

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИЗОХРОМАТНЫЕ СПЕКТРЫ КРЕМНИЯ

Артамонов О. М., Дмитриева О. Г., Самарин С. Н., Яковлев И. И.

Экспериментально исследована зависимость интенсивности электрон-фотонной эмиссии Si (100) и Si (111) от энергии электронов. Для трех энергий квантов регистрируемого излучения записаны производные от интенсивности свечения по энергии электронов. Особенности, обнаруженные на энергетической зависимости интенсивности электрон-фотонной эмиссии, связываются с особенностями функции распределения плотности незанятых электронных состояний в диапазоне энергий между уровнем Ферми и уровнем вакуума. Показано, что изохроматные спектры, записанные для разных граней кремния, отличаются друг от друга.

Несмотря на большое число экспериментальных работ по исследованию кремния, имеющаяся к настоящему времени информация об энергетической электронной структуре незаполненных состояний в диапазоне энергий от дна зоны проводимости и выше весьма ограничена. Использование в последнее время для изучения таких состояний методик, основанных на явлении радиационного захвата электронов твердым телом (в зарубежной литературе оно обычно называется обратной фотоэмиссией) [1], открывает перед исследователями новые перспективы.

В данной работе исследована возможность применения методики изохроматной спектроскопии радиационного захвата медленных электронов поверхностью твердого тела [2] для получения информации о незаполненных электронных состояниях кремния. Сущность методики показана на рис. 1. Кинетическая энергия падающих нормально к поверхности образца электронов изменяется

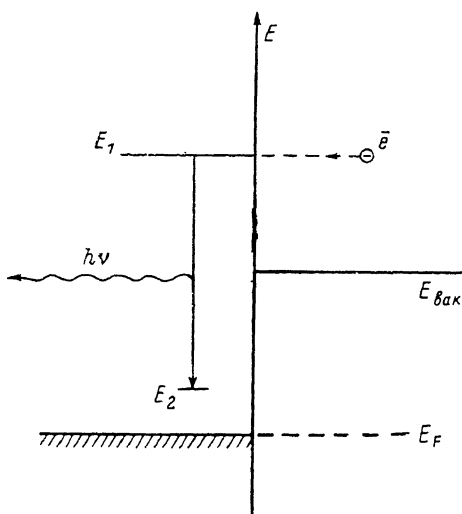


Рис. 1. Переход электрона из начального состояния с энергией E_1 в конечное состояние с энергией E_2 с излучением при этом кванта света $h\omega = E_1 - E_2$.

от нуля до нескольких эВ. Электрон из начального состояния с энергией E_1 может перейти в конечное состояние с энергией E_2 , излучив при этом квант света $h\omega = E_1 - E_2$. Возникающее при таком радиационном переходе излучение регистрируется в достаточно узком спектральном диапазоне $\Delta h\omega = 0.1$ эВ, «центрированном» на энергии квантов $h\omega_0$. Экспериментально записывается зависимость интенсивности излучения на частоте ω_0 от энергии падающих электронов. Для выделения особенностей на этой энергетической зависимости запись ведется в режиме синхронного детектирования с электрическим дифференцированием по E .

В качестве вспомогательной служила методика спектров полного тока [3]. Она позволила контролировать воспроизводимость исходной поверхности, определять на энергетической шкале положение уровня вакуума системы, сле-

диль за изменением потенциала поверхности при различных воздействиях на нее. Энергетическое положение первого максимума в спектре полного тока соответствует уровню вакуума системы $E_v=0$ и служит началом отсчета кинетической энергии электронов. Полуширина первого максимума позволяет оценить энергетический разброс электронов в пучке.

Эксперимент проводился в цельнометаллической камере с безмасляной системой откачки в условиях вакуума $1 \cdot 10^{-9}$ Тор. Для выделения полезного сигнала применялась модуляционная методика. Излучение регистрировалось с помощью фотоэлектронных умножителей ФЭУ-140 и ФЭУ-142, для выделения определенной длины волны использовались интерференционные фильтры и монокроматор.

