

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. DIELECTRICS

Известия высших учебных заведений. *Материалы электронной техники*. 2015. Т. 18, № 3. С. 195–200.
ISSN 1609-3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-3-195-200

УДК 621.315.61

Представлена серия экспериментальных исследований с целью подтверждения основных теоретических аспектов ионно–электронной эмиссии. Установлена возможность практической реализации метода оперативного контроля процессов реактивного ионно–лучевого травления различных диэлектрических тонкопленочных материалов электронной техники.

Проведена серия экспериментов по изучению электронной эмиссии на специально сформированных тонкопленочных многослойных гетерокомпозициях: $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}/\text{Si}$, $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{Si}$.

Приведена оценка влияния наведенного поверхностного потенциала в диэлектрической пленке на интегральный сигнал вторичных электронов при реактивном ионно–лучевом травлении. Обоснована зависимость эмиссионных свойств тонких диэлектрических пленок от электрического поля, образованного в диэлектрике поверхностным потенциалом, наводимым ионным пучком в процессе реактивного ионно–лучевого травления.

Отмечено, что уровень тока вторичных электронов с поверхности диэлектрических пленок, осажденных на подложки из различных материалов, отличается по величине, т. е. определяется эмиссионными свойствами подложки. Показано, что напряженность электрического поля, возникающая в диэлектрической пленке под влиянием наведенного потенциала, создает предпосылки для возникновения малтеровской эмиссии, определяемой свойствами собственно диэлектрика и свойствами подложки.

Ключевые слова: ионно–электронная эмиссия, реактивное ионно–лучевое травление, ток вторичных электронов, наведенный поверхностный потенциал, сродство к электрону, напряженность электрического поля, эмиссия Малтера.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО–ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В ПРОЦЕССЕ РЕАКТИВНОГО ИОННО–ЛУЧЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

© 2015 г. А. С. Курочка¹,
А. А. Сергиенко², С. П. Курочка²

¹АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина»,
ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия

²Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Введение

Использование сигнала ионно–электронной эмиссии для контроля процесса реактивного ионно–лучевого травления (РИЛТ) приобретает особое значение при формировании гетероструктур, включающих тонкие диэлектрические пленки [1–4].

Исследованию ионно–электронной эмиссии с поверхности массивных диэлектриков посвящены работы [5–7]. Установлено, что значение коэффициента ионно–электронной эмиссии γ (КИЭЭ) для них в 10–100 раз выше, а пороговое значение энергий для кинетической эмиссии на порядок меньше, чем для металлов. Существенный вклад в электронную эмиссию дает возбуждение

электронов из валентной зоны диэлектрика, т. е. кинетическое вырывание электронов из диэлектрика носит объемный характер.

В то же время опубликованные результаты по ионно–электронной эмиссии в процессе ионно–лучевого травления (ИЛТ), включая РИЛТ, тонких диэлектрических пленок ограничены. В работе [8] проведен сравнительный анализ относительного изменения КИЭЭ для металлических, оксидных и нитридных тонких пленок при магнетронном травлении ионами Ar^+ (рис. 1).

В работе [8] исследовано влияние наведенного поверхностного потенциала в диэлектрической пленке на интегральный сигнал вторичных электронов при ионном травлении.

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

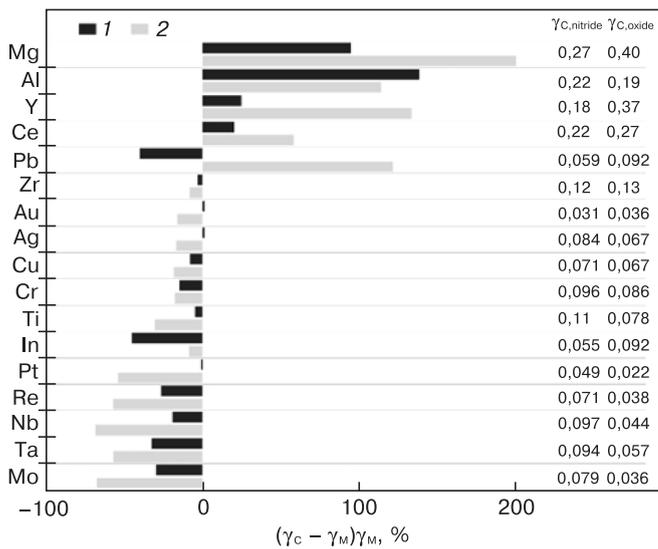


Рис. 1. Анализ относительного изменения КИЭЭ для металлических, оксидных и нитридных тонких пленок при магнетронном травлении ионами Ar^+ : 1 — оксиды; 2 — нитриды; γ_m — КИЭЭ металла; γ_c — КИЭЭ соединения

