

**РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРОНАМИ,
ОТРАЖЕННЫМИ ОТ ПОВЕРХНОСТИ SI**

А. Ю. Игуменов¹, А. С. Паршин¹, Ю. Л. Михлин², О. П. Пчеляков³,
А. И. Никифоров³, В. А. Тимофеев³

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: igumenovau@mail.ru

²Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 24

³Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

Кремний – основной материал нанoeлектроники и солнечной энергетики. На основе кремния в настоящее время создается множество структур, обладающих уникальными свойствами и позволяющих решать прикладные задачи.

Одной из областей применения кремния является создание на его основе фотоэлектрических преобразователей для космической и авиационной техники. В перспективе фотоэлектрические приборы на основе кремния могут быть изготовлены из материалов, содержащихся в лунном грунте, и кремний послужит основой для создания космических солнечных электростанций.

Контроль элементного состава и физических свойств материалов, используемых в космическом материаловедении, играет важную роль, соответственно, необходимо совершенствовать методы исследования материалов. Методы исследования развиваются как в технологическом направлении, так и в направлении обработки и интерпретации экспериментальных результатов. Одним из распространенных методов исследования поверхности является электронная спектроскопия.

При входе и выходе из поверхности электроны генерируют поверхностные возбуждения, которые несут количественную информацию о различных процессах взаимодействия электронов с веществом. Интенсивности Оже- и фотоэлектронных пиков зависят от вероятности неупругого рассеяния как внутри твердого тела, так и в приповерхностном слое. Вероятность генерации электроном поверхностных возбуждений при единичном акте взаимодействия с поверхностью называется поверхностным параметром, является наиболее удобной величиной для описания влияния поверхностных возбуждений на интенсивность Оже-электронов и играет важную роль при количественном анализе в Оже-электронной спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов.

В данной работе спектры потерь энергии отраженных электронов получены для серии образцов Si, изготовленных при различных технологических условиях и имеющих разную кристаллографическую ориентацию. Из этих экспериментальных спектров вычислены зависимости произведения средней длины неупругого пробега и дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов от потерь энергии электронов. Предложен новый метод определения параметра поверхностных возбуждений в спектроскопии сечения неупругого рассеяния электронов, основанный на разложении этих спектров на пики потерь, описываемые трехпараметрическими универсальными функциями сечения неупругого рассеяния электронов Тоугаарда.

Ключевые слова: спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов, параметр поверхностных возбуждений.

**MEASUREMENT OF THE SURFACE EXCITATION PROBABILITY
OF ELECTRONS REFLECTED FROM SI SURFACE**

A. Yu. Igumenov¹, A. S. Parshin¹, Yu. L. Mikhlin², O. P. Pchelyakov³,
A. I. Nikiforov³, V. A. Timofeev³

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: igumenovau@mail.ru

²Institute of Chemistry and Chemical Technologies, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
50/24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
13, Academician Lavrentjev Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Silicon is the main material of nanotechnology and solar energy. In our days a lot of structures based on silicon have unique and useful properties which can help to deal with applied problems.

One area of silicon application is the creation of silicon-based photovoltaic converters for space and aviation equipment. In the future, photovoltaic devices based on silicon can be made from the materials contained in the lunar soil, and silicon will form the basis for the development of space solar power.

Control of the elemental composition and physical properties of materials used in space materials science plays an important role, accordingly necessary to improve the methods of research materials. The methods of research materials are developed both in technological direction and the direction of the processing and interpretation of experimental data. One of the widely used methods of surface investigation is electron spectroscopy.

At the entrance and exit of the surface electrons generate surface excitations which share quantitative information on the various processes of interaction of electrons with matter. The intensities of Auger electron and photoelectron peaks depend both on the probability of inelastic scattering within the solid, and the surface layer. The probability of generating an electron surface excitations with a single act of interaction with the surface is called the surface excitation parameter that is the most convenient value to describe the effect of surface excitations on the intensity of the Auger electrons and plays an important role in quantitative analysis in Auger electron spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, electron energy loss spectroscopy.

In this work energy loss spectra of reflected electrons were obtained for the series of samples of Si. Samples were obtained with different technical conditions and some of them have different crystallographic orientation. Energy loss dependence of inelastic mean free path and differential inelastic electron scattering cross-section were calculated. We have suggested a new method of determination of surface excitation parameter, based on fitting of these spectra with the Tougaard's Three-parameter Universal cross-section.