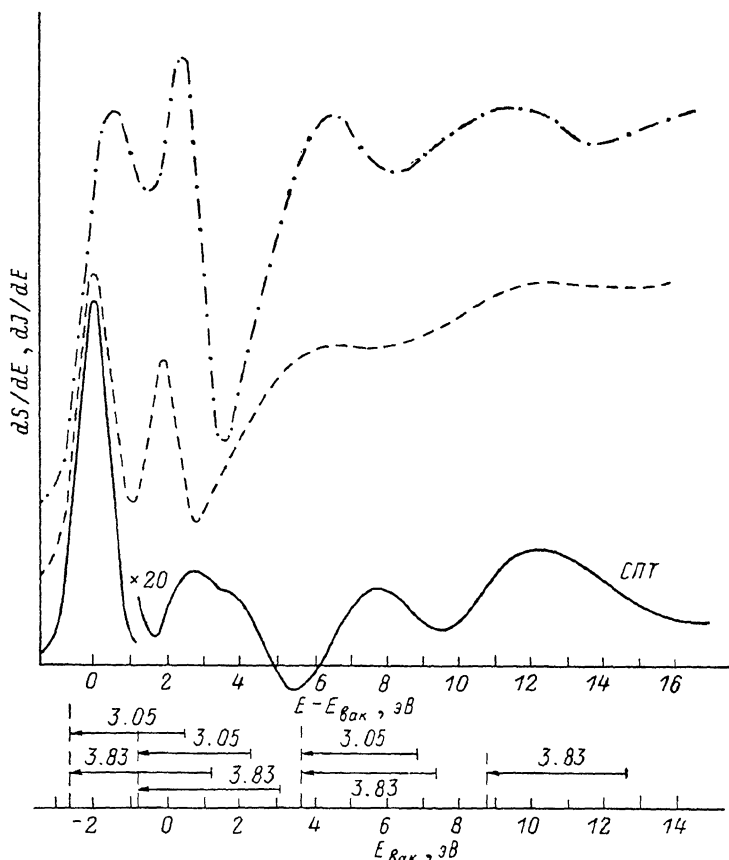


Рис. 2. Производные от изохромат по энергии электронов для энергий квантов регистрируемого излучения 3.05 (штриховая линия) и 3.83 эВ (штрихпунктирная) и спектр полного тока (сплошная) Si (100).

Внизу приведена энергетическая диаграмма радиационных переходов, соответствующих особенностям в изохроматных спектрах.

В работе исследовались поверхности (100) и (111) монокристаллического кремния. Поверхность кремния подвергалась химическому пассивированию, а затем очищалась от окисла прогревом до 1250°C в вакууме порядка 5×10^{-8} Тор [4].

На рис. 2 представлены производные от изохромат по энергии электронов (для краткости будем называть эти зависимости просто изохроматами) для двух энергий квантов регистрируемого излучения (3.05 и 3.83 эВ) и спектр полного тока поверхности Si (100). Максимумы излучения с энергией регистрируемых квантов $\hbar\omega=3.05$ эВ наблюдались для электронных переходов в конечные состояния с энергиями $-(2.7 \pm 0.3)$, $-(0.8 \pm 0.1)$ и (3.8 ± 0.5) эВ относительно уровня вакуума, для квантов с энергией $\hbar\omega=3.83$ эВ — в конечные состояния с энергиями $-(2.6 \pm 0.3)$, $-(0.8 \pm 0.1)$, (3.6 ± 0.5) и (8.7 ± 0.5) эВ. Энергетические

положения максимумов излучения определялись по соответствующим точкам перегибов изохроматных спектров dS/dE . Внизу на рис. 2 приведена энергетическая диаграмма для электронных переходов. Видно, что при изменении энергии регистрируемого кванта соответствующие особенности изохроматных спектров сдвигаются по оси абсцисс таким образом, что конечные состояния для соответствующих радиационных переходов остаются фиксированными (в пределах погрешности). Это свидетельствует об определяющей роли в данном случае конечного состояния перехода и, по-видимому, о повышенной плотности

