

УДК 621.315.592

ОСОБЕННОСТИ ИОННО–ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ РЕАКТИВНОГО ИОННО–ЛУЧЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ

© 2014 г. А. С. Курочка¹, А. А. Сергиенко², С. П. Курочка², В. И. Колыбелкин¹¹ОАО «НПП «ИСТОК» им. А. И. Шокина»,

ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, Московская область, 141190, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Рассмотрены существующие методы диагностики поверхности твердых тел при ионно–плазменных процессах. Установлено, что наиболее эффективным методом оценки состояния поверхности, определения перехода процесса травления от одного слоя к другому и окончания процесса травления является регистрация ионно–электронной эмиссии в процессе ионно–лучевого травления. Представлены результаты исследований значения тока вторичных электронов при ионно–лучевом травлении различных полупроводников. Приведена электрическая схема эксперимента, описан узел регистрации вторичных электронов. Экспериментально определены зависимости тока вторичных электронов от ширины запрещенной зоны E_g и высоты потенциального барьера (сродства к электрону) χ полупроводниковых материалов Ge, Si, GaAs, GaP, SiC. Четко выраженной зависимости интегрального сигнала ионно–электронной эмиссии от E_g и χ не установлено. Показано, что в условиях ионно–лучевого травления под влиянием поверхностного потенциала происходит проникновение электрического поля в объем полупроводника, что приводит к смещению уровней энергии электронов в приповерхностном слое и изменению значения тока вторичных электронов за счет возникновения автоэлектронной эмиссии. Установлено, что сигнал ионно–электронной эмиссии для кремния n -типа проводимости выше, чем для кремния p -типа. Представлена модель ионно–электронной эмиссии с поверхности полупроводников в условиях ионно–лучевого травления, состоящая из: эмиссии с участием электронов зоны проводимости, эмиссии за счет прямого перехода электронов системы ион — атом, автоэлектронной эмиссии под влиянием поверхностного потенциала.

Ключевые слова: ионно–электронная эмиссия, ионно–лучевое травление, ток вторичных электронов, автоэлектронная эмиссия, сродство к электрону, поверхностные электронные состояния, область пространственного заряда.

Введение

Развитие микроэлектроники и переход к наноэлектронике связаны с использованием в том числе наноразмерных слоистых материалов, созданных на основе последних достижений физики тонких пленок. Разработаны нанотехнологии, которые позволяют достигать атомной точности при получении, прежде всего, полупроводниковых наноструктур и включают методы контроля и управления технологическими процессами.

К таким процессам относятся методы ионно–плазменной обработки, в частности ионно–лучевое (ИЛТ) и реактивное ионно–лучевое травление (РИЛТ) [1, 2], применяемые при изготовлении изделий электронной техники (ультрафиолетовые светодиоды, логические устройства нового поколения, полевые гетеротранзисторы) [3].

Стремительное внедрение ионно–плазменных процессов обработки для создания тонкопленочных устройств вызвало развитие методов диагностики поверхности. К ним можно отнести фотометрический и эллипсометрический методы [4], метод лазерной интерферометрии [5], эмиссионно–спектральный и

масс–спектрометрический методы [6], а также зондовые методы [7].

Анализ методов получения информации о динамике ионно–плазменных процессов показал, что в своей основе они или неприемлемы для управления процессом травления, или их применение связано со значительными техническими трудностями [8]. В тоже время проблема автоматизации ионно–плазменных процессов не может быть решена без создания достаточно простых, точных и надежных методов контроля и управления. В процессе ионно–плазменной обработки необходимо иметь информацию о состоянии поверхности, о переходе процесса травления от одного слоя к другому и об окончании процесса травления.

