

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 621.38:533.9

Анодирование алюминия и кремния в плазме несамостоятельного тлеющего разряда

Ю. А. Бурачевский, В. А. Бурдовицин, Е. М. Окс

Приведены результаты анодирования кремния и алюминия в кислородной плазме. Плазма образована самостоятельным тлеющим разрядом с полым катодом, для возбуждения которого при давлении кислорода 20 Па применялся электронный пучок. Плотность тока через анодируемый образец не превышала 1,5 мА/см², а его температура составляла 200—250 °С. На поверхности алюминия и кремния формировались сплошные бездефектные пленки Al₂O₃ и SiO₂. Скорости роста слоев окислов составили 150—200 нм/ч для Al₂O₃ и 400—800 нм/ч для SiO₂.

PACS: 52.50.Dg, 52.40.Hf

Ключевые слова: оксидирование, тлеющий разряд, кислородная плазма.

Введение

Плазменное анодирование и оксидирование относятся к числу перспективных низкотемпературных методов выращивания слоев оксидов кремния и других полупроводников и металлов [1, 2]. Значительное количество публикаций свидетельствует о несомненном интересе к данному методу модификации поверхностных свойств материалов. Среди ряда технических решений системы анодирования постоянного тока [3] отличаются наибольшей простотой, однако обладают и рядом недостатков, главные из которых — низкая (десятки нм/ч) скорость роста оксидного слоя, а также возможность его загрязнения продуктами ионного распыления электродов. Причем ослабление одного из недостатков вызывает, как правило, усиление другого.

Успех в их преодолении требует одновременного повышения плотности кислородной плазмы при снижении разрядного напряжения. В настоящей работе предпринята попытка удовлетворить

обоим требованиям за счет использования оригинальной системы анодирования на основе разряда с полым катодом и привлечением электронного пучка в качестве дополнительного ионизатора. Цель работы — определение скорости роста и качества оксидной пленки в зависимости от условий эксперимента.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Получение оксидных слоев на поверхности кремния и алюминия производилось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Вакуумная камера откачивалась безмасляным форвакуумным спиральным насосом ISP-500С. Рабочее давление ~20 Па обеспечивалось напуском кислорода. Плазменный источник электронов, основанный на эмиссии электронов из газоразрядной плазмы [4] и разработанный специально для работы в области высоких давлений, создавал электронный пучок 3 с током 10—20 мА и энергией 2,5—5 кэВ в направлении коллектора. Распространяясь в газе, электронный пучок генерировал плазму [5]. Эта плазма обеспечивала плавное зажигание и поддержание разряда между анодируемым образцом и полым катодом, причем образец поддерживался под нулевым потенциалом, а отрицательный потенциал подавался на катод. Одновременно производилась регистрация тока через образец и тока в цепи полого катода. Плотность плазмы оценива-

Бурачевский Юрий Александрович, доцент.

Бурдовицин Виктор Алексеевич, профессор.

Окс Ефим Михайлович, профессор.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. 8 (3822) 41-33-69. E-mail: Yury_BYA@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2010 г.

© Бурачевский Ю. А., Бурдовицин В. А., Окс Е. М., 2011

лась по току насыщения ионной ветви вольт-амперной характеристики плоского зонда Ленгмюра. Для измерения потенциала плазмы применялся зонд, располагаемый вблизи образца и экранированный от электронного пучка. Температура образца контролировалась с помощью термопары и при проведении процесса находилась в пределах 200—250 °С, что значительно ниже температур, наблюдаемых в системе, предусматривающей облуживание образца электронным пучком [6].

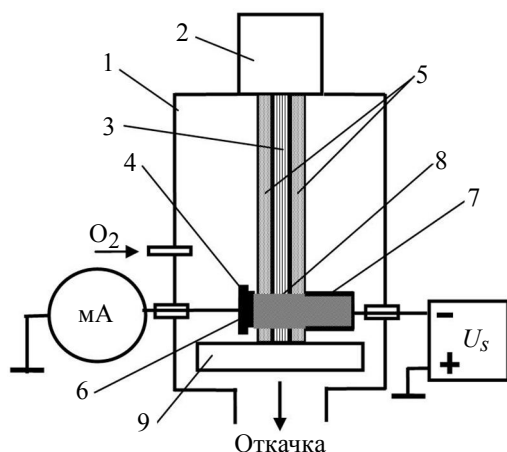


Рис. 1. Экспериментальная установка:

