

УДК 537.533.2:535.14:546.28

АБСОЛЮТНЫЙ ВЫХОД ФОТОНОВ С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

© 2008 г. М. И. Линтур, М. В. Приходько, А. И. Дашенко, Л. М. Маркович, И. С. Шароди

Ужгородский национальный университет
E-mail: problemlab@gmail.com

Изучены характеристики оптического излучения, которым сопровождается бомбардировка поверхности кремния электронами и ионами средних энергий. Наблюдаемое при этом непрерывное излучение связывается с межзонными электронными переходами. Характеристическое излучение, которое также имеет место в обоих случаях, в случае ионной бомбардировки испускается распыленными в возбужденном состоянии атомами кремния и рассеянными ионами гелия, а в случае электронной бомбардировки – десорбированными возбужденными атомами и молекулами остаточной атмосферы, которыми покрыта исследуемая поверхность кремния.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение кремния в современных микро- и нанотехнологиях обуславливает постоянный интерес к исследованию его различных характеристик и процессов, протекающих при воздействии на его поверхность потоков частиц и фотонов [1, 2]. С одной стороны, продолжается поиск информативных методик контроля микроскопических характеристик поверхности. С другой стороны, накапливаются экспериментальные данные, способствующие получению фундаментальных знаний о сложных вторично-эмиссионных явлениях. В данной работе изучение характера эмиссии оптического излучения при воздействии на поверхность монокристалла Si (111) проводилось методами ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ) и электронно-фотонной эмиссии (ЭФЭ). Сравнительный анализ возможностей и информативности этих оптических методов при исследовании процессов на поверхности Si (111) представлялся нам интересным. Прежде всего, мы стремились выявить отличительные особенности в спектральном составе излучения в спектрах ЭФЭ и ИФЭ кремния и в величине абсолютного выхода фотонов с поверхности кремния на одну падающую частицу.

Изучению электронной структуры поверхности кремния посвящено много работ. В [3, 4] исследование электронной энергетической структуры кремния проводилось методом фотоэмиссии с угловым разделением. Авторами [3] был обнаружен пик при энергии 0.7 эВ, который связывают с возбуждением поверхностных электронных состояний. Исследования, проведенные авторами [4], выявили в фотоэмиссионных спектрах особенности при энергиях 0.8 и 1.1 эВ, которые связывают с возбуждением объемных электронных состояний.

Спектры энергетических потерь на чистых и покрытых разными адсорбатами поверхностях

кремния изучены в [5, 6]. В этих работах обнаружены особенности с максимумами около 0.4 и 1.25 эВ, которые авторы связывают с межзонными переходами поверхностных электронных состояний; а особенности с максимумами вблизи 1.1 и 0.8 эВ связывают с межзонными переходами объемных электронных состояний и переходами с верхней валентной зоны на уровень вакуума соответственно.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА

Характеристики ИФЭ кремния изучали на установке “Карпаты” [7]. Поверхность кремния облучали ионами He⁺ с энергией 15 кэВ под углом 30° относительно нормали к поверхности. Плотность тока ионного пучка на мишени и давление остаточных газов в рабочей камере составляли соответственно $J_{\text{ион}} = 2.4 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ и $P_{\text{ион}} \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. Излучение, которым сопровождается облучение заряженными частицами поверхности кремния, изучали в диапазоне 200–600 нм. Оно фокусировалось линзой на входную щель монохроматора МДР-2, и далее выделенное излучение регистрировали с использованием фотоэлектронного умножителя ФЭУ-106 в режиме счета отдельных фотоэлектронов. Полезный сигнал измеряли частотометром, а спектр исследуемого излучения записывали с помощью электронного потенциометра КСП-4.

Исследования ЭФЭ проводились на сверхвысоковакуумном электронно-фотонном спектрометре [8], который создан на базе промышленной установки УСУ-4. Поверхность кремния облучали монохроматическим электрическим пучком электронов с энергией 800 эВ под углом 25° относительно нормали к поверхности. Остаточное давление атмосферных газов в рабочей камере установки не превышало 10^{-7} Па . Плотность электронного

тока можно было изменять от нуля до $7.6 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Оптическое излучение, которое возникает при взаимодействии электронов с поверхностью кремния, изучали в диапазоне 200–800 нм. Для анализа спектрального состава излучения использовали монохроматор МДР-12. В остальном техника и методика детектирования и записи спектров ЭФЭ аналогичны изложенной выше для ИФЭ. Поскольку в монохроматоре МДР-12, в отличие от МДР-2, в исследуемом диапазоне длин волн 200–800 нм используются две дифракционные решетки, кривая относительной чувствительности измерялась для обеих решеток: № 1 – в диапазоне 200–500 нм и № 2 – в диапазоне 400–1000 нм.