Keywords: inelastic scattering cross-section, electron energy loss spectroscopy, surface excitation parameter.

Введение. Кремний – основной элемент нанoeлектроники и фотовольтаической солнечной энергетики. Кремний широко применяется в нанотехнологиях и полупроводниковой электронике как неотъемлемая часть наногетероструктур, обладающих хорошо подходящими для практических применений квантовыми эффектами [1; 2].

Актуальной областью применения кремния является создание на его основе фотоэлектрических преобразователей для космической и авиационной техники [3]. В перспективе фотоэлектрические приборы на основе кремния могут быть изготовлены из материалов, содержащихся в лунном грунте (реголит), при этом возможная энергодобыча намного превысит затраты на доставку оборудования с Земли [4]. Кремний представляет значительный интерес для этих целей, так как является единственным полупроводником, который можно выделить из лунного грунта. С другой стороны, кремний может быть использован для изготовления солончака, как возможного ракетного топлива [5].

В космическом материаловедении, нанотехнологиях и полупроводниковой электронике требуются высокоточные методы исследования состава, структуры, физических и химических свойств поверхности. Методы исследования развиваются как в технологическом направлении, так и направлении обработки и интерпретации экспериментальных результатов. Одним из распространенных методов исследования поверхности является электронная спектроскопия.

При входе и выходе из поверхности электроны генерируют поверхностные возбуждения, которые несут количественную информацию о различных процессах взаимодействия электронов с веществом. Ин-

тенсивности Оже- и фотоэлектронных пиков зависят от вероятности неупругого рассеяния как внутри твердого тела, так и в приповерхностном слое [6; 7]. Поверхностным параметром P_{se} называется вероятность генерации электроном поверхностных возбуждений при единичном акте взаимодействия с поверхностью [6; 7]. Поверхностный параметр является наиболее удобной величиной для описания влияния поверхностных возбуждений на интенсивность Оже-электронов [7] и играет важную роль при количественном анализе в Оже-электронной спектроскопии (ОЭС), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ). В настоящей работе нами предложен и отработан на серии образцов Si новый метод определения поверхностного параметра из спектров сечения неупругого рассеяния электронов.

Методика эксперимента. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов (произведения средней длины неупругого пробега электронов λ и дифференциального сечения неупругого рассеяния $K(E_0, E_0 - E)$, где E_0 – энергия первичных электронов, $E_0 - E$ – потери энергии электронами, Кл-спектры) могут быть использованы для количественного анализа элементного состава в двухкомпонентных композитных структурах [8–11], определения толщины слоя диоксида кремния на кремниевой подложке [12] и расчета параметра поверхностных возбуждений [13–15].

Были исследованы 3 промышленных монокристаллические подложки Si (100), один образец Si (111) и образец, представляющий собой эпитаксиальный слой Si толщиной 50 нм на промышленной подложке Si (100), полученный методом молекулярно-лучевой

эпитаксии при температуре 700 °С. Все образцы имели электронный тип проводимости.

Измерения фотоэлектронных спектров и интегральных спектров потерь энергии отраженных электронов проводили на сверхвысоковакуумном фотоэлектронном спектрометре SPECS (Германия). Спектры потерь энергии отраженных электронов получены в интервале 150 эВ с шагом 0,1 эВ. Энергия потерь T рассчитывалась как разность между энергией первичных электронов E_0 (нулевые потери) и энергией отраженных электронов E , $T = E_0 - E$. Энергии первичных электронов составляли 300, 600, 1200, 1900, 3000 эВ, ширина первичного электронного пучка на полувысоте менее 1 эВ.

Из экспериментальных спектров потерь энергии отраженных электронов с помощью программного пакета QUASES™ XS REELS (Quantitative Analysis of Surfaces by Electron Spectroscopy cross section determined by REELS) [16], согласно алгоритму, предложенному в [17], получены спектры сечения неупругого рассеяния электронов. Спектры сечения неупругого рассеяния электронов, по сравнению со спектрами потерь энергии отраженных электронов, лучше подходят для интерпретации процессов взаимодействия электронов с веществом и позволяют исследовать зависимости интенсивностей поверхностных и объемных возбуждений от энергии первичных электронов и угла эмиссии более точно [18].