- 1 — вакуумная камера; 2 — плазменный источник электронов; 3 — электронный пучок; 4 — держатель образца; 5 — пучковая плазма; 6 — образец; 7 — полый катод; 8 — плазма тлеющего разряда; 9 — коллектор

Слои окислов исследовались различными методами. С помощью оптического микроскопа МБС-10 с увеличением 14×7 и интерференционно-микроскопа МИИ-4 проводился экспресс-анализ состояния поверхности. Показатели преломления пленок окислов определялись с помощью лазерного эллипсометра "Эллипс-2228СЭ". Регистрация ИК-спектров проводилась на спектрометре Infracum FT-800. Измерение толщины пленок окислов осуществлялось по сколу пластины кремния и по шлифу поперечного сечения образца алюминия на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-1000 с максимальным увеличением 10000. С помощью вторично-ионного масс-спектрометра (ВИМС) РНИ-6300 исследовалось распределение кремния и кислорода по толщине пленки окисла. Травление осуществлялось ионами цезия с энергией 7 кэВ. Ток пучка ионов 40 нА. Угол падения пучка 60°. Размер раstra — 500 мкм.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики разряда с полым катодом для разных

токов электронного пучка. Как можно заметить, у разряда отсутствует пороговое напряжение зажигания, а приемлемые параметры плазмы достигаются при сравнительно небольших напряжениях. Несмотря на то, что в схеме, приведенной на рис. 1, анодом оказывается не только образец, но и коллектор пучка, а также стенки вакуумной камеры, реально практически весь (95 %) разрядный ток протекал через образец. Подача отрицательного потенциала на полый катод не изменяла потенциала плазмы, который оставался на уровне нескольких вольт. Это означает, что электроны и отрицательные ионы кислорода попадали на анодируемый образец, преодолевая потенциальный барьер. Падение потенциала на слое окисла составляло, по-видимому, доли вольта.

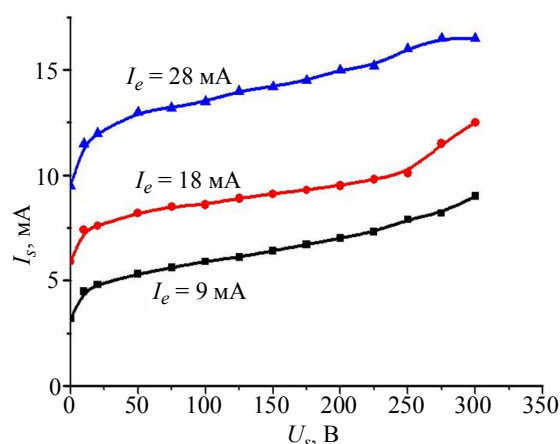


Рис. 2. Зависимость тока через образец I_s от напряжения U_s , приложенного к полному катоду, и тока электронного пучка I_e . Давление кислорода — 20 Па, энергия электронов пучка — 5 кэВ

Наличие диэлектрических пленок на поверхности анодируемых образцов подтверждалось появлением интерференционной окраски, а также картинами скола (рис. 3).

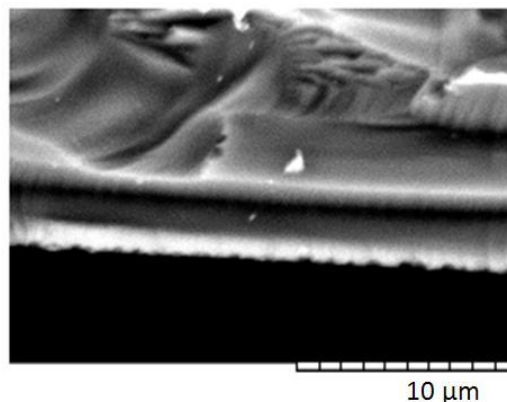


Рис. 3. Характерный вид скола пластины кремния с пленкой SiO_2 после 2 ч анодирования

Представленная на рис. 4 зависимость толщины d слоев окислов от времени t анодирования различна для кремния и алюминия. Для алюминия кривая после 45 мин анодирования обнаруживала тенден-

цию к насыщению. Скорость роста окисла на кремнии практически постоянна.