На обеих экспериментальных установках калибровку системы регистрации излучения осуществляли с помощью эталонных источников неполяризованного излучения, а именно: вольфрамовой лампы СИ-8-200 (для спектральной области 350–800 нм) и газоразрядной водородной лампы ДВС-25 (для области 200–350 нм). Истинное спектральное распределение вольфрамовой лампы СИ-8-200 рассчитывали по формуле Планка для заданной известной температуры T ее ленты с учетом излучательных свойств серого тела [9]. Спектр, записанный для лампы ДВС-25, был приведен на теоретический спектр из [10], после чего его “сшивали” с распределением интенсивности вольфрамовой лампы СИ-8-200. Определенная таким способом кривая чувствительности системы регистрации излучения в абсолютных единицах представлена на рис. 1.

Абсолютный выход фотонов с облучаемой электронами поверхности для выбранной длины волны определяли по формуле

$$N \left[\frac{\text{фот}}{\text{с} \cdot \text{нм}} \right] = \frac{I_{\text{экс}}(\lambda) S 2\pi}{\beta(\lambda) S_{\text{экс}} I_{\text{эл}} \Omega D \Delta l_{\text{экс}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{экс}}(\lambda)$ – интенсивность излучения в относительных единицах для выбранной λ ; $\beta(\lambda)$ – коэффициент чувствительности системы регистрации для данной λ ; S – площадь пучка электронов на поверхности исследуемого образца; $S_{\text{экс}}$ – площадь поверхности исследуемого образца, с которой собиралось излучение; $I_{\text{эл}}$ – ток электронного пучка; Ω – телесный угол наблюдения излучения; D – обратная линейная дисперсия монохроматора МДР-12; $\Delta l_{\text{экс}}$ – ширина входной щели монохроматора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектрограммы ионно- и электронно-фотонной эмиссий, записанные нами для поверхности кремния, представлены на рис. 2 и 3.

В обоих случаях наблюдаем два вида излучений: непрерывное излучение в широком диапазоне длин волн и характеристическое излучение в виде спектральных линий или полос. В случае ионно-фотонной эмиссии наблюдаем широкие полосы непре-

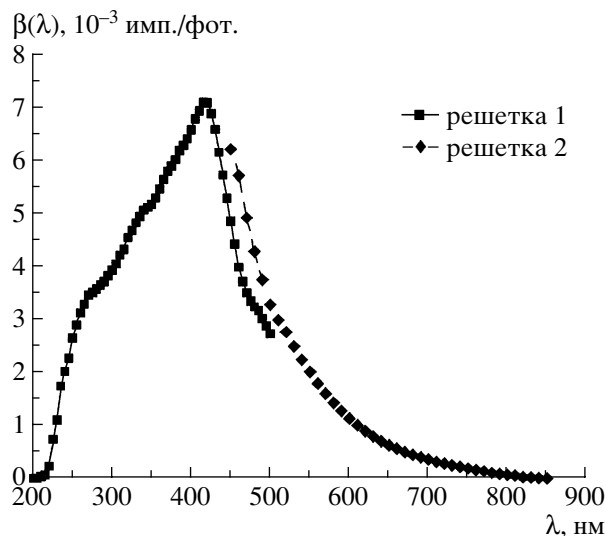


Рис. 1. Кривая чувствительности системы регистрации излучения.