Fig. 1. Analysis of Relative Ion–Electron Emission Coefficient (IEEC) γ of Metallic, Oxide and Nitride Thin Films for Magnetron Ar^+ Ion Beam Etching: (1) oxides, (2) Nitrides, γ_m IEEC of Metal and γ_c IEEC of Compound

Показано, что наблюдается увеличение γ_c оксидных пленок Al_2O_3 , MgO , GeO_2 , PbO_2 , YO_2 относительно γ_m этих металлов. Относительное уменьшение γ_c оксидов остальных металлов объясняется преимущественным ионным распылением кислорода с образованием субоксидов MeO_x , где $x < 2$.

Нитриды металлов подразделяются на две группы материалов. Первая группа характеризуется ионно–ковалентной связью и относится к полупроводниковым материалам (AlN , $E_g = 6,7$ эВ; Mg_2N_3 , $E_g = 2,8$ эВ; GeN , $E_g = 1,76$ эВ; YN , $E_g = 1,5$ эВ). Для этих нитридов наблюдается относительное увеличение γ .

Вторая группа нитридов относится к полупроводникам с минимальной запрещенной зоной (CrN , $E_g = 0,07$ эВ; Cu_3N , $E_g = 0,23$ эВ; InN , $E_g = 0,67$ эВ) или, обладая металлической связью, является проводящей керамикой (ReN , TaN , TiN , NbN , ZrN). Для этой группы нитридов наблюдается относительное уменьшение γ_c .

Изменение значений γ_c оксидов и нитридов металлов обосновывается их электронными свойствами.

Ниже рассмотрены закономерности изменения тока вторичных электронов $I_{в.э}$ при РИЛТ гетероструктур, содержащих пленки нитридов и оксидов.

Образцы и методы исследования

Для проведения эксперимента по электронной эмиссии были изготовлены тонкопленочные многослойные гетерокомпозиции:

– диэлектрик/полупроводник (Si_3N_4/Si);

– диэлектрик/металл/полупроводник ($Ta_2O_5/Al/Si$);

– металл/диэлектрик/полупроводник ($Al/TiO_2/Si$).

Пленки нитрида кремния формировали плазмохимическим осаждением путем введения силана в азотный разряд при частоте поля 13,56 МГц, мощности разряда 20 Вт и давлении в камере 50 Па.

Диэлектрические пленки TiO_2 , Ta_2O_5 формировали методом реактивного магнетронного распыления металлических мишеней Ti , Ta при напряжении разряда 380 В и токе разряда 1,2 А в смеси газов Ar (75 %) + O_2 (25 %) и остаточном давлении 1,33 Па. Толщина пленок составляла ≈ 100 нм.

Подготовленные образцы многослойных структур были подвергнуты РИЛТ в смеси газов Ar (80 %) + CF_4 (20 %) с контролем интегрального сигнала тока вторичных электронов в процессе травления.

Принципиальная электрическая схема измерения тока вторичных электронов $I_{в.э}$ представлена на рис. 2.

Разработана универсальная и оригинальная конструкция устройства контроля сигнала ионно–электронной эмиссии (рис. 3), позволяющая улавливать именно вторичные электроны, эмитированные обрабатываемой поверхностью подложек диаметром до 150 мм. Подробно методика измерения изложена в работе [9].

В проводник, соединяющий блок питания и приемник электронов, подключен резистор, чтобы получить падение напряжения на нем, обусловленное прохождением в проводнике электрического тока при захвате приемником эмитированных электронов. Это напряжение в дальнейшем фиксируется систе-

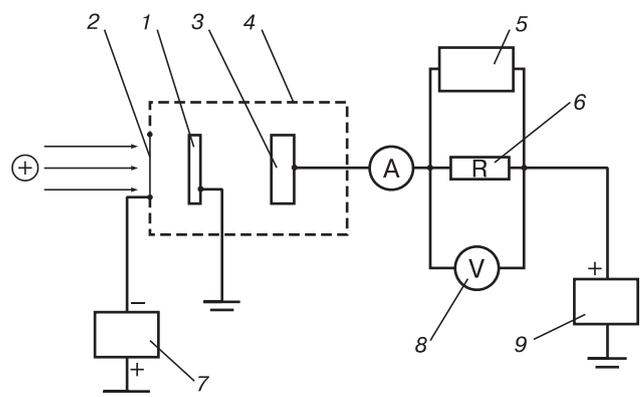


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема измерения тока вторичных электронов:

1 — образец; 2 — металлическая сетка; 3 — приемник электронов; 4 — металлический контейнер с диафрагмой; 5 — цифровой осциллограф PC Scope; 6 — резистор; 7 — блок питания экранирующей сетки; 8 — вольтметр; 9 — источник питания

Fig. 2. Electrical Diagram of Secondary Ion Current Measurement: (1) Specimen, (2) Metallic Grid, (3) Electron Receiver, (4) Metallic Container with Diaphragm, (5) PC Scope Digital Oscilloscope, (6) Resistance, (7) Screening Grid Power Unit, (8) Voltmeter and (9) Power Source

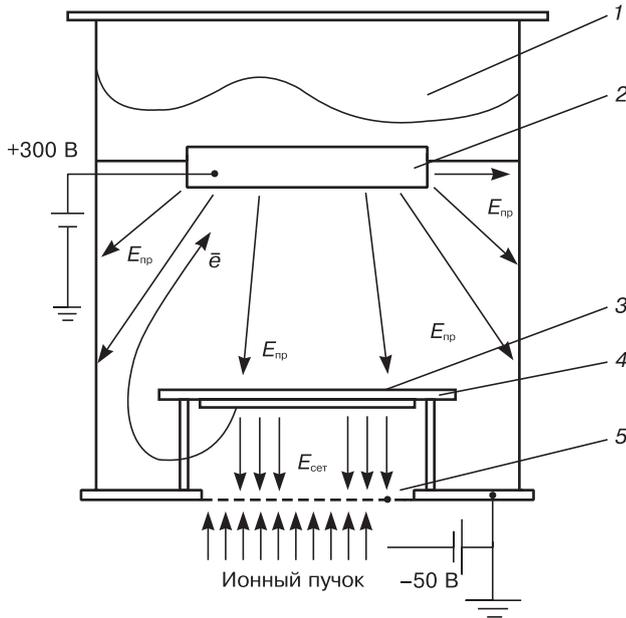


Рис. 3. Устройство контроля сигнала ионно-электронной эмиссии:
 1 — цилиндрический контейнер; 2 — приемник электронов; 3 — подложкодержатель; 4 — образец; 5 — экранирующая сетка; $E_{еп}$ — напряженность электрического поля, создаваемого приемником электронов; $E_{сет}$ — напряженность электрического поля, создаваемого экранирующей сеткой

Fig. 3. Ion-Electron Emission Signal Control Device:
 (1) Cylindrical Container, (2) Electron Receiver, (3) Substrate Holder, (4) Specimen, (5) Screening Grid, E_{rec} Electron Receiver Electric Field and E_{grd} Screening Grid Electric Field

мой PC Score, которая дает возможность не только получать численное значение этого напряжения в данный момент времени, но и чертить диаграмму временной зависимости изменения напряжения.

Устройство контроля состоит из металлического цилиндрического контейнера 4, в котором расположен подложкодержатель с образцом 1. Приемник электронов 3 размещен за подложкодержателем (см. рис. 1). В нижнем основании контейнера 4 имеется входное окно для ионного пучка, оснащенное экранирующей металлической сеткой 2 (см. рис. 1).

Для предотвращения попадания первичных частиц, заряженных вторичных частиц (отрицательных и положительных ионов) и третичных электронов приемник электронов расположен за исследуемым образцом.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений тока вторичных электронов в процессе ионного травления представлены на рис. 4.

Уровень интегрального сигнала тока вторичных электронов с поверхности исследуемых структур подобен аналогичному сигналу для металлических и полупроводниковых материалов [9].

Согласно основным положениям физики поверхности, можно предположить, что эмиссионные свойства тонких диэлектрических пленок зависят от

электрического поля, образованного в диэлектрике поверхностным потенциалом, наводимым ионным пучком в процессе ионного травления. Поверхностный потенциал, наводимый ионным пучком в исследованных диэлектрических пленках при насыщении тока вторичных электронов, улавливаемых приемником, определяли по методике, изложенной в работе [10]. Разрядное напряжение устанавливали на уровне 1 кВ, ток ионов — 50 мА, насыщение тока вторичных электронов фиксировали при потенциале на приемнике до 300 В. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Из полученных результатов следует, что при малых значениях потенциала, подаваемого на приемник $U_{пр}$, в технологическом пространстве рабочей камеры возникает электрическое поле, недостаточное для улавливания части вторичных электронов. С увеличением $U_{пр}$ количество электронов, способных достичь поверхности приемника, увеличивается, и при достижении некоторого граничного значения $U_{пр} = U_{гр}$ наступает насыщение тока вторичных электронов.