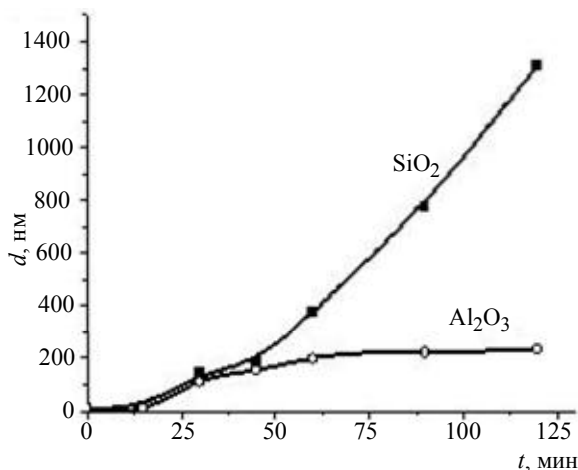


Рис. 4. Зависимость толщины d слоев окислов от времени t анодирования (давление 20 Па, энергия пучка 5 кэВ, ток пучка 18—20 мА, напряжение, приложенное к полюсу катоду, 300 В)

Эти различия, возможно, связаны с различием механизмов анодирования алюминия и кремния.

Коэффициент диффузии кислорода в Al_2O_3 в 10 раз меньше, чем алюминия. Это приводит к преимущественному движению ионов алюминия через растущую пленку окисла к границе раздела окисел—кислородная плазма [3]. Для SiO_2 имеет место стимулированный электрическим полем перенос отрицательных ионов кислорода к границе раздела SiO_2 —Si [1]. Измеренные скорости роста и толщины слоев Al_2O_3 и SiO_2 заметно превышают аналогичные величины, полученные в системах постоянного тока, и сравнимы с результатами анодирования в плазме микроволнового и ВЧ-разрядов [1, 3]. Полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа снимки поверхности образцов до и после анодирования свидетельствуют об отсутствии нарушения целостности оксидных слоев. ИК-спектры оксидных слоев Si—O (1108 см^{-1}) и Al—O (950 см^{-1}) представлены на рис. 5. Соответствующие показатели преломления находились в интервалах 1,43—1,5 и 1,5—1,7. Приведенные цифры дают основания полагать, что выращенные слои близки по составу к SiO_2 и Al_2O_3 [7, 8], соответственно.

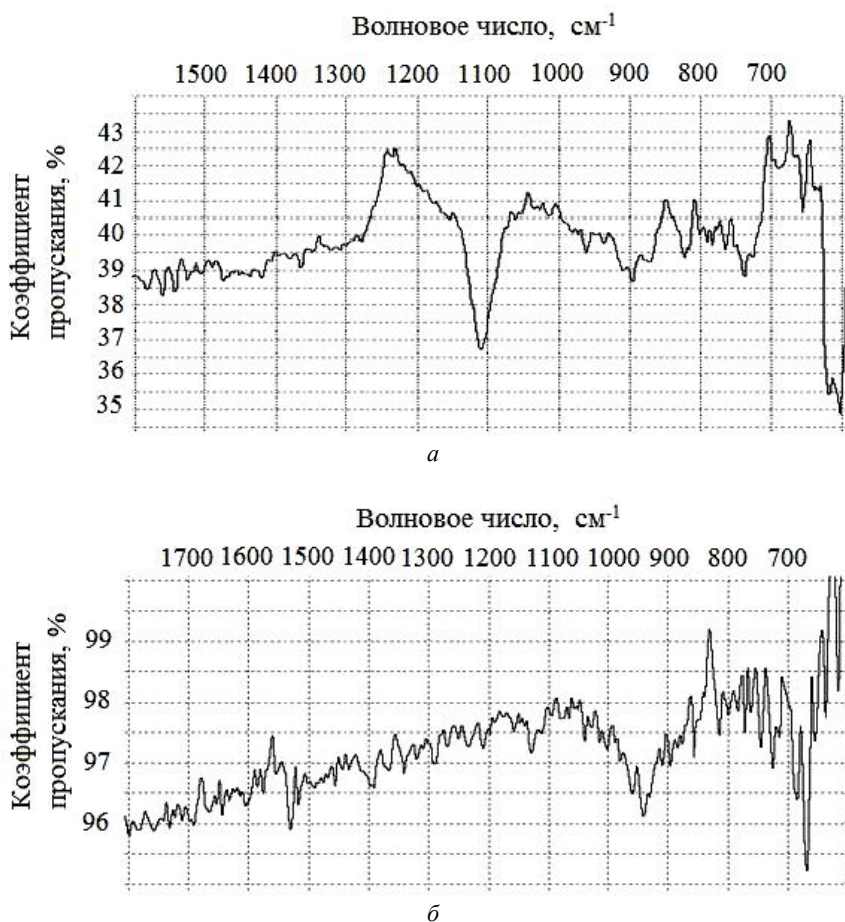


Рис. 5. ИК-спектры слоев окислов кремния (а) и алюминия (б). Толщина SiO_2 — 300 нм, толщина Al_2O_3 — 200 нм

Приведенные на рис. 6 зависимости тока вторичных ионов кремния и кислорода от глубины травления позволяют качественно судить о наличии двух областей с разным процентным содержанием кремния и кислорода. Плавное изменение интенсивности кислородного сигнала является, скорее всего, результатом наличия следов кислорода в остаточной атмосфере установки ВИМС.

