

06

## Исследование состава неконтролируемых примесей, их химических состояний и профиля распределения на границе рездела Al–Si

© А.А. Абдувайитов, Х.Х. Болтаев

Ташкентский государственный технический университет,  
100095 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: xurshid@pochta.ru

(Поступило в Редакцию 8 августа 2014 г.)

Методом оже-электронной спектроскопии и вторичной ионной масс-спектроскопии были исследованы композиции атомов неконтролируемых примесей и их химический состав, а также профили распределения атомов на границе Al–Si. В Al обнаружены примесные атомы C, O, N, Ti, Fe и др. в низких концентрациях ( $< 0.1\%$ ). Анализ химических сдвигов оже-пииков атомов металлов показал, что на границе системы Al–Si формируются соединения типа AlO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Введение

Полупроводниковые приборы часто выходят из строя из-за ухудшения контакта в результате его окисления, ухудшения адгезии контактной пленки к подложке–полупроводнику, загрязнения контакта, особенно под контактной областью, различными вредными химически активными примесями, элементами и т.д. [1–4]. Протеканию этих процессов способствуют, очевидно, деформация кристаллической решетки и соответственно появление в ней различных дефектов. Причиной образования таких дефектов под контактной областью является несоответствие кристаллических решеток полупроводника и материала металлического контакта. В работах [5,6] всесторонне исследована структура границ рездела нанометровой толщины, подвергнутой термообработке в интервале  $T = 330–870$  К. Послойный анализ, проведенный методом электронографии на отражение, показал, что на границе рездела фаз образуется аморфный слой кремния нанометровой толщины. Возникновение этого слоя и изменение его состава и структуры при прогреве объясняется процессом низкотемпературной диффузии атомов. Установлена корреляция между структурными изменениями на границе Al–Si и электронными свойствами. Кроме этих факторов на окисление контакта и загрязнение его различными элементами существенно влияют условия нанесения контакта и наличие химически активных элементов в составе полупроводников и материалов металлических контактов. Однако результаты подобных исследований в литературе пока еще отражены недостаточно.

В настоящей работе изучены состав неконтролируемых примесей, содержащихся в подложке (Si) и контактирующем металле (Al), и их профили распределения по глубине на границе рездела Al–Si.

### 1. Методика эксперимента

Исследования проводились с помощью методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС) и вторичной ион-

ной масс-спектроскопии (ВИМС). ВИМС снимались в модернизированной стандартной установке МИ-1200 Б с использованием ионов Cs<sup>+</sup>. Спектры оже-электронов регистрировались в виде первой, а также второй производных энергораспределения с помощью электростатического анализатора типа Юза–Рожанского с разрешающей способностью  $\Delta E/E = 0.2\%$  при вакууме  $(1–3) \cdot 10^{-8}$  Па. Профили распределения атомов по глубине определены методом ОЭС в сочетании с травлением поверхности ионами Ar<sup>+</sup>. Энергия ионов Ar<sup>+</sup> варьировалась в пределах от 1 до 20 keV при плотности тока  $j = 20–25 \mu\text{A}/\text{cm}^{-2}$ . Методика эксперимента подробно описана в [3]. Пленки Al толщиной 0.5–1  $\mu\text{m}$ , осаждены на поверхность нагретого до  $\sim 400$  К Si методом термического испарения при вакууме  $\sim 10^{-5}$  Па. Перед напылением поверхность Si (111) очищалась прогревом до  $\sim 1500$  К, а в ряде случаев в сочетании с ионным травлением. После очистки на поверхности Si в основном содержались примесные атомы C и O, общая концентрация которых не превышала 1–1.5 u.%.

### 2. Результаты и их обсуждение

Перед измерением система Al–Si очищалась прогревом при  $T = 850–870$  К. На рис. 1 представлен оже-спектр пленки Al, нанесенной на поверхность Si, толщиной  $\sim 1 \mu\text{m}$ . Видно, что на поверхности пленки Al обнаруживается небольшое количество (1–2 u.%) атомов примесных элементов (C, O, Ar). Дальнейшие исследования, проведенные с использованием ВИМС, показали, что в Si и Al наряду с указанными примесями содержится в малом количестве ( $\leq 0.1$  u.%) ряд неконтролируемых примесей: Mg, Cu, Mn, Cr, Si, Ti, Fe, Zn (в Al) и Na, K, Li, As, Ca, Fe, Cu, Zn (в Si).