Особенностью процессов ионно–плазменной обработки материалов является воздействие на поверхность энергетических и химически активных частиц плазмы, сопровождающееся возникновением ряда физических явлений. Анализ физических эффектов, возникающих в твердом теле при ионном воздействии на поверхность, позволяет заключить, что наиболее эффективным для контроля и управления процессом травления является использова-

Курочка Александр Сергеевич¹ — кандидат техн. наук, инженер, e-mail: aka_72@bk.ru; Сергиенко Андрей Алексеевич² — кандидат техн. наук, доцент, e-mail: kramz@fryazino.net; Курочка Сергей Петрович² — кандидат техн. наук, доцент, e-mail: kursp@bk.ru; Колыбелкин Виктор Иванович¹ — инженер.

ние вторичных явлений, свойственных процессам ИЛТ и РИЛТ. Одним из вторичных эффектов, сопровождающих ионную бомбардировку твердого тела, является ионно-электронная эмиссия, т. е. выбивание электронов налетающими ионами [9].

Механизм электронной эмиссии с поверхности полупроводников в условиях ИЛТ рассмотрен в литературе не достаточно полно. Авторы работы [10] полагали, что значение тока вторичных электронов с поверхности полупроводников при ИЛТ определяется тремя факторами: энергией, переданной электронам ионным пучком, количеством электронов, получивших дополнительную энергию, и вероятностью выхода вторичного электрона в вакуум. Однако в условиях ИЛТ на поверхности обрабатываемого материала наводится положительный заряд, который проникает на некоторое расстояние в глубь кристалла и оказывает влияние на значение эмиссионного тока в зависимости от типа проводимости полупроводника. Цель работы — установление особенностей ионно-электронной эмиссии в процессе РИЛТ полупроводниковых материалов и влияния таких важнейших для полупроводниковых материалов параметров, как ширина запрещенной зоны E_g , равновесная концентрация носителей заряда ($n_0 \cdot p_0$) при определенной температуре и высота потенциального барьера (сродство к электрону) χ , характеризующая вероятность выхода электрона в вакуум, на величину тока вторичных электронов.

Образцы и методы исследования

В качестве образцов использовали полированные пластины диаметром 50 мм толщиной 0,3 мм из полупроводниковых монокристаллических материалов Ge, Si, GaAs, GaP, SiC собственной проводимости.

Исследования по определению зависимости тока вторичных электронов от ширины запрещенной зоны, высоты потенциального барьера и типа проводимости различных полупроводников при РИЛТ проводили на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Электрическая схема эксперимента представлена на рис. 2 [11].

Эксперименты проводили в смеси газов Ar (80 %) и CF_4 (20 %). Применяли Ar марки «ОЧ». Технические характеристики CF_4 соответствовали требованиям ТУ 301-14-78-92. Рабочее давление в камере составляло 10^{-2} — 10^{-1} Па, плотность потока ионов — 1—2 мА/см².

Узел регистрации 3 (см. рис. 2) вторичных электронов представлял собой металлический цилиндрический контейнер, в котором перпендикулярно к его центральной оси расположен подложкодержатель с образцом. За подложкодержателем параллельно его поверхности размещен приемник электронов, находящийся под положительным относительно «зем-

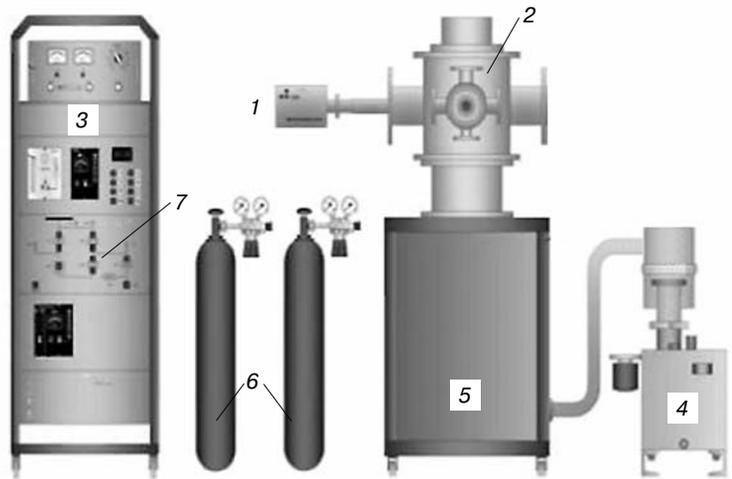


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ионный источник; 2 — вакуумная камера; 3 — блок питания; 4 — форвакуумный насос; 5 — диффузионный насос; 6 — баллоны с газом; 7 — автоматическая система напуска

