УДК 54.066

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ТРАВЛЕНИЯ Ионным пучком материалов, Используемых в микро- и нанотехнологиях

М.В. ТОПЯКОВА, аспирант А.А. ВЕЛИЧКО, доктор техн. наук, профессор (НГТУ, г. Новосибирск)

> Получена 29 июля 2013 года Рецензирование 26 августа 2013 года Принята к печати 5 сентября 2013 года

Топякова М.В. – 630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: topyakova@gmail.com

Проведен анализ скоростей травления ионным пучком материалов, используемых при производстве интегральных микросхем. Экспериментальное травление проводилось на двулучевом электронно-ионном микроскопе Cross Beam 1540 EsB. Показаны зависимости скорости травления алюминия, фосфоросиликатного стекла, нитрида кремния, термического оксида и поликремния от времени и тока пучка ионов. Из полученных зависимостей видно, что с увеличением тока в некоторых материалах существенно увеличивается эффект распыления и переосаждения, что сказывается и на скорости, и на качестве травления. Исходя из полученных результатов выявлены наиболее оптимальные режимы травления для последующей коррекции экспериментальных образцов чипов СБИС.

**Ключевые слова:** травление фокусированным ионным пучком, интегральные микросхемы, растровый электронный микроскоп.

## Введение

Технология фокусированного ионного пучка (FIB – Focused Ion Beam) последнее время получает все более широкое распространение [1]. Возможности прецизионного травления и наблюдения оказываются востребованными при работе с такими микро- и нанообъектами, как приготовления фольг для просвечивающей электронной микроскопии, обработка различных покрытий и многослойных структур, модифицирование нанообъектов, в том числе и интегральных микросхем (ИМС) [2–4].

Современная технология фокусированного ионного пучка характеризуется способностью фокусировки ионного пучка до диаметра 5 нм при ускоряющем напряжении 30 кВ и относительно малой глубиной проникновения ионов в твердое тело 25±8 нм, что позволяет сохранять свойства обрабатываемого материала. Возникновение при взаимодействии ионного пучка с веществом вторичных ионов и электронов позволяет проводить микроскопическое исследование. Взаимодействие ионного пучка с веществом в газообразном состоянии дает возможность осуществлять ионно-стимулированное химическое травление и осаждение.

Особенно большие перспективы при использовании ионных пучков возникают при их использовании в микро- и наноэлектронике [5]. Современные сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС) могут объединять на одном кристалле более миллиарда транзисторов. В настоящее время наиболее распространенной в производстве СБИС и оптимальной с точки зрения «качество-цена» является субмикронная КМОП-технология, в частности, с проектно-технологическими нормами 0,18 мкм, реализованная на большинстве «кремниевых фабрик» в мире. Современная организация микроэлектронного производства подразумевает возможность проектирования СБИС дизайн-центрами с последующим изготовлением экспериментальных образцов СБИС на серийных фабриках в различных странах мира. Однако в случае выявления ошибок проектирования повторный запуск СБИС на фабрике осуществляется в соответствии с возможностями фабрики спустя достаточно длительное время [1].

Вместо повторного запуска на фабрике намного быстрее и экономичней провести коррекцию выявленных ошибок проектирования с помощью фокусированного ионного пучка. Для того чтобы отработать

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

технологию коррекции СБИС, необходимо иметь представление о требуемом времени и режиме травления корректируемой интегральной схемы. Целью данной работы является получение зависимостей глубины травления от времени и зависимостей глубины травления от тока сфокусированного ионного пучка основных материалов, используемых в СБИС.

# Методика эксперимента

Для исследования возможности проведения ионного травления различных материалов на установке фокусированных ионных пучков FIB Cross Beam 1540 EsB и проверки возможности коррекции экспериментальных образцов чипов СБИС были проведены эксперименты по травлению различных материалов. В качестве исследуемых материалов использовались вольфрам, алюминий, фосфоросиликатное стекло, нитрид кремния, термический оксид и поликремний.

Установка CrossBeam 1540 EsB представляет собой аналитический автоэмиссионный электронноионный (двулучевой) растровый электронный микроскоп. Это уникальное оборудование CrossBeam 1540 состоит из комбинации автоэмиссионной электронно-оптической колонны GEMINI, автоэмиссионной ионной колонны, сфокусированных в единую точку фокуса. В серии реализованы самые последние достижения в области электронной и ионной оптики для применения во всех областях исследований, связанных с нанотехнологиями.