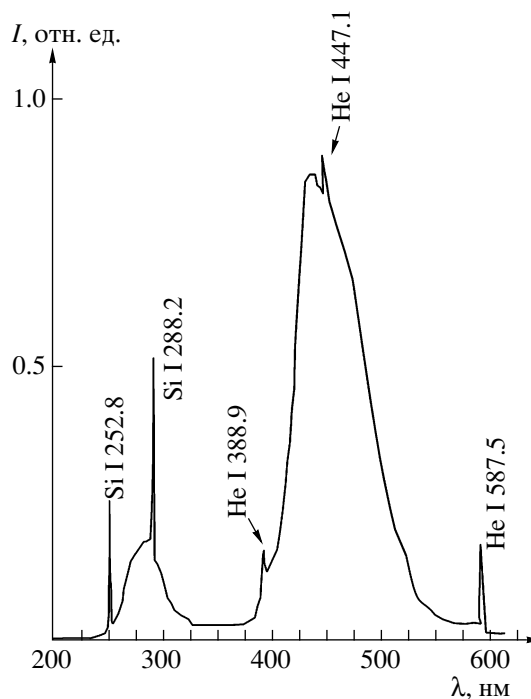


Рис. 2. Спектр ионно-фотонной эмиссии кремния ($E_{\text{ион}} = 15 \text{ кэВ}$, $I_{\text{ион}} = 2.4 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$).

рывного излучения с максимумами около $\lambda_1 = 280$ и $\lambda_2 = 440$ нм, а также узкий спектр линии кремния Si I 288.2, Si I 252.8, He I 388.9, He I 587.5 и He I 447.1. Излучателями линий кремния являются распыленные с поверхности в возбужденных состояниях атомы кремния, а линии гелия – рассеянные на поверхности исследуемого образца частицы бомбар-

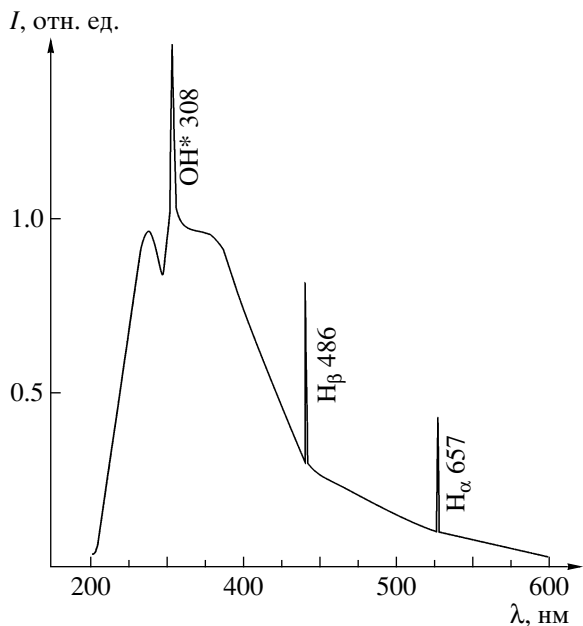


Рис. 3. Спектр электронно-фотонной эмиссии кремния ($E_{эл} = 800$ эВ, $I_{эл} = 7.6$ мА · см⁻²).

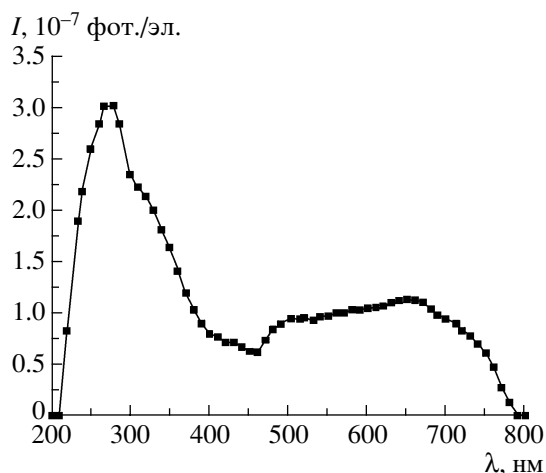


Рис. 4. Спектр ЭФЭ кремния в абсолютных единицах.

дирующего ионного пучка, часть которых в процессах отражения возбуждается.

В спектре электронно-фотонной эмиссии кремния наблюдаем полосы непрерывного излучения с максимумом $\lambda_1 = 280$ нм, а также молекулярную полосу ОН 308 нм, линии серии Бальмера водорода (H_α 657, H_β 486). Анализ полученных результатов показывает, что поверхность кремния, даже в условиях сверхвысокого вакуума в рабочей камере, активно покрывается частицами остаточного газа. Отсутствие полосы радикала ОН и линий водорода в спектре ионно-фотонной эмиссии кремния объясняется постоянной очисткой поверхно-

сти кремния в результате распыления поверхности ионным пучком.