Экспериментальные результаты. В основе определения поверхностного параметра лежит разделение поверхностной и объемной составляющих спектра потерь энергии электронами. При увеличении энергии первичных электронов увеличивается вклад объемных возбуждений (объемного плазмона и межзонных переходов) и уменьшается вклад поверхностных (поверхностный плазмон и межзонные переходы в поверхностные состояния) [19; 20].

Проследить изменение интенсивностей поверхностных и объемных возбуждений можно как качественно, исследуя зависимость спектра потерь энергии отраженных электронов от энергии первичных электронов и угла детектирования отраженных электронов [20], так и количественно, путем разделения вкладов разной природы, используя факторный анализ [18], моделируя электронный спектр на основании приближения частичных интенсивностей [7; 21; 22].

Упомянутые выше подходы отличаются весьма громоздкими математическими вычислениями. Относительно простой метод экспериментального определения поверхностного параметра из спектров сечения неупругого рассеяния электронов был предложен [13] и модифицирован [14; 15] Гергели. Усовершенствованный метод Гергели предполагает следующий алгоритм: спектры при всех энергиях первичных электронов нормируются в точке, соответствующей максимальной интенсивности спектра, полученного при максимальной энергии первичных электронов; спектр при максимальной энергии аппроксимируется в области объемного пика трехпараметрической функцией сечения неупругого рассеяния электронов Тоугаарда [23]; производится вычитание из экспериментальных спектров пика Тоугаарда (объемного плазмона) и обратная нормировка. Таким образом, выделяется часть

спектра, соответствующая поверхностным возбуждениям и отнесенная к площади всего спектра, которая характеризует вероятность потери энергии электроном на поверхностные возбуждения. Площади спектров сечения неупругого рассеяния электронов, рассчитанные по алгоритму Тоугаарда [17], близки к единице, следовательно, интеграл от поверхностной составляющей спектра и равен поверхностному параметру.

Трехпараметрическая функция сечения неупругого рассеяния электронов Тоугаарда используется для описания спектров сечения неупругого рассеяния электронов полупроводников и полимеров [23]:

$$\lambda K = \frac{BT}{(C - T^2)^2 + DT^2}, \quad (1)$$

где B , C , D – подгоночные параметры, которые для каждого элемента имеют определенные значения [23]. Параметр B определяет интенсивность пика, параметр C – положение, параметр D – ширину и косвенно влияет на положение и интенсивность пика.

Универсальные функции сечения неупругого рассеяния электронов используются для количественного анализа и вычитания фона в РФЭС, ОЭС и СХПЭЭ [23; 24].

Спектры сечения неупругого рассеяния электронов по потерям энергии для разных образцов Si близки между собой, среднеквадратичное отклонение не превышает $6,5 \cdot 10^{-4}$. На рис. 1, *a* показан результат выделения поверхностной составляющей в спектре Si (100) по методу Гергели.

В спектрах сечения неупругого рассеяния электронов по потерям энергии интенсивности возбуждений разной природы складываются, образуя итоговое распределение произведения средней длины неупругого пробега электронов λ и дифференциального сечения неупругого рассеяния K . Как видно на рис. 1, метод Гергели не учитывает влияния интенсивности поверхностных возбуждений на интенсивность результирующего спектра в области объемного плазмона (и наоборот), поэтому интенсивность объемного плазмона можно считать завышенной.

Предложенный нами метод разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь, описываемые трехпараметрическими универсальными функциями сечения Тоугаарда, позволяет учесть влияние интенсивности поверхностных возбуждений на результирующую интенсивность в области объемного плазмона и, соответственно, выделить поверхностный вклад с большей точностью. На рис. 1, *б* показано разложение спектра Si на пики потерь. Согласно обозначениям, приведенным в [19], в спектре присутствуют межзонные переходы S_1 , E_2 , S_3 , поверхностный плазмон S и объемный плазмон V . Природа пика потерь может быть определена из зависимости площади пика, определяющей интенсивность возбуждений, от энергии первичных электронов (рис. 2, *a*). Площади пиков S_3 и S уменьшаются с увеличением энергии первичных электронов, что подтверждает их поверхностную природу, зависимость площади пика объемного плазмона V имеет противоположный характер. Для пиков S_1 и E_2 в силу их малой интенсивности ошибка при определении площади сравнима

с величиной площади, поэтому однозначно определить природу этих пиков сложно.