Потенциал, при котором происходит насыщение тока вторичных электронов $U_{гр}$ для диэлектрических

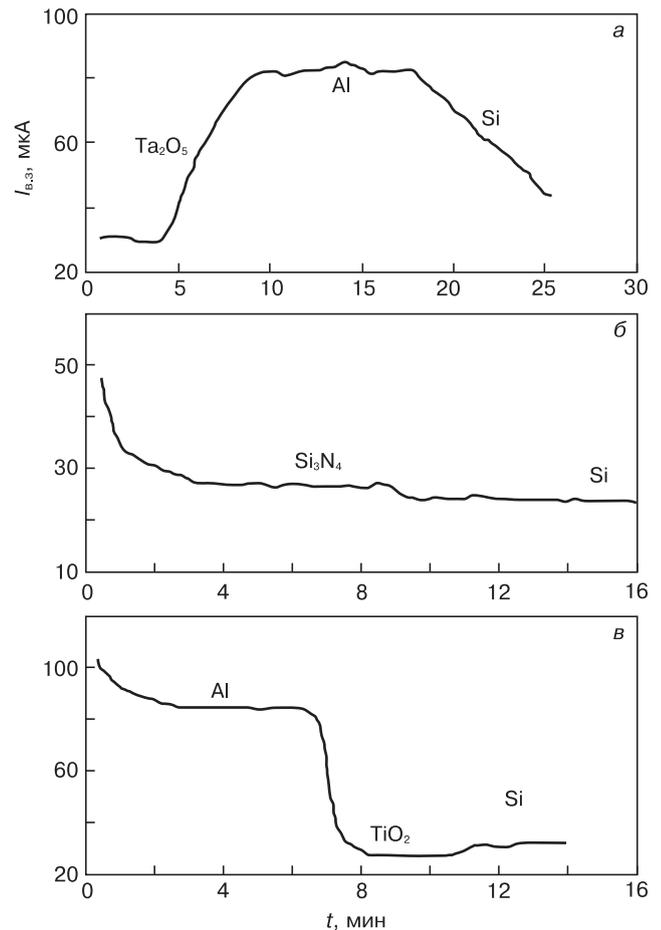


Рис. 4. Зависимости тока вторичных электронов $I_{с.э.}$ от времени травления t структур в смеси газов Ar (80 %) + CF_4 (20 %):
 а — $Ta_2O_5/Al/Si$; б — Si_3N_4/Si ; в — $Al/TiO_2/Si$
 Fig. 4. Secondary Ion Current I_{se} as a Function of Structure Etching Time t in Ar (80 %) + CF_4 (20 %) Gas Mixture:
 (a) $Ta_2O_5/Al/Si$; (б) Si_3N_4/Si ; (в) $Al/TiO_2/Si$

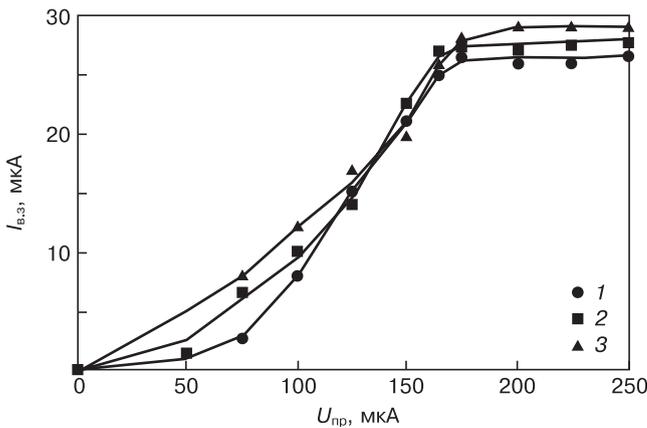


Рис. 5. Зависимость тока вторичных электронов $I_{в.э}$ от потенциала на приемнике электронов $U_{пр}$:
 1 — $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$; 2 — $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{Si}$; 3 — $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}/\text{Si}$
 Fig. 5. Secondary Ion Current I_{se} as a Function of Electron Receiver Potential U_{rc} :
 (1) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$; (2) $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{Si}$; (3) $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}/\text{Si}$

пленок Si_3N_4 составил 180 В, Ta_2O_5 — 210 В, TiO_2 — 190 В (± 5 В).

Поверхностный потенциал, создаваемый ионным пучком, на поверхности диэлектрической пленки определяли по формуле [8]

$$\Phi_n = \frac{r_i}{\sqrt{\pi L}} U_{гр},$$

где r_i — радиус ионного пучка на поверхности пленки; L — расстояние между подложкой и приемником.