Образцы вольфрама, алюминия, фосфоросиликатного стекла, нитрида кремния, термического оксида и поликремния травились сфокусированным ионным пучком. Были исследованы результаты травления при токе ионного пучка 1, 2 и 5 нА. Область травления выбиралась 5×10 мкм (общая площадь 50 мкм<sup>2</sup>).

# Результаты и обсуждения

Ниже приведены результаты травления легированного поликремния d = 0.6 мкм на термическом оксиде d = 0.1 мкм при трех разных токах пучка. Зависимости глубины травления от времени имеют линейный характер. При увеличении времени воздействия сфокусированного пучка ионов на образец глубина травления увеличивается (рис. 1–3).

Важно отметить, что дальнейшее увеличение тока ионного пучка до 5 нА при тех же временах травления приводит к увеличению глубины травления всего с 6 до 7 мкм, т.е. происходит замедление скорости травления. На рис. 3 приведены зависимости глубины травления от тока пучка ионов для трех значений времени травления: 120, 240 и 360 с.



Рис. 1. Зависимость глубины травления от времени травления, для тока пучка 1 нА (*a*) и 2 нА (б) соответственно

Из полученных зависимостей глубины травления от тока ионного пучка (рис. 2) видно, что с увеличением тока пучка скорость травления растет. Следует отметить, что с увеличением тока усиливается явле-



*Рис.2.* Зависимости глубины травления поликремния от тока ионного пучка для 120, 240 и 360 с.

99



*Рис. 3.* РЭМ-изображение результата травления при заданном времени 600 с. Токи пучка ионов равны: *I* = 2 нА, *I* = 5 нА, *I* = 10 нА, *I* = 20 нА



*Рис. 4.* Зависимость глубины травления нитрида кремния d = 0.2 мкм от времени травления при токе пучка 1 нА (*a*) и 2 нА ( $\delta$ ) соответственно

ние распыления, что сказывается и на скорости, и на качестве травления (рис. 3).

На рис. 4, *а* и *б* приведены зависимости глубины травления от времени травления при токах ионного пучка 1 и 2 нА.

Как и в предыдущем случае, при увеличении тока до 5 нА глубина травления практически осталась неизменной при времени 360 с. На рис. 5 приведены зависимости глубины травления от тока пучка ионов для трех значений времени травления: 120, 240 и 360 с.

Полученные зависимостей глубины травления нитрида кремния ведут себя аналогично зависимостям легированного поликремния. Также из графиков, изображенных на рис. 5 видно, что глубина



*Рис.5.* Зависимости глубины травления нитрида кремния d = 0.2 мкм от тока ионного пучка за 120, 240 и 360 с.

травления увеличивается намного медленней при увеличении тока пучка от 2 до 5 нА, чем при увеличении от 1 до 2 нА. Данный спад можно объяснить сильным эффектом распыления нитрида кремния при токах более 2 нА.

На рис. 6, a и  $\delta$  приведены зависимости глубины травления от времени процесса при токах ионного пучка 1 и 2 нА.

В случае травления фосфоросиликатного стекла при увеличении тока ионного пучка увеличение скорости травления от времени уменьшается несущественно, что говорит о том, что эффект распыления в данном случае меньше, чем при травлении нитрида кремния и легированного поликремния.

#### Выводы

Результаты экспериментального травления материалов, используемых при изготовлении СБИС, и построенные зависимости глубины травления от времени и зависимости глубины травления от тока сфокусированного ионного пучка позволяют сформировать представление о требуемом времени и



*Рис. 6.* Зависимость глубины травления фосфоросиликатного стекла на термическом оксиде толщиной d = 0.1 мкм от времени травления для тока пучка 1 нА (*a*) и 2 нА (*б*) соответственно

режиме травления корректируемой интегральной схемы.

При анализе графиков можно сделать вывод, что для большинства материалов скорость травления есть величина линейная и растет непосредственно в зависимости от времени. Зависимости глубины травления от тока ионного пучка демонстрируют, что при увеличении тока ионного пучка рост скорости травления и качество травления снижаются, что связанно с эффектом распыления и переосаждения материала.