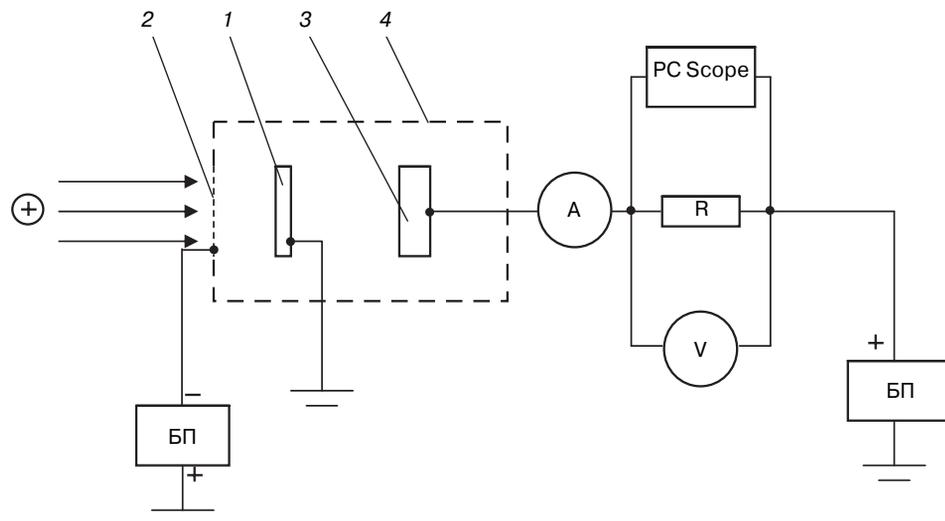


Рис. 2. Электрическая схема эксперимента: 1 — образец; 2 — металлическая сетка; 3 — приемник электронов; 4 — металлический контейнер с диафрагмой БП — блок питания; PC Score — осциллограф; A — амперметр; V — вольтметр; R — резистор

ли» потенциалом (300 В). Входное окно для ионного пучка оснащено металлической сеткой, которая находилась под отрицательным относительно «земли» потенциалом.

Результаты и их обсуждение

В таблице представлены экспериментальные значения тока вторичных электронов $I_{в.э}$, а также справочные данные по E_g и χ для исследованных в работе полупроводников [12].

Четко выраженной зависимости тока вторичных электронов от параметров E_g и χ не установлено.

Относительно механизма выхода в вакуум электронов можно ожидать появления вторичной эмиссии за счет двухэтапного механизма с участием свободных электронов: непосредственно возбуждаемый электрон переходит на уровень Ферми, освободившийся после его ухода уровень занимает электрон зоны проводимости с передачей выделившейся энергии другому электрону, который переходит в вакуум (эффект Оже). Возможен прямой переход в вакуум электронов системы «ион — атом мишени» в результате непосредственного возбуждения за счет энергии, приобретенной при столкновении частиц.