Непрерывное излучение с максимумом $\lambda_1 = 280$ нм, которое наблюдается в обоих спектрах, имеет, вероятно, одинаковую природу. Заметим, что энергетическое положение этого максимума соответствует энергии квантов межзонных переходов Si [11, 12], в частности переходам электронов из поверхностных электронных состояний к объемным состояниям зоны Бриллюэна ($S_4 - \Gamma'_2$). Максимум $\lambda_2 = 440$ нм, который наблюдаем в спектре ионно-фотонной эмиссии кремния, также коррелирует с энергией прямых объемных электронных межзонных переходов $\Gamma'_{15} - \Gamma'_{25}$ зоны Бриллюэна [13].

На рис. 4 представлен спектр ЭФЭ кремния в абсолютных единицах, т.е. спектрограмма с учетом спектральной чувствительности системы регистрации.

Анализируя данный спектр, обратим внимание на рост интенсивности на краях спектра и резкий спад в середине в сравнении со спектрограммой, представленной на рис. 3. Связано это с тем, что максимум чувствительности детектора излучения ФЭУ-106 лежит в области 400–450 нм. Для определения абсолютного выхода фотонов с поверхности кремния были просуммированы значения интенсивностей непрерывного излучения, которые представлены на рис. 4, умноженные на интервал длины волны 10 нм. Таким образом, абсолютный выход фотонов с поверхности кремния на один падающий электрон в диапазоне длин волн 200–800 нм равен $N \approx 6.9 \cdot 10^{-4}$ фот./эл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован спектральный состав излучения в диапазоне 200–800 нм при бомбардировке поверхности монокристалла кремния электронами и в диапазоне 200–600 нм при бомбардировке ионами. В обоих случаях два вида излучения различаются как по месту его локализации, так и по механизму генерации: непрерывное и характеристическое излучение. Непрерывное излучение, испускаемое непосредственно бомбардируемым участком поверхности, которое возникает в результате излучательных релаксаций возбужденной электронной подсистемы кристалла, а именно переходов электронов из поверхностных электронных состояний к объемным состояниям зоны Бриллюэна ($S_4 - \Gamma'_2$) и прямых объемных электронных межзонных переходов зоны Бриллюэна ($\Gamma'_{15} - \Gamma'_{25}$). Характеристическое излучение, которое образуется перед бомбардируемой поверхностью, испускается распыленными атомами кремния и рассеянными атомами гелия в случае ионной бомбардировки или

десорбированными возбужденными частицами в процессах электрон-стимулированной десорбции.

Определен также интегральный абсолютный выход фотонов с поверхности кремния при бомбардировке электронами с энергией 800 эВ (в диапазоне длин волн 200–800 нм), который равен $6.9 \cdot 10^{-4}$ фот./эл., что значительно превышает выход фотонов с поверхности металлов, но значительно ниже, чем для люминофоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989.
2. Пон С., Шароди І. Фізична електроніка. Львів: Євросвіт, 2001.
3. Unrberg R.I.G., Landemark E., Chao Y.C. // J. Electr. Spectr. Relat. Phenom. 1995. V. 75. P. 197.
4. Wach A.L., Miller T., Hsieh T.C. et al. // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. P. 2326.
5. Farrell H., Stucki F., Anderson J. et al. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. P. 721.
6. Johansson S.O., Uhrberg R.I.G., Martensson P., Hansson G.V. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. P. 1305.
7. Дробнич В.Г., Пон С.С., Есаулов В.А. Доплеровская томография потока атомных частиц. Ужгород: Закарпатье, 1998.
8. Лінтур М.І., Маркович Л.М., Приходько М.В. и др. // Науковий вісник УжНУ. Сер. фіз. 2001. № 10. С. 191.
9. Мальшев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.
10. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.
11. Gavioli L., Betti M.G., Cricenti A., Marioni C. // J. Electr. Spectr. Relat. Phenom. 1995. V. 76. P. 541.
12. Shpenik O.B., Popik T.Yu., Feyer V.M., Popik Yu.V. // Physica. B. 2002. V. 315. P. 133.
13. Феер В.М. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ужгород: УжНУ, 2002. С. 93.