Hourahine, R. Jones, S. Oberg et al., *Phys. Rev. B* **57**, 12666 (1998).
10. C. G. Van de Walle and J. P. Goss, *Mater. Sci. Eng. B* **58**, 17 (1999).
11. Yong-Sung Kim, Young-Gu Jin, Ji-Wook Jeong, and K. J. Chang, *Physica B* **273**, 231 (1999).
12. S. K. Estreicher, J. L. McAfee, P. A. Fedders et al., *Physica B* **308**, 202 (2001).
13. W. B. Fowler, P. Walters, and M. Stavola, *Phys. Rev. B* **66**, 075216 (2002).
14. E. V. Lavrov and J. Weber, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 215501 (2002).
15. M. Hiller, E. V. Lavrov, and J. Weber, *Phys. Rev. B* **74**, 235214 (2006).
16. M. Hiller, E. V. Lavrov, and J. Weber, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 055504 (2007).
17. J. Weber, M. Hiller, and E. V. Lavrov, *Physica B* **401**, 91 (2007).
18. C. Peng, M. Stavola, W. B. Fowler, and M. Lockwood, *Phys. Rev. B* **80**, 125207 (2009).
19. В. В. Мельников, С. Н. Юрченко, *Изв. вузов, физика* **56**(12), 41 (2013).
20. V. P. Markevich and M. Suezawa, *J. Appl. Phys.* **83**, 2988 (1998).
21. J. P. Perdew, J. A. Chevary, S. H. Vosko et al., *Phys. Rev. B* **48**, 4978 (1993).
22. J. P. Perdew and Y. Wang, *Phys. Rev. B* **33**, 8800 (1986).
23. J. P. Perdew, *Phys. Rev. B* **33**, 8822 (1986).
24. R. Dovesi, R. Orlando, B. Civalleri et al., *Z. Kristallogr.* **220**, 571 (2005); R. Dovesi, V. R. Saunders, C. Roetti et al., *CRYSTAL09 User's Manual* (University of Torino, Torino, 2009).
25. F. J. Torres, B. Civalleri, C. Pisani, and P. Ugliengo, *J. Phys. Chem. B* **110**, 10467 (2006).
26. T. H. Dunning, Jr., *J. Chem. Phys.* **53**, 2823 (1970).
27. А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др., *Физические величины*, справочник под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, Энергоатомиздат, Москва (1991).
28. В. В. Мельников, *Изв. вузов, физика* **57**(9), 129 (2014).