Для уточнения механизма электронной эмиссии с поверхности полупроводников проведено измерение интегрального сигнала электронной эмиссии при травлении кремния n - и p -типа проводимости (КЭФ 7,5 и КДБ 10 соответственно) в смеси газов:

Экспериментальные значения $I_{в.э}$ и параметры E_g и χ для исследованных образцов полупроводниковых материалов

Материал	$I_{в.э}$, мкА	E_g , эВ [12]	χ , эВ [12]
Ge	18	0,67	0,5
Si	22	1,1	0,7
GaAs	4	1,43	0,9
GaP	8	2,24	1,1
SiC	17	3	1,2

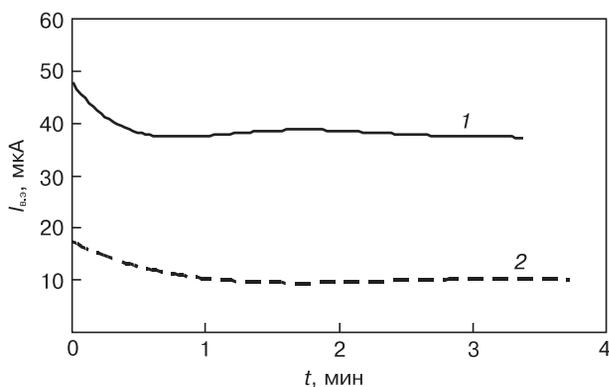


Рис. 3. Зависимости тока вторичных электронов $I_{в.э}$ от времени травления t при травлении кремния n - (1) и p - (2) типа проводимости в смеси газов: Ar (80 %) и CF_4 (20 %)

Ar (80 %) и CF_4 (20 %). Зависимости $I_{в.э}$ от времени травления t для кремния n - и p -типа проводимости представлены на рис. 3.

Значение $I_{в.э}$ для n -Si выше, чем для p -Si. В рамках физики поверхности это превышение объясняется следующим образом. Поверхность является одним из основных дефектов трехмерной структуры кристалла. Обрыв химических связей на поверхности приводит к изменению координационной сферы поверхностных атомов и регибридизации их валентных орбиталей. Во всех практических аспектах физики поверхности используют модель однородной поверхности, в которой все физические свойства однородны в плоскости (x, y), и все изменения физических параметров происходят по направлению нормали к этой плоскости (вдоль оси z).

Общий подход к проблеме электронных свойств как объема, так и приповерхностных областей базируется на зонной теории. В рамках этой теории принято считать, что появление поверхности не приводит к изменению структуры энергетических зон, делокализованных по всему кристаллу состояний, а возникают лишь новые, поверхностные электронные состояния, локализованные на поверхности раздела и способные захватить заряд. Ввиду электронейтральности кристалла в целом в его приповерхностной области накапливается компенсирующий заряд противоположного знака — возникает область пространственного заряда [13].

Кроме того, нарушение электронейтральности приповерхностной области может происходить под действием внешнего электрического поля. Наводимый на поверхности обрабатываемого ионами материала положительный заряд проникает на некоторое расстояние в глубь кристалла. Область пространственного заряда «экранирует» электронейтральный объем кристалла от внешнего поля. Глубина проникновения электрического поля l_D определяется выражением [14]

$$l_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k T}{q^2 (n_0 + p_0)}}, \quad (1)$$

где n_0, p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок в объеме соответственно; ϵ_0 и ϵ — диэлектрическая проницаемость вакуума и полупроводника соответственно; q — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Глубина экранирования зависит от концентрации свободных носителей (n_e). Если для металлов ($n_i = 10^{22} \text{ см}^{-3}$) дебаевская длина l_D составляет 0,1 нм, то для собственного кремния ($n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$) $l_D \approx 25 \text{ мкм}$, для несобственного кремния n -типа проводимости ($n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) $l_D = 0,13 \text{ мкм}$.

Проникновение поля в полупроводник приводит, во-первых, к неопределенности сил, действующих на электрон у поверхности кристалла, и, во-вторых, к смещению уровней энергии электронов в приповерхностном слое вниз (в случае эмиссии электронов).

В условиях ионной бомбардировки поверхности при накоплении положительного заряда в полупроводнике n -типа проводимости создается режим обогащения, при котором основные носители (электроны) притягиваются к поверхности и образуют тонкий слой повышенной концентрации свободных носителей заряда. Таким образом, создаются условия для появления дополнительной составляющей интегрального сигнала эмиссионного тока — автоэлектронной эмиссии.