На рис. 2 приведены профили распределения атомов Al, Si и O на границе контакта Al–Si. Видно, что вследствие взаимодиффузии атомов основных элементов (Al и Si) на границе формируется переходной слой толщиной  $\sim 150–200$  nm. Что касается распределения

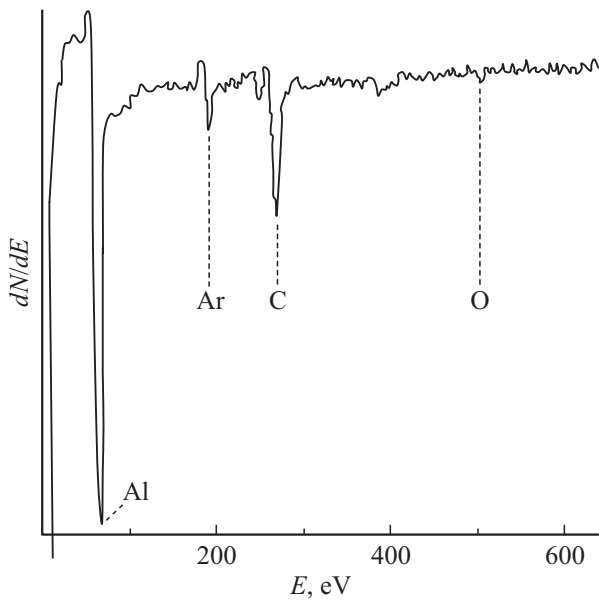


Рис. 1. Оже электронный спектр пленки Al (Si(111)).

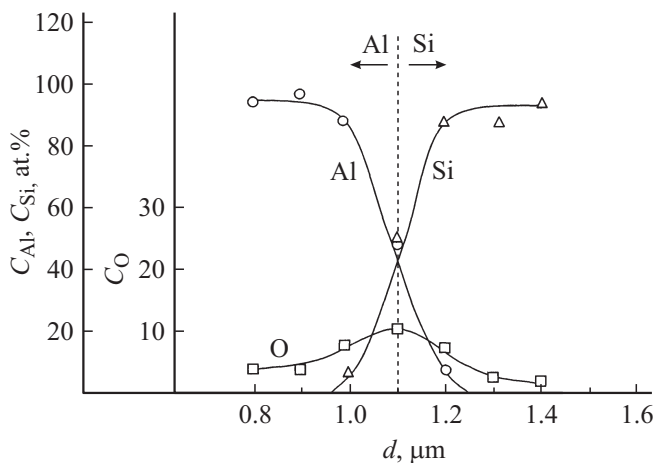


Рис. 2. Зависимости интенсивности оже-пиков Al (1396 eV) и Si (1619 eV) для системы Al-Si. Толщина алюминия  $\sim 1 \mu\text{m}$ .

атомов O, то его концентрации на границе раздела имеют максимум и достигают 10–12 а.%. Как в области Al, так и Si концентрация O при толщине 200–250 нм, составляет 4–5 а.%. Одновременно определены профили распределения других примесных атомов, глубина диффузии которых была в 2–3 раз больше, чем основных атомов контактирующих материалов.

Из низкоэнергетической части оже-спектра Al, снятые при послойном травлении поверхности Al от 0.2 до  $1 \mu\text{m}$  (рис. 3), видно, что вблизи  $L_{2,3}VV$  пика Al ( $E = 68 \text{ eV}$ ), начиная с глубины  $\sim 0.6 \mu\text{m}$ , появляются спутные пики с энергиями 64 и 58 eV.

Выяснено, что это связано с присутствием в области контактной пленки определенной доли атомов алюминия, вступивших в химические соединения с атомами кислорода.

Расчет с помощью формулы, использованной нами в [2] для определения величины химического сдвига

$$\Delta E(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_{n-1}) = \frac{\Delta E(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_n) \Delta Z(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_{n-1})}{\Delta Z(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_n)}, \quad (1)$$

где  $\Delta E(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_n)$  и  $\Delta E(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_{n-1})$  — химические сдвиги оже-пика алюминия в соединениях  $\text{AlO}_2$  и  $\text{AlO}$ ,  $\Delta Z_{\text{eff}}(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_{n-1})$  — изменение эффективного заряда атома алюминия в соединении  $\text{AlO}$ , а  $\Delta Z_{\text{eff}}(\text{Al} \rightarrow \text{AlO}_n)$  — изменение эффективного заряда атома алюминия в  $\text{AlO}_n$ . Анализ показал, что оже-пик с энергией  $58 \pm 1 \text{ eV}$  соответствует соединению  $\text{AlO}$  (и  $\text{AlO}_2$ ), а оже-пик с  $E = 63 \pm 1 \text{ eV}$  соединению  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

На рис. 4 приведен масс-спектр отрицательно заряженных частиц, распыленных с глубоких слоев после травления  $\sim 0.8 \mu\text{m}$  алюминиевой пленки.