Используя разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь, можно рассчитать поверхностный параметр отдельных возбуждений и общий (интегральный) поверхностный параметр как сумму площадей всех поверхностно-подобных возбуждений. На рис. 2, б приведены зависимости поверхностного параметра от энергии первичных электронов, рассчитанного по методу Гергели и из разложения.

Поверхностный параметр был рассчитан по методу Гергели [14; 15] (Gergely P_{se} , рис. 2, б) как площади под пиками поверхностного плазмона S и межзонного перехода S_3 , а также как сумма площадей этих пиков $S + S_3$ (рис. 2, б). Как видно на рис. 2, б, поверхностный параметр, рассчитанный как площадь поверхностного плазмона, превышает поверхностный параметр, рассчитанный по методу Гергели. Это связано с тем, что метод Гергели завышает интенсивность объемного плазмона, занижая интенсивность поверхностного и, следовательно, уменьшая поверхностный параметр. Интегральный поверхностный параметр (сумма площадей пиков S и S_3) также превышает поверхностный параметр, рассчитанный по методу Гергели.

Расчет поверхностного параметра по методу Гергели и из разложения спектров на составляющие для разных образцов Si дает хорошо согласующиеся между собой результаты. Поверхностный параметр практически не зависит от кристаллографической ориентации поверхности образца, а метод разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на составляющие позволяет получить воспроизводимые результаты.

Все полученные экспериментально зависимости аппроксимированы полуэмпирической формулой Вернера [6; 7; 22]:

$$P_{se} = \frac{1}{0,171a\sqrt{E_0} \cos \alpha_i + 1} + \frac{1}{0,171a\sqrt{E_0} \cos \alpha_d + 1}, \quad (2)$$

где $\alpha_i = 59^\circ$, $\alpha_d = 0^\circ$ – соответственно углы падения и детектирования электронов относительно нормали к поверхности. Первое слагаемое учитывает влияние поверхностных возбуждений при входе электронов в образец, второе – при выходе. Полуэмпирическая формула Вернера широко используется для описания поверхностных возбуждений в электронной спектроскопии [6; 7; 14; 15; 22], поскольку хорошо описывает зависимость поверхностного параметра и от энергии первичных электронов, и от углов падения и детектирования.

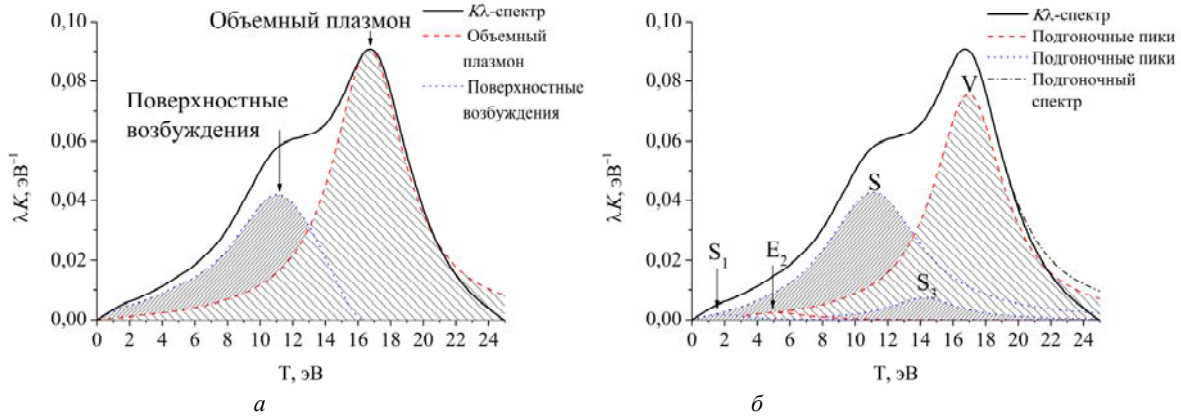


Рис. 1. Спектр сечения неупругого рассеяния электронов Si (100), полученный при энергии первичных электронов 1200 эВ. Поверхностная часть спектра выделена по методу Гергели (а) и из разложения спектра на пики потерь (б)