В настоящее время нет полной физической теории автоэлектронной эмиссии полупроводников. Сложность явления автоэлектронной эмиссии в случае полупроводников заключается в том, что, в отличие от металлов, у которых электроны эмитируются только из зоны проводимости, у полупроводников источником электронов может быть валентная зона, генерирующая электроны за счет ударной ионизации. Кроме того, у некоторых полупроводников поверхностный барьер χ невелик, и он может быть полностью снят внешним полем. Данные предположения выполняются в определенном диапазоне значений напряженности электрического поля E , который составляет $3 \cdot 10^6 < E < 3 \cdot 10^7$ В/см.

В этих условиях концентрация свободных электронов в приповерхностном слое у границы с вакуумом определяется формулой Больцмана:

$$n = n_0 \exp\left(\frac{\Delta R}{kT}\right), \quad (2)$$

где ΔR — величина изгиба зон.

Заключение

Исследованы зависимости тока вторичных электронов от ширины запрещенной зоны E_g и высоты потенциального барьера (сродства к электрону) χ полупроводниковых материалов Ge, Si, GaAs, GaP, SiC. Четко выраженной зависимости интегрального сигнала ионно-электронной эмиссии от E_g и χ не установлено.

Выявлено, что в условиях ИЛТ происходит смещение уровней энергии электронов в приповерхностном слое. Равновесная концентрация электронов n_0 в полупроводнике p -типа проводимости значительно меньше, чем в полупроводнике n -типа проводимости. Этим обстоятельством объяснено меньшее зна-

чение интегрального сигнала электронной эмиссии с поверхности кремния p -типа проводимости.

Показано, что механизм ионно-электронной эмиссии с поверхности полупроводников в условиях ИЛТ можно разделить на три составляющие:

- эмиссия с участием электронов зоны проводимости;
- эмиссия за счет прямого перехода электронов системы ион—атом;
- автоэлектронная эмиссия под влиянием поверхностного потенциала.

Библиографический список

1. Киреев, В. Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии / В. Ю. Киреев. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 428 с.
2. Броудай, И. Физические основы микротехнологии / И. Броудай, Дж. Мерей – М.: Мир, 1985. – 496 с.
3. Ковалев, А. Н. Современные направления и проблемы создания полевых транзисторов на AlGa N/GaN-гетероструктурах / А. Н. Ковалев // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2002. – № 2. – С. 4—15.
4. Орликовский, А. А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: современное состояние и ближайшие перспективы / А. А. Орликовский // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30. – № 5. – С. 323—344.
5. Коронкевич, В. П. Современные лазерные интерферометры / В. П. Коронкевич, В. А. Ханов. – М.: Наука, 1985. – 180 с.
6. Митрофанов, Е. А. Масс-спектрометрические методы контроля технологических процессов травления и формирования пленок / Е. А. Митрофанов, Ю. П. Макшев // Вакуумная техника и технология. – 1992. – Т. 11. – № 4. – С. 59—68.
7. Дудин, С. В. Диагностика плазменных технологических схем: методическое пособие по курсу С. В. Дудин, А. В. Зыков, В. И. Фареник. – Харьков: Харьковский нац. ун-т им. В. Н. Казина, 2009. – 32 с.
8. Курочка, А. С. Особенности электронной эмиссии для контроля процесса реактивного ионно-лучевого травления пленочных гетерокомпозиций: дисс. ... канд. тех. наук / А. С. Курочка – М., 2013. – 149 с.
9. Петров, Н. Н. Эмиссионные процессы при ионной бомбардировке твердых тел / Н. Н. Петров // XXII конф. по эмиссионной электронике. – М., 1994. – Т. 1. – С. 9.
10. Сергиенко, А. А. Особенности кинетической ионно-электронной эмиссии с поверхности металлических и полупроводниковых пленочных материалов в процессе ионно-лучевого травления: дисс. ... канд. техн. наук. / А. А. Сергиенко – М.: МИСиС, 2006. – 144 с.
11. Симакин, С. Б. Неразрушающий контроль процесса ионно-лучевого травления наноразмерных гетероструктур / С. Б. Симакин, А. А. Сергиенко, Г. Д. Кузнецов, А. С. Курочка, С. П. Курочка, Ю. А. Ходос, Н. А. Харламов, М. А. Пушкарев // Заводская лаборатория. – 2011. – Т. 77. – № 3. – С. 28—34.
12. Гольдберг, Ю. А. Омический контакт металл—полупроводник $A^{III}B^V$: методы создания и свойства / Ю. А. Гольдберг // ФТП. – 1994. – Т. 28, вып. 10. – С. 1681—1698.
13. Киселев, В. Ф. Основы физики поверхности твердого тела / Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Затева А. В. – М.: МГУ, 1999. – 284 с.
14. Добрецов, Л. Н. Эмиссионная электроника / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова – М.: Наука, 1996. – 564 с.