На стадии удаления фосфоросиликатного стекла и защитного слоя СБИС для ускорения процесса

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



*Рис.* 7. Зависимости глубины травления фосфоросиликатного стекла на термическом оксиде толщиной *d* = 0.1 мкм от тока ионного пучка для 120, 240 и 360 с.

можно ток пучка задавать порядка 5...10 нА. В случае проведения более точных работ для удаления нижележащих слоев нитрида кремния или легированного поликремния ток пучка должен быть порядка 1...2 нА.

#### Список литературы

1. Лучинин В.В., Савенко А.Ю., Тагаченков А.М. Методы микро- и наноразмерной обработки материалов и композиций // Петербургский журнал электроники. – № 2. – 2005. – С. 3–14.

2. Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Наноразмерные ионнолучевые технологии. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. В.В. Лучинина и Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит, 2006. – С. 284–304.

3. Кузнецова М.А., Лучинин В.В., Савенко А.Ю. Ионнолучевая технология сверхлокального препарирования интегральных схем // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Физика твердого тела и электроника». – 2006. – № 2. – С. 28–35.

4. Volinsky A.A., Rice L., Qin W., Theodore N. D. FIB failure analysis of memory arrays. Microelectronic Engineering. – 2004. – № 75. – P. 3–11.

5. Топякова М. В., Васильев В. Ю., Величко А. А. Коррекция субмикронных многоуровневых интегральных микросхем с помощью электронно-ионного микроскопа // Сборник трудов междунар. науч. конф. «Электронная техника и технологии». – Харьков, 2012. – Т. 2. – С. 42–43.

Obrabotka metallov N 3 (60), July–September 2013, Pages 98-102

# Investigation of the ion beam etching of the materials used in micro- and nanotechnologies

M. V. Topyakova, A. A. Velichko

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russia E-mail: topyakova@gmail.com



## Abstract

The analysis of the ion-beam etching rates of the materials used in integrated circuits manufacturing is carried out. Experimental etching is carried out by the dual-beam electron-ion microscope Cross Beam 1540 EsB. The etching rate-time functions and etching rate – ion beam current functions for aluminum, phosphor – silicate glass, silicon nitride, polysilicon and thermal oxide are presented. The results show that increase of the current in some materials results in significant increase of sputtering and redeposition effects. These effects affects the rate and on the quality of etching. Based on these results the most suitable ion beam etching parameters for subsequent correction of experimental integrated circuits are determined.

Keywords: focused ion beam etching, integrated circuits, scanning electron microscope.

## References

1. Luchinin V.V., Savenko A.Yu., Tagachenkov A.M. *Metody mikro- i nanorazmernoj obrabotki materialov i kompozicij* (Methods of micro- and nanoscale materials processing and compositions). *Peterburgskij Zhurnal Jelektroniki*, Saint Petersburg, OAO "Rossijskij nauchno-issledovatel'skij institut "Jelektronstandart", 2005, no. 2, pp. 3-14.

2. Luchinin V.V., Savenko A.Yu. *Nanorazmernye ionno-luchevye tehnologii* [Nano-scale ion-beam technology]. *Nanotehnologija: fizika, processy, diagnostika, pribory. Monografija. Pod red. V.V. Luchinina, Yu.M. Tairova* [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices. Monograph. Ed. V.V. Luchinina and Yu.M. Tairova]. Moskow, Fizmatlit, 2006. pp. 284-304.

3. Kuznecova M.A., Luchinin V.V., Savenko A.Yu. *Izvestija Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"*, 2006. no. 2, pp. 28 - 35.

4. Volinsky A.A., Rice L., Qin W., Theodore N.D. FIB failure analysis of memory arrays. Microelectronic Engineering, 2004, no. 75, pp. 3-11.

5. Topyakova M.V., Vasil'ev V.Yu., Velichko A.A. *Korrekcija submikronnyh mnogourovnevyh integral'nyh mikroshem s pomoshh'ju jelektronno-ionnogo mikroskopa* [Correction of multi-level sub-micron integrated circuits using electron-ion microscope]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Jelektronnaja tehnika i tehnologii»* [Proceedings of the International Conference "Electronic Equipment and Technologies"]. Kharkov, 2012, Vol. 2, pp. 42-43.