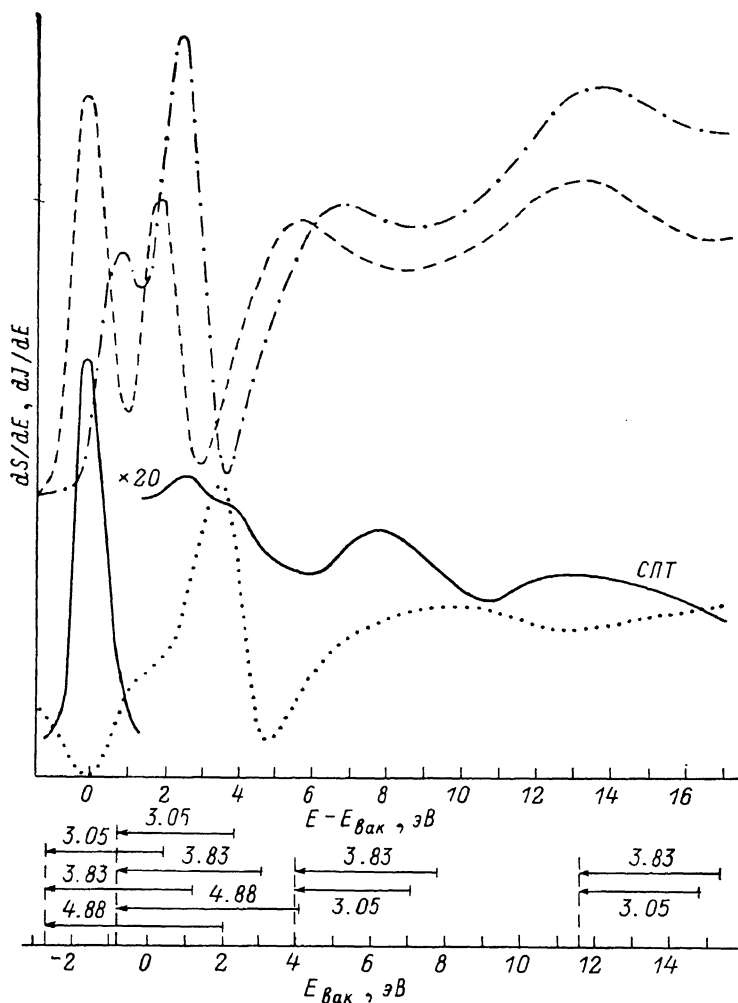


Рис. 3. Производные от изохромат по энергии электронов для энергий квантов регистрируемого излучения 3.05 (штриховая линия), 3.83 (штрихпунктирная) и 4.88 эВ (пунктирная) и спектр полного тока (сплошная) Si(111).

Внизу приведена энергетическая диаграмма соответствующих радиационных переходов.

незаполненных электронных состояний при этой энергии [5]. При больших энергиях электронов, вероятно, начинают оказывать заметное влияние и начальные состояния радиационных переходов, а также могут включаться и другие механизмы излучательного взаимодействия электронов с поверхностью кремния [5].

В работе [6] приведены результаты исследования кремния с помощью изохроматной спектроскопии тормозного излучения в рентгеновской области и данные теоретических расчетов. Теоретически рассчитанное положение максимумов в распределении плотности незаполненных электронных состояний соответствует энергиям 1.5, 1.9, 4.2 и 8.1 эВ, а экспериментально получены максимумы при энергиях -2.8, -0.9, 2.5, 5.0 и 8.7 эВ относительно уровня ва-

кума. Полученные в нашем эксперименте положения максимумов при энергиях -2.7 , -0.8 и 8.7 эВ согласуются с результатами, приведенными в работе [6].

На рис. 3 представлены изохроматы Si(111) для трех энергий квантов регистрируемого излучения (3.05, 3.83 и 4.88 эВ) и спектр полного тока. Спектр полного тока удовлетворительно согласуется со спектром полного тока Si(111), приведенным в работе [7]. Внизу помещена энергетическая диаграмма для определения энергий конечных состояний электронных радиационных переходов. Положение начальных состояний определялось по точкам перегиба изохроматного спектра dS/dE . Энергетические положения конечных состояний переходов мы связываем, как и в случае Si(100), с максимумами в распределении плотности незаполненных электронных состояний. Полученные при усреднении по трем изохроматам положения максимумов плотности незаполненных электронных состояний при энергиях $-(2.7 \pm 0.3)$, $-(0.8 \pm 0.1)$ и (4.0 ± 0.5) эВ относительно уровня вакуума хорошо согласуются с данными работы [6] (-2.8 , -0.9 и 2.5 эВ) и работы [8] (-1.1 эВ), в которой регистрировалась обратная фотоэмиссия Si(111) с энергией квантов 9.7 эВ.

При сравнении изохроматных спектров для $\hbar\omega=3.83$ эВ, записанных для двух граней кремния — Si(100) и Si(111), оказалось, что положения низкоэнергетических особенностей у обеих изохромат совпадают в пределах погрешности, а при увеличении энергии падающих электронов изохроматы для разных граней кремния начинают отличаться друг от друга.

Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что электрон-фотонная спектроскопия в условиях, когда превалирующим механизмом излучательного взаимодействия электронов с твердым телом становится их радиационный захват, может быть применена для исследования незаполненных электронных состояний в полупроводниках.

Л и т е р а т у р а

- [1] Pendry J. B. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1981, v. 14, N 8, p. 1381—1391.
- [2] Артамонов О. М., Самарин С. Н., Яковлев И. И. — ФТТ, 1986, т. 28, в. 8, с. 2536—2539.
- [3] Комолов С. А. — Поверхность, Физика, химия, механика, 1985, № 5, с. 5—21.
- [4] Лифшиц В. Г. Электронная структура и атомные процессы на поверхности кремния. М., 1985. 200 с.
- [5] Dose V. — Prog. Surf. Sci., 1983, v. 13, N 2, p. 225—284.
- [6] Jackson W. B., Northrup J. E., Allen J. W., Johnson R. J. — Phys. Rev. Lett., 1986, v. 56, p. 1187—1192.
- [7] Комолов С. А. — ЖТФ, 1981, т. 51, в. 9, с. 1909—1913.
- [8] Straub D., Ley L., Himpel F. J. — Phys. Rev. Lett., 1985, v. 54, N 2, p. 142—145.

Ленинградский государственный
университет им. А. А. Жданова

Получена 31.01.1987
Принята к печати 8.09.1987