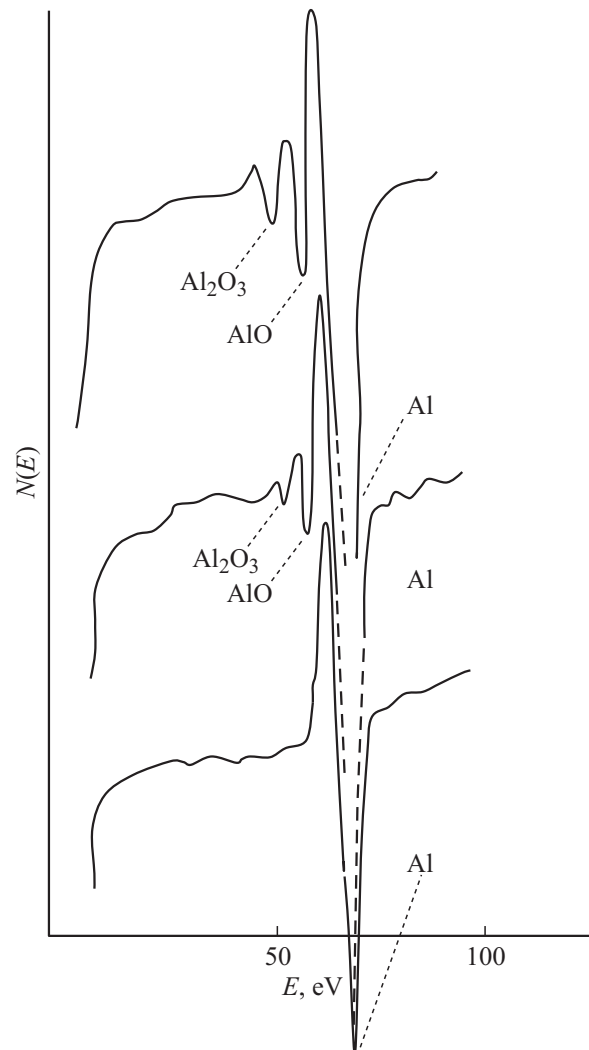
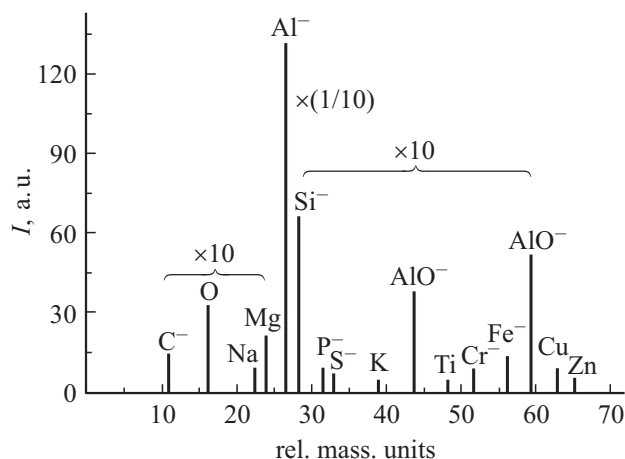


Рис. 3. Низкоэнергетическая часть оже-пика пленки Al с толщиной  $1 \mu\text{m}$ , полученная пучком электронов ( $E_0 = 2800 \text{ eV}$ ) путем послойного снятия Al, начиная от поверхности Al до подложки кремния: 1 — 0.2, 2 — 0.6, 3 —  $1 \mu\text{m}$ .



**Рис. 4.** Масс-спектрограммы отрицательно заряженных частиц, распыленных при бомбардировке контактных областей алюминиевой пленки пучком Cs с энергией  $E_0 = 8 \text{ keV}$ .

- [4] Алиев А.А., Хазратов Ф.Х. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2003. № 9. С. 79.  
 [5] Крылов П.Н., Кривелевич С.А., Ускова Е.А. // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 13. № 2. С. 238–244.  
 [6] Крылов П.Н., Федотова И.В. // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11. № 3. С. 361–373.

В спектре наряду с интенсивными максимумами, характерными для Al, окислов и Si, содержатся максимумы, соответствующие по массам примесным элементам не только имеющиеся в составе Al, но и Si. Изучение профилей распределения примесных элементов в приконтактной области показало, что их концентрация вблизи границы контакта металл–полупроводник резко возрастает [4].

Этот экспериментальный факт мы объясняем тем, что на границе образуются дефекты, обусловленные несоответствием кристаллических структур и параметров решеток полупроводника и металла. Следовательно, образуется аморфный переходной слой. Эти дефекты являются также источниками захвата точечных дефектов вне переходного слоя. Накопление точечных атомных дефектов, в частности кислорода, углерода, натрия, серы и др., уменьшает концентрацию основных носителей заряда в полупроводнике и окисляет поверхность металлических контактов. Поэтому подбор материалов для металлических контактов с кристаллической структурой, близкой к структуре подложки–полупроводника, очевидно, увеличивает срок эксплуатации полупроводниковых приборов, созданных на основе таких структур.

Таким образом, в результате изучения профиля распределения основных и примесных атомов на границе системы Al–Si установлено, что глубина проникновения неконтролируемых примесей кремния в алюминий составляет  $\sim 300\text{--}400 \text{ nm}$ .

## Список литературы

- [1] Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1987. 106 с.  
 [2] Алиев А.А., Абдувайитов А.А. // Узбекский физический журнал. 2007. № 6. С. 263–269.  
 [3] Isakhanov Z.A., Mukhtarov Z.E., Umirzakov B.E., Ruzibayeva M.K. // Techn. Phys. 2011. Vol. 56. N 4. P. 546–549.