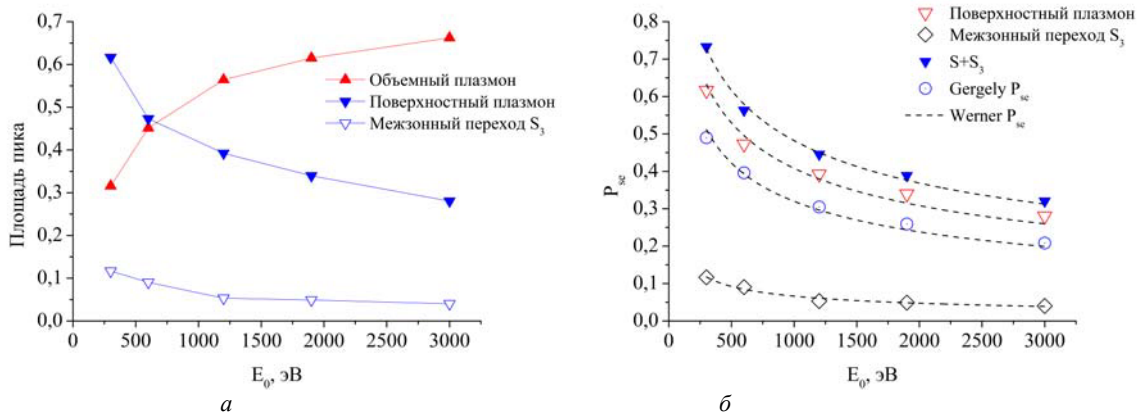


Рис. 2. Зависимости площади подгоночных пиков (а) и поверхностного параметра (б) от энергии первичных электронов

Подгоночный параметр a

| Метод определения P_{se} | Метод Гергели | Через площадь пика S | Через площадь пика S_3 | Через сумму площадей пиков S и S_3 |
|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|--|
| Подгоночный параметр a | 1,41 | 1,04 | 7,91 | 0,83 |

Подгоночный параметр a является материал-зависимым и составляет 1 для свободного электронного газа и 2 для переходных металлов [6]. Значение параметра a для Si составляет от 0,7 до 1,5 соответственно в источниках [14] и [6].

Значения подгоночного параметра a приведены в таблице.

Полученный нами параметр a согласуется с приведенным в литературе для Si, за исключением параметра, полученного при аппроксимации зависимости площади межзонного перехода S_3 от энергии первичных электронов, – вклад данного пика очень мал по сравнению с вкладом пика S .

Заключение. Предложенный нами метод определения поверхностного параметра позволяет детально (вплоть до расчета вероятности потери энергии электроном на возбуждение межзонных переходов и поверхностных плазмонов) оценить влияние поверхностных возбуждений на спектр сечения неупругого рассеяния электронов. Расчет поверхностного параметра из разложения спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь, по сравнению с теоретическими методами прост в реализации и в отличие от экспериментального метода Гергели позволяет анализировать результирующий спектр как суперпозицию вкладов различной природы.

Разложение спектров сечения неупругого рассеяния электронов на пики потерь и значение поверхностного параметра для разных образцов Si дает хорошо согласующиеся между собой результаты, что свидетельствует о воспроизводимости предложенного метода.