В таблице приведены полученные значения поверхностного потенциала Φ_n и напряженности электрического поля E в объеме диэлектрической пленки.

На рис. 6 представлена энергетическая диаграмма структуры $\text{Al}/\text{TiO}_2/n\text{-Si}$ в исходном состоянии и при положительном потенциале на пленке Al [11].

Известно, что ширина запрещенной зоны TiO_2 составляет 3,2 эВ, а потенциальный барьер на границе Si/TiO_2 — 1 эВ. Уровень Ферми алюминия совпадает с положением края зоны проводимости кремния. Потенциальный барьер на границе Al/TiO_2 составляет 1 эВ. При появлении положительного потенциала на пленке TiO_2 в приповерхностном слое $n\text{-Si}$ создается режим обогащения, и электроны инжектируются в диэлектрик. В дальнейшем под влиянием сильного электрического поля электрон может покинуть диэлектрик и выйти в вакуум.

Подобный вид электронной эмиссии называется малтеровской [12].

В структуре металл/диэлектрик при наличии положительного потенциала на диэлектрической пленке электроны инжектируются из металла в диэлектрик. Для уточнения механизма малтеровской эмиссии необходимо проанализировать физические процессы, происходящие в диэлектрической пленке под влиянием внутреннего электрического поля. Энергетическая диаграмма структуры в системе

Поверхностный потенциал и напряженность электрического поля в объеме исследованных диэлектрических пленок
 [Surface Potential and Electric Field Magnitude in the Bulk of Test Dielectric Films]

Пленка	Φ_n , В	E , 10^7 В/м
Si_3N_4	20,8	21
Ta_2O_5	24,3	24,3
TiO_2	21,9	21,9

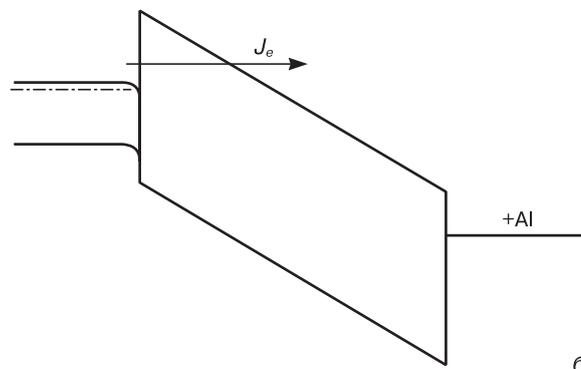
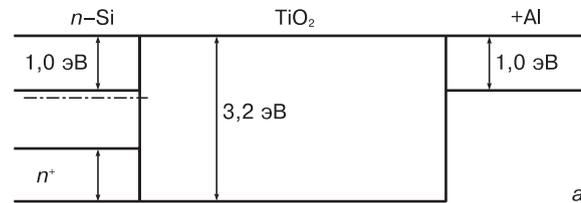


Рис. 6. Энергетическая диаграмма структуры $\text{Al}/\text{TiO}_2/n\text{-Si}$ в исходном состоянии (а) и при положительном потенциале на пленке Al (б) [11]

Fig. 6. Energy Diagram of $\text{Al}/\text{TiO}_2/n\text{-Si}$ Structure: (a) Initial Condition and (б) Positive Bias on Al Film [11]

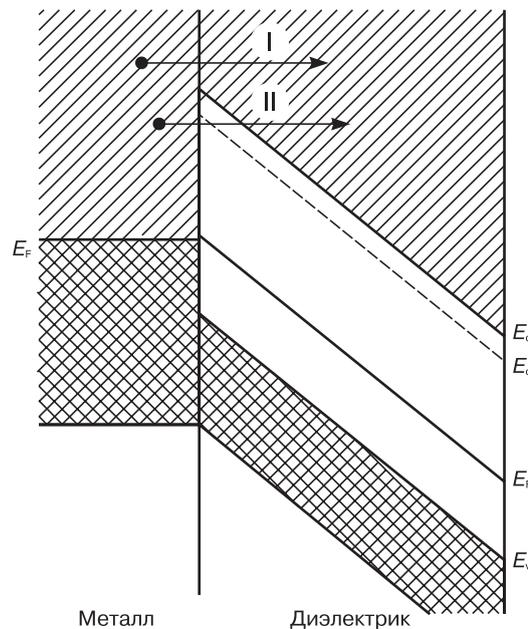


Рис. 7. Зонная диаграмма структуры в системе металл/диэлектрик при наличии поля в диэлектрике [12]

Fig. 7. Zone Diagram of Metal/Dielectric System with Field in Dielectric [12]

металл/диэлектрик при наличии поля в диэлектрике представлена на рис. 7.