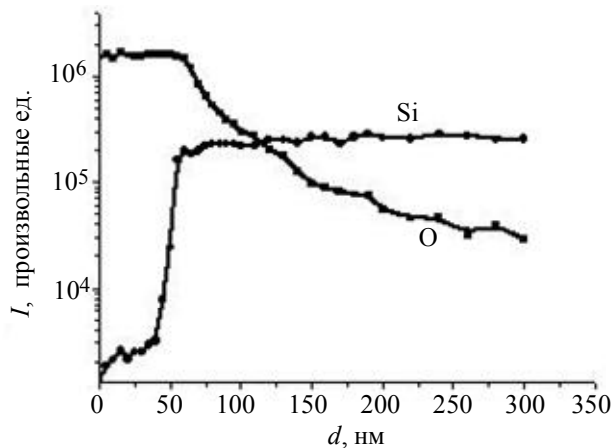


Рис. 6. Зависимость тока вторичных ионов I_i от глубины d травливаемого слоя

Заключение

Использование в системе плазменного анодирования разряда с полым катодом в сочетании с электронным пучком позволило получить сплошные бездефектные слои окислов кремния и алюминия. Скорости роста слоев составили 2,5—3 и 20—22 нм/мин для алюминия и кремния, соответственно. Низкие (менее 300 В) напряжения разря-

да обеспечили отсутствие загрязнений растущих пленок продуктами распыления электродов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты № 09-08-00147-а и 09-08-99023.

Авторы выражают благодарность профессору С. В. Смирнову, старшему научному сотруднику А. А. Соловьеву, магистранту Е. В. Саврук за помощь в измерении свойств окисных пленок.

Литература

1. Hess D. W. // IBM Journal of Research and Development. 1999. V. 43. No. 1/2. P. 127.
2. Baier-Saip J. A., Avila J. I., Tarrach G., Cabrera A. L., Fuenzalida V., Zarate R. A., Schuller I. K. // Surface and Coating Technology. 2005. V. 2—3. P. 168.
3. Пархутик В. П., Лабунов В. А. Плазменное анодирование: Физика, техника, применение в микроэлектронике. — Минск: Наука і техника, 1990.
4. Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Laser and particle beams. 2008. V. 26. P. 619.
5. Жирков И. С., Бурдовицин В. А., Окс Е. М. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 9. С. 115.
6. Burachevsky Yu. A., Burdovitsin V. A., Medovnik A. V., Goreev A. K., Oks E. M., Zhirkov I. S. // 9-th International Conference on Electron Beam Technologies. 1—4 June, 2009. Varna, Bulgaria // Электротехника и Электроника. 2009. No. 5—6. P. 193.
7. Васильев В. В., Войцеховский А. В., Дудыцев Ф. Н., Земцова Т. А., Парм И. О., Соловьев А. П. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 62.
8. Kuzik L. A., Yakovlev V. A. // Thin Solid Films. 1999. No. 340. P. 288.

Anodization of silicon and aluminum in the non-self-sustained glow discharge plasma

Yu. A. Burachevskiy, V. A. Burdovitsin, E. M. Oks

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: office@tusur.ru

Results of silicon and aluminum anodization in oxygen plasma are presented. Plasma was formed by the hollow cathode discharge in which an electron beam excitation at the oxygen pressure 20 Pa was applied. The current density through anodized sample did not exceed 1.5 mA/cm², and its temperature was 200—250 °C. On the aluminum and silicon surfaces, the continuous faultless Al₂O₃ and SiO₂ films were formed. Growth rates of oxide layers were 150—200 nm/hour for Al₂O₃ and 400—800 nm/hour for SiO₂.

PACS: 52.50.Dg; 52.40.Hf

Keywords: oxidation, glow discharge, oxygen plasma.

Bibliography — 8 references.

Received September 22, 2010