Библиографические ссылки

1. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // ФТП. 2000. Т. 34, вып. 11. С. 1281–1299.
2. Искусственные подложки GeSi для гетероэпитаксии – достижения и проблемы / Ю. Б. Болховитянов, О. П. Пчеляков, Л. В. Соколов [и др.] // ФТП. 2003. Т. 37, вып. 5. С. 513–538.
3. Кремниевые фотопреобразователи для космической и авиационной отрасли / Г. П. Яровой [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 1. С. 521–524.
4. Duke M. B., Gaddis L. R., Taylor G. J. Development of the Moon // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2006. № 60. P. 597–656.
5. Landis G. A. Materials refining on the Moon // Acta Astronautica. 2007. № 60. P. 906–915.
6. The three-step model in electron spectroscopy revisited I. Angular distribution of Auger electron emission from non-crystalline Al, Si and Cu surfaces / W. S. M. Werner [et al.] // Surface Science. 2001. № 495, P. 107–119.
7. Measurement of the surface excitation probability of medium energy electrons reflected from Si, Ni, Ge and Ag surfaces / W. S. M. Werner [et al.] // Surface Science. 2005. № 585. P. 85–94.
8. Спектроскопия характеристических потерь энергии отраженных электронов в тонких пленках системы Fe_xSi_{1-x} / А. С. Паршин [и др.] // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 9. С. 41–48.
9. Спектроскопия характеристических потерь энергии отраженных электронов в композитных структурах Mn_xSi_{1-x} / А. С. Паршин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 6. С. 5–9.
10. Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов наногетероструктур Ge_xSi_{1-x} / А. С. Паршин [и др.] // ФТП. 2014. № 48, вып. 2. С. 237–241.
11. Новые возможности количественного анализа в спектроскопии потерь энергии отраженных электронов структур Fe_xSi_{1-x} / А. С. Паршин [и др.] // ЖТФ. 2011. № 81, вып. 5. С. 69–74.
12. Спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов в слоистых системах $SiO_2/Si(100)$ / А. С. Паршин [и др.] // Автометрия. 2012. № 48, 4. С. 88–92.
13. Surface excitation effects in electron spectroscopy / G. Gergely [et al.] // Solid State Ionics. 2001. № 141–142. P. 47–51.
14. Gergely G. Elastic backscattering of electrons: determination of physical parameters of electron transport processes by elastic peak electron spectroscopy // Progress in Surface Science. 2002. № 71. P. 31–88.
15. Experimental determination of electron inelastic scattering cross-sections in Si, Ge and III–V semiconductors / G. T. Orosz [et al.] // Vacuum. 2003. № 71. P. 147–152.
16. Tougaard S. QUASES – Software packages to characterize surface nano-structures by analysis of electron spectra [Электронный ресурс]. URL: <http://www.quases.com>. (дата обращения: 15.10.2014).
17. Tougaard S., Chorkendorff. I. Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy // Phys Rev. B. 1987. № 35, 13. P. 6570–6577.
18. Measurement of optical constants of Si and SiO_2 from reflection electron energy loss spectra using factor analysis method / H. Jin [et al.] // Journal of applied physics. 2010. № 107. P. 083709, 1–11.
19. Лифшиц В. Г., Луняков Ю. В. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии // Дальнаука. 2004. 315 с.
20. Inelastic Scattering Cross Section of Si Determined from Angular Dependent Reflection Electron Energy Loss Spectra / H. Jin [et al.] // Journal of Surface Analysis. 2009. № 15, 3. P. 321–324.

21. Werner W.S.M. Simple algorithm for quantitative analysis of reflection electron energy loss spectra (REELS) // *Surface Science*. 2010. № 604. P. 290–299.

22. Werner W.S.M. Analysis of Reflection Electron Energy Loss Spectra (REELS) for Determination of the Dielectric Function of Solids: Fe, Co, Ni. [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0611053.pdf>. (дата обращения: 15.10.2014).

23. Tougaard S. Universality Classes of Inelastic Electron Scattering Cross-sections // *Surf. Interface Anal.* 1997. № 25. P. 137–154.

24. Tougaard S. Quantitative Analysis of the Inelastic Background in Surface Electron Spectroscopy // *Surf. Interface Anal.* 1988. № 11. P. 453–472.

References

1. Pchelyakov O. P., Bolkhovityanov Yu. B., Dvurechenskiy A. V. [et al.]. Silicon-germanium nanostructures with quantum dots: Formation mechanisms and electrical properties. *Semiconductors*. 2000, Vol. 34, No. 11, P. 1229–1247.

2. Bolkhovityanov Yu. B., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V. [et al.]. Artificial GeSi substrates for heteroepitaxy: Achievements and problems. *Semiconductors*. 2003, Vol. 37, No. 5, P. 493–518.

3. Jarovoj G. P., Latuhina N. V., Rogozhin A. S. [et al.]. [Silicon photovoltaics for space and aviation industry]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2012, Vol 14, No. 1, P. 521–524 (In Russ.).

4. Duke M. B., Gaddis L. R., Taylor G. J. Development of the Moon. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2006, No. 60, P. 597–656.