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2013 г.

Properties of Ion–Electron Emission from the Surface of Semiconductor Material During Reactive Ion–Beam Etching

Aleksandr Sergeevich Kurochka¹ —Cand. Sci. (Eng.), Engineer (aka_72@bk.ru); Andrei Alekseevich Sergienko² — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor (kramz@fryazino.net); Sergei Petrovich Kurochka² — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor (kursp@bk.ru); Viktor Ivanovich Kolybelkin¹ —Engineer

¹JSC «RPC «Istok» named after Shokin», 2A Vokzalnaya Str., Fryazino, Moscow Region 141190, Russia,

²National University of Science and Technology «MISiS», 4 Leninskiy prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. The existing methods of diagnosis of solid surfaces in ion-plasma processes have been analyzed. We found that the most efficient method of estimating surface condition, determining the transition of the etching process from one layer to another and determining the end of the etching process is the registration of ion–electronic emission during ion–beam etching. Results on secondary electron current for ion beam etching of various semiconductors have been reported. We show the experimental setup and describe the electric circuit for the detection of secondary electrons. An experimental study has been carried out to determine the dependence of secondary electron current on the band gap E_g and the height of the potential barrier (electron affinity) χ of Ge, Si, GaAs, GaP and SiC semiconductor materials. We found no clearly expressed dependence of integral signal of ion–electronic emission on E_g and χ . We show that under the conditions of ion beam etching under the influence of the surface potential the electric field penetrates in the semiconductor volume, leading to a shift in the energy levels of electrons in the surface layer and a change in the secondary electron current due to the appearance of autoelectronic emission. We found that the signal of ion–electronic emission in n -type silicon is higher than in p -type silicon. A model of ion–electronic emission from the surface of semiconductors is presented for the conditions of ion–beam etching, consisting of: emission with the participation of conductivity band electrons, emission due to the direct transition of electrons in the ion – atom system, and autoelectronic emission under the influence of surface potential.

Keywords: ion–electronic emission, ion–beam etching, secondary electron current, autoelectronic emission, electron affinity, surface electron states, the space charge region.