Возможны три области возникновения потенциала в структуре: граница структуры «металлическая пленка/диэлектрическая пленка», материал диэлектрика, поры в пленке диэлектрика. Потенциальный барьер на границе структуры металл/диэлектрик понижается наведенным электрическим полем. По этой причине возможны переходы тепловозбужденных электронов над уровнем электрохимического потенциала E_F из зоны проводимости металла в зону проводимости диэлектрика (переход I). Возможны переходы туннелированием невозбужденных электронов с уровней металла в зону проводимости диэлектрика (переход II).

В тонкой пленке диэлектрика возможны два вида туннелирования электронов: из валентной зоны диэлектрика в его зону проводимости и переход с уровней доноров в зону проводимости. Электроны инжектируются из подложки (металл или полупроводник) в диэлектрическую пленку и при наличии поля дрейфуют в зоне проводимости сквозь слои. Часть электронов захватывается ловушками. При достаточно тонком слое диэлектрика другая часть этого потока, накопив энергию, равную или большую энергии сродства $\chi_{ср}$, может выйти в вакуум. Если накопленная энергия электрона, отсчитанная от дна зоны проводимости, превысит разность значений энергии дна зоны проводимости и энергии электрона на локальном уровне, то движущийся в зоне проводимости электрон может ионизировать донор.

Если значение энергии электрона в зоне проводимости превысит значения энергии ширины запрещенной зоны E_g , то такой электрон может возбудить электрон с основного уровня с образованием дырки. Электроны зоны проводимости могут рекомбинировать с дырками с испусканием фотонов. Процессы возбуждения электронов с основного и донорного уровней увеличивают концентрацию электронов в зоне проводимости [12].

Существенная роль в механизме эмиссии Малтера отводится пористости пленки диэлектрика. Свободные пробеги электронов в порах соизмеримы с линейными размерами пор вдоль поля. При движении в порах электроны могут накопить энергию, достаточную для ударной ионизации, увеличивающей количество электронов в зоне проводимости диэлектрика.

Следует отметить, что уровень тока вторичных электронов с поверхности диэлектрических пленок, осажденных на подложки из различных материалов, отличается по величине, т. е. определяется эмиссионными свойствами подложки. На рис. 8 представлены временные зависимости тока вторичных электронов для пленки Si_3N_4 , сформированной в едином технологическом процессе в гетероструктурах $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ и $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}$.

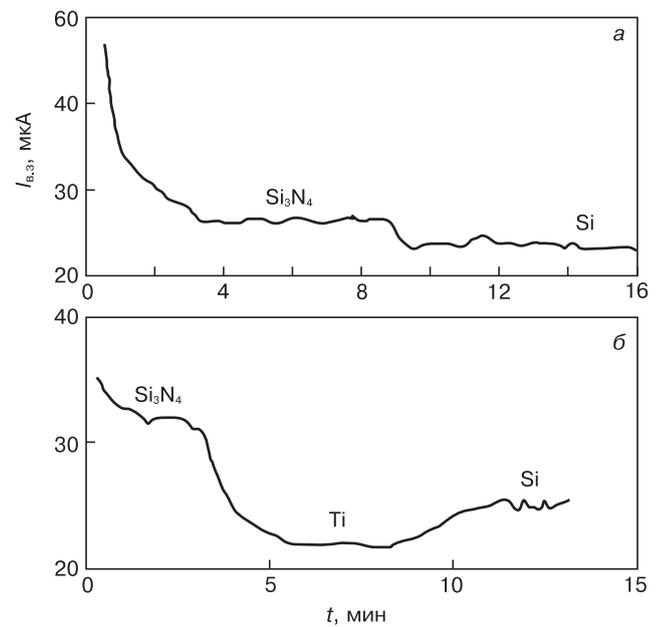


Рис. 8. Зависимости тока $I_{e,3}$ от времени травления структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ (а) и $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}$ (б) в смеси газов Ar (80 %) + CF_4 (20 %)

Fig. 8. Secondary Ion Current I_{se} as a Function of (a) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ and (б) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}$ Structure Etching in Ar (80 %) + CF_4 (20 %) Gas Mixture

Ток вторичных электронов с поверхности структуры $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}$ выше, чем ток с поверхности структуры $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$, что соответствует по относительной величине значениям тока вторичных электронов с поверхности Ti и $n\text{-Si}$.