5. Landis G. A. Materials refining on the Moon. *Acta Astronautica*. 2007, No. 60, P. 906–915.

6. Werner W. S. M., Tratnik H., Brenner J. [et al.]. The three-step model in electron spectroscopy revisited I. Angular distribution of Auger electron emission from non-crystalline Al, Si and Cu surfaces. *Surface Science*. 2001, No. 495, P. 107–119.

7. Werner W. S. M., Kover L., Egri S. [et al.]. Measurement of the surface excitation probability of medium energy electrons reflected from Si, Ni, Ge and Ag surfaces. *Surface Science*. 2005, No. 585, P. 85–94.

8. Parshin A. S., Aleksandrova G. A., Dolbak A. E. [et al.]. Reflection electron-energy-loss spectroscopy of $\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$ thin films. *Technical Physics Letters*. 2008, Vol. 34, No. 5, P. 381–383.

9. Parshin A. S., Pchelyakov O. P., Dolbak A. E. [et al.]. Reflection Electron Energy Loss Spectroscopy in $\text{Mn}_x\text{Si}_{1-x}$ Composite Structures. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013, Vol. 7, No. 3, P. 505–508.

10. Parshin A. C., P'yanovskaya E. P., Pchelyakov O. P. [et al.]. Inelastic electron scattering cross-section spectroscopy of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ nanoheterostructures. *Semiconductors*. 2014, Vol. 48, No. 2, P. 224–227.

11. Parshin A. S., Kushchenkov P. A., Aleksandrova G. A. [et al.]. New opportunities for quantitative analysis as applied to reflected electron energy loss spectroscopy

of Fe/Si structures. *Technical Physics*. 2011, Vol. 56, No. 5, P. 656–661.

12. Parshin A. S., Kushchenkov P. A., Pchelyakov O. P. [et al.]. Spectroscopy of the cross section of inelastic scattering of electrons in $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ layered systems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012, Vol. 48, No. 4, P. 396–400.

13. G. Gergely, Menyhard M., Gurban S. [et al.]. Surface excitation effects in electron spectroscopy. *Solid State Ionics*. 2001, No. 141–142, P. 47–51.

14. Gergely G. Elastic backscattering of electrons: determination of physical parameters of electron transport processes by elastic peak electron spectroscopy. *Progress in Surface Science*. 2002, No. 71, P. 31–88.

15. Orosz G. T. Gergely G., Gurban S. [et al.]. Experimental determination of electron inelastic scattering cross-sections in Si, Ge and III–V semiconductors. *Vacuum*. 2003, No. 71, P. 147–152.

16. Tougaard S. QUASES – Software packages to characterize surface nano-structures by analysis of electron spectra. Available at: <http://www.quases.com> (accessed 15.10.2014).

17. Tougaard S., Chorkendorff I. Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy. *Phys Rev. B*. 1987, No. 35, 13. P. 6570–6577.

18. Jin H., Shinotsuka H., Yoshikawa H. [et al.]. Measurement of optical constants of Si and SiO_2 from reflection electron energy loss spectra using factor analysis method. *Journal of applied physics*. 2010, No. 107, P. 083709, 1–11.

19. Lifshits V. G., Lunyakov Yu. V. *Spektry KhPEE poverkhnostnykh faz na kremnii* [EELS spectra of surface phases on silicon]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2004, 315 p.

20. Jin H., Yoshikawa H., Iwai H. [et al.]. Inelastic Scattering Cross Section of Si Determined from Angular Dependent Reflection Electron Energy Loss Spectra. *Journal of Surface Analysis*. 2009, Vol. 15, No. 3, P. 321–324.

21. Werner W. S. M. Simple algorithm for quantitative analysis of reflection electron energy loss spectra (REELS). *Surface Science*. 2010, No. 604, P. 290–299.

22. Werner W. S. M. Analysis of Reflection Electron Energy Loss Spectra (REELS) for Determination of the Dielectric Function of Solids: Fe, Co, Ni. Available at: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0611053.pdf> (accessed 15.10.2014).

23. Tougaard S. Universality Classes of Inelastic Electron Scattering Cross-sections. *Surf. Interface Anal.* 1997, No. 25, P. 137–154.

24. Tougaard S. Quantitative Analysis of the Inelastic Background in Surface Electron Spectroscopy. *Surf. Interface Anal.* 1988, No. 11, P. 453–472.