References

1. Kireev V. Y. *Vvedenie v tekhnologii mikroelektroniki i nanotekhnologii* [Introduction to the technology of microelectronics and nanotechnology]. Moscow: FGUP «TsNIIKhM», 2008. 428 p. (In Russ.)
2. Brouday I., Meray J. *Fizicheskie osnovy mikrotekhnologii* [Physical basis of microtechnology]. Moscow: Mir, 1985. 496 p. (In Russ.)
3. Kovalev A. N. Modern trends and challenges of creating field-effect transistors AlGaIn/GaN–heterostructures // *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2002, no. 2, pp. 4–15. (In Russ.)
4. Orlikovskii A. A. Diagnosis of in situ plasma processes in microelectronics: current state and prospects for the next. *Microelectronics = Russian Microelectronics*. 2001, vol. 30, no. 5, pp. 323–344. (In Russ.)
5. Koronkevich V. P., Khanov V. A. *Sovremennye lazernye interferometry* [Modern laser interferometers]. Moscow: Nauka, 1985. 180 p. (In Russ.)
6. Mitrofanov E. A., Makshev Yu. P. Mass spectrometric methods for control of technological processes of etching and film formation. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*. 1992, vol. 11, no. 4, pp. 59–68. (In Russ.)
7. Dudin S. V., Zykov A. V., Farenik V. I. *Diagnostika plazmennyykh tekhnologicheskikh skhem: metodicheskoe posobie po kursu* [Plasma diagnostics of technological schemes: textbook for the course]. Khar'kov: Khar'kovskii natsional'nyi universitet im. V. N. Kazina, 2009. 32 p. (In Russ.)
8. Kurochka A. S. *Osobennosti elektronnoi emissii dlya kontrolya protsessov reaktivnogo ionno–luchevogo travleniya plenchnyykh geterokompozitsii* [Features of electronic emission for control of process of a reactive ion–beam etch of thin film heterocompositions]: dis. kand. tekhn. nauk. Moscow, 2013. 149 p. (In Russ.)
9. Petrov N. N. *Emissionnyye protsessy pri ionnoi bombardirovke tverdykh tel* [Emission processes during ion bombardment of solids]. XXII konf. po emissionnoi elektronike. Moscow, 1994, vol. 1, p. 9. (In Russ.)
10. Sergienko A. A. *Osobennosti kineticheskoi ionno–elektronnoi emissii s poverkhnosti metallicheskih i poluprovodnikovyykh plenchnyykh materialov v protsesse ionno–luchevogo travleniya* [Features kinetic ion–electronic emission from the surface of the metal and semiconductor thin film materials in the process of ion beam etching]: dis. kand. tekhn. nauk. Moscow, 2006. 144 p. (In Russ.)
11. Simakin S. B., Sergienko A. A., Kuznetsov G. D., Kurochka A. S., Kurochka S. P., Khodos Yu. A., Kharlamov N. A., Pushkarev M. A. Nondestructive Control of Ion–Beam Etching of Nanoscale Heterostructures. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov = Industrial Laboratory*. 2011, vol. 77, no. 3, pp. 28–34. (In Russ.)
12. Goldberg Y. A. Ohmic contact metal–semiconductor $A^{III}B^V$: Methods establishment and properties. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*. 1994, vol. 28, iss. 10, pp. 1681–1698. (In Russ.)
13. Kiselev V. F., Kozlov S. N., Zateev A. V. *Osnovy fiziki poverkhnosti tverdogo tela* [Basic physics solid surface]. Moscow: Moscow State University, 1999. 284 p. (In Russ.)
14. Dobretsov L. N., Gomoyunova M. V. *Emissionnaya elektronika* [Emission electronics]. Moscow: Nauka, 1996. 564 p. (In Russ.)

Received February 22, 2013



Реклама

Издательский Дом МИСиС предлагает:

Научно-образовательные центры МИСиС / Колл. авторов. – М. : Издательский дом МИСиС, 2010. – 176 с.
ISBN 978-5-87623-363-9

Представлена информация о научно-образовательных центрах различного профиля Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», ориентированных на потребителя как научной продукции, так и образовательных услуг. Подобные центры — новая форма организации научно-исследовательской и учебной работы в системе высшего образования в современных рыночных условиях.

Книга представляет большой интерес для научных и инженерно-технических работников, производителей наукоемкой продукции и специалистов, занятых в областях разработки новых материалов и высоких технологий, а также для руководителей организаций и предприятий, заинтересованных в целевой подготовке высококвалифицированных специалистов.

Книгу можно приобрести за наличный и безналичный расчет

Адрес: Ленинский проспект, д. 4,
главный корпус МИСиС,
цокольный этаж.
Тел.: (495) 638-44-28,
(495) 638-45-31