Заключение

Экспериментальные исследования тонкопленочных структур: диэлектрик/полупроводник, диэлектрик/металл/полупроводник, металл/диэлектрик/полупроводник, позволили оценить влияние наведенного поверхностного положительного потенциала на значение тока вторичных электронов. Проведена теоретическая оценка значений наведенного потенциала, который для пленки Si_3N_4 составил 20,8 В, для пленки Ta_2O_5 — 24,3 В, для пленки TiO_2 — 21,3 В.

Напряженность электрического поля, возникающая в диэлектрической пленке под влиянием наведенного потенциала, создает предпосылки для появления малтеровской эмиссии, определяемой свойствами собственно диэлектрика и свойствами подложки.

Показано, что разработанный метод контроля поверхности в условиях РИЛТ соответствует требованиям метода технологической и экспериментальной диагностики тонкопленочных гетероструктур посредством регистрации изменения тока вторичных электронов.

Библиографический список

1. Тешев, Р. Ш. Электронно-эмиссионный контроль процесса ионно-лучевого травления слоистых гетерокомпозиций / Р. Ш. Тешев, Г. Д. Кузнецов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. — 2002. — № 2. — С. 57—62.

2. Кислов, Н. М. К модели выхода вторичных электронов из металлов и полупроводников при ионной обработке поверхности / Н. М. Кислов, Г. Д. Кузнецов, А. А. Сергиенко, С. Б. Симакин // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2004. – № 4. – С. 63–67.
3. Кузнецов, Г. Д. Электронная эмиссия в процессе реактивного ионно–лучевого травления материалов электронной техники / Г. Д. Кузнецов, А. С. Курочка, А. А. Сергиенко, С. П. Курочка // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2011. – № 3. – С. 62–67.
4. Кузнецов, Г. Д. Элионная технология в микро- и нанодустрии. Неразрушающие методы контроля процессов осаждения и травления наноразмерных пленочных гетерокомпозиций / Г. Д. Кузнецов, А. А. Сергиенко, С. Б. Симакин и др. – М.: МИСИС, 2012. – 122 с.
5. Брусиловский, Б. А. Кинетическая ионно–электронная эмиссия / Б. А. Брусиловский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 182 с.
6. Farid, N. Kinetics of ion and prompt electron emission from laser-produced plasma / N. Farid, S. S. Harilal, H. Ding, A. Hassanein // *Physics of plasma*. – 2013. – V. 20. – P. 073114 (9pp). DOI: 10.1063/1.4816710
7. Cernusca, S. Ion-induced kinetic electron emission from

- HOPG with different surface orientation / S. Cernusca, M. Fürsatz, H. P. Winter, F. Aumayr // *Europhys. Lett.* – 2005. – V. 70, N 6. – P. 768–774.
8. Depla, D. Determination of the effective electron emission yields of compound materials / D. Depla, X. Y. Li, S. Mahieu, R. Degryse // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – V. 41, N 20. – P. 202003 (4pp). DOI: 10.1088/0022–3727/41/20/202003
9. Курочка, А. С. Особенности электронной эмиссии для контроля процесса реактивного ионно–лучевого травления пленочных гетерокомпозиций: Дис. ... канд. техн. наук / А. С. Курочка – М.: МИСИС, 2013. – 149 с.
10. Бондаренко, Г. Г. Определение потенциала поверхности диэлектрического слоя на мишени, бомбардируемой ионным пучком / Г. Г. Бондаренко, А. И. Бажин, А. П. Коржавый, В. И. Кристья, Р. Д. Аитов // *ЖТФ*. – 1998. – Т. 68, № 9. – С. 126–128.
11. Гриценко, Д. В. Двухзонная проводимость TiO_2 / Д. В. Гриценко, С. С. Шаймеев, В. В. Атучин, Т. И. Григорьева, Л. Д. Покровский, О. П. Пчеляков, В. А. Гриценко, А. Л. Асеев, В. Г. Лифшиц // *Физика твердого тела*. – 2006. – Т. 48, вып. 2. – С. 210–213.
12. Добрецов, Л. Н. Эмиссионная электроника / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. – М.: Наука, 1996. – 564 с.

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2015 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* = *Materials of Electronic Technics*. 2015, vol. 18, no. 3, pp. 195–200.

Investigation of Ion–Electron Emission in the Process of Reactive Ion–Beam Etching of Dielectric Thin Film Heterostructures

Alexander S. Kurochka¹ — Cand. Sci. (Eng.), engineer (aka_72@bk.ru); Andrey A. Sergienko² — Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor (kramz@fryazino.net); Sergey P. Kurochka² — Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor (kursp@bk.ru).

