

УДК 004.422.834

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ МАСКИ ВО ВНЕЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

© 2013 В. А. Колпаков, А. А. Бонячук

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрено программное обеспечение, позволяющее проводить автоматизированный расчёт концентрационных профилей атомов полупроводника и «вакансий» в расплаве при обработке структуры «металл – полупроводник» внеэлектродной плазмой высоковольтного газового разряда и определять глубину легирования маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника (глубины оптического микрорельефа).

Диффузия, информационная система, программное обеспечение, металл – полупроводник, «вакансия», внеэлектродная плазма, оптический дифракционный микрорельеф.

Метод каталитической маски нуждается в дальнейшем развитии, так как обладает следующими преимуществами перед известными методами формирования дифракционного микрорельефа [1-12]:

– позволяет изменением режимов обработки и топологии маски управлять параметрами микрорельефа;

– позволяет с высокими равномерностью и скоростью формировать дифракционный микрорельеф на широкоформатных пластинах разных оптических материалов.

В работах [13-17] теоретически и экспериментально доказана актуальность и целесообразность применения внеэлектродной плазмы высоковольтного газового разряда для формирования каталитической маски микрорельефа оптических элементов на поверхности структуры «алюминий–кремний». В рамках данного подхода:

– установлено, что изменением электрических параметров (I - тока разряда, U - ускоряющего напряжения) и длительности облучения (t) ионно-электронным потоком внеэлектродной плазмы расплава можно как замедлять, так и ускорять процессы диффузии примесных атомов в жидком алюминии, протекающие по вакансионному механизму, то есть управлять высотой микрорельефа оптических элементов (h);

– разработана физико-математическая модель, позволяющая определять распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава алюминия, содержащего «вакансии», оценивать глубину легирования (h) маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника при разных значениях параметров технологического процесса (I, U, t).

Однако получение конкретных количественных значений концентраций примесных атомов, длительности облучения, величины h при заданных I и U с помощью разработанной модели представляет собой трудоёмкую, требующую больших затрат времени задачу. Это препятствует её решению в реальном времени, использованию для корректировки технологического процесса легирования поверхности кремния плёнками алюминия при обработке структуры во внеэлектродной плазме и создания тем самым оптического микрорельефа на поверхности кремния. С другой стороны, существующие программные продукты в области компьютерной оптики [18-26] не обладают соответствующими средствами. Поэтому актуальным является создание информационной системы (ИС), решающей вышеперечисленные задачи.

В работе предлагается программное обеспечение (ПО), позволяющее оператору вакуумной установки, в которой установлен генератор внеэлектродной плазмы, проводить автоматизированный расчёт количественных значений указанных параметров с целью определения наилучшего режима для формирования заданной высоты микрорельефа оптических элементов.

Рассматриваемое программное обеспечение предназначено для автоматизированного расчёта концентрационных профилей атомов полупроводника и «вакансий» в расплаве при обработке структуры «металл – полупроводник» внеэлектродной плазмой, глубины легирования маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника на основе введённых в электронном виде первичных данных о процессе формирования каталитической маски. К первичным данным относятся значения толщины металлической плёнки, времени исследования, коэффициента диффузии «вакансий» (D_v), максимальной концентрации атомов полупроводника и начальной концентрации «вакансий» на поверхности расплава (C_{v0}), образованной при заданных электрических параметрах (I и U), а также параметров дискретизации. Значение C_{v0} определяется по выражению

$$C_{v0} = \frac{[J_e(I, U)E_e + J_i^-(I, U)E_i]}{E_a} S,$$

где J_e, J_i^- – потоки электронов и отрицательных ионов, рассчитываемые по известным, громоздким формулам [13]; E_e, E_i, E_a – энергии электронов, отрицательных ионов и активации «вакансий» соответственно; S – площадь поверхности, обрабатываемой в плазме.

Основные функции программы:

- расчёт и построение концентрационных профилей атомов полупроводника в расплаве;

- расчёт и построение концентрационных профилей «вакансий» в расплаве;

- расчёт глубины легирования маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника;

- заполнение первичных данных о режиме формирования каталитической маски в случае, если этот режим уже использовался оператором и оператор ранее заполнял эти данные;

- построение концентрационных профилей атомов полупроводника и «вакансий» в расплаве в логарифмическом масштабе;