¹JSC «RPC «Istok» named after Shokin», 2A, Vokzalnaya Ul., Fryazino, Moscow Region 141190, Russia
²National University of Science and Technology «MISIS», 4 Leninskiy Prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. This work presents a series of experimental studies aimed at validating the main theoretical aspects of ion–electron emission. Possibilities of practical implementation of the method of operative control of reactive ion–beam etching of different dielectric thin film materials for electronics have been found. To obtain results on electron emission we have conducted a series of experiments with a specially synthesized thin–multilayer heterogeneous compositions, i.e. $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}/\text{Si}$ and $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{Si}$. Assessment of the effect of induced surface potential in the dielectric film on the integral signal of secondary electrons during reactive ion–beam etching allows one to confirm the dependence of the emission properties of thin dielectric films on the electric field formed in the dielectric by the surface potential induced by the ion beam during reactive ion–beam etching. We have noted that the secondary electron current emitted from the surface of dielectric films deposited on substrates of different materials differs in magnitude, i.e., it is determined by the emission properties of the substrate. The electric field produced in the dielectric film by the induced potential creates preconditions for the emergence of Malter emission determined by the properties of the dielectric and the substrate.

Keywords: ion–electron emission, reactive ion beam etching, secondary electron current, induced surface potential, electron affinity, electric field intensity, Malter emission.

References

1. Teshev R. Sh., Kuznetsov G. D. Electron emission testing process of ion–beam etching of layered heterogeneity. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2002, no. 2, pp. 57–62.
2. Kislov N. N., Kuznetsov G. D., Sergienko A. A., Simakin S. B. The model of secondary electrons yield from metals and semiconductors during ion beam bombardment of surface. *Izvestiya vuzov.*

Materialy elektronnoy tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2004, no. 4, pp. 63–67.

3. Kuznetsov G. D., Kurochka A. S., Sergienko A. A., Kurochka S. P. Electron emission during reactive ion beam etching of materials for electronic. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2011, no. 3, pp. 62–67.
4. Kuznetsov G. D., Sergienko A. A., Simakin S. B. etc. *Elionnaya tekhnologiya v mikro- i nanoindustrii: nerazrushayushchie metody kontrolya protsessov osazhdeniya i travleniya nanorazmernykh plenochnykh geterokompozitsii: uchebnoe posobie* [Elion technology in micro- and nanotechnology: non-destructive control methods of deposition and etching of nanosize film heterocompositions]. Moscow: MISIS, 2012. 122 p.
5. Brusilovsky B. *Kineticheskaya ionno–elektronnaya emissiya* [Kinetic ion–electron emission]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 182 p.
6. Farid N., Harilal S. S., Ding H., Hassanein A. Kinetics of ion and prompt electron emission from laser-produced plasma. *Phys. Plasmas*, 2013, vol. 20, no. 7, pp. 073114–1–073114–9. DOI: 10.1063/1.4816710.
7. Cernusca S., Fürsatz M., Winter H. P., Aumayr F. Ion-induced kinetic electron emission from HOPG with different surface orientation. *Europhys. Letters*. 2005, vol. 70, no. 6, pp. 768–774.
8. Depla D., Li X. Y., Mahieu S., Degryse R. Determination of the effective electron emission yields of compound materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008, vol. 41, no. 20. pp. 202003–1–202003–4. DOI: 10.1088/0022–3727/41/20/202003
9. Kurochka A. S. *Osobennosti elektronnoy emissii dlya kontrolya protsessov reaktivnogo ionno–luchevogo travleniya plenochnykh geterokompozitsii*: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Features of electronic emission for control of process of a reactive ion–beam etch of thin film heterocompositions: dis. Can. Sci.]. Moscow: MISIS, 2013. 149 p.
10. Bondarenko G. G., Bazhin A. I., Korzhavyi A. P., Kristya V. I., Aitov R. D. Determination of the surface potential of a dielectric layer on a target bombarded by an ion beam. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* = *Technical Physics*. 1998, vol. 68, no. 9, pp. 126–128.
11. Gritsenko D. V., Shaimееv S. S., Atuchin V. V., Grigor'eva T. I., Pokrovskii L. D., Pchelyakov O. P., Gritsenko V. A., Aseev A. L., Lifshits V. G. Two–band conduction in TiO_2 . *Fizika tverdogo tela* = *Physics of the Solid State*. 2006, vol. 48, no. 2, pp. 210–213.
12. Dobretsov L. N., Gomoyunova M. V. *Emissionnaya elektronika* [Emission electronics]. Moscow: Nauka, 1996. 564 p.

Received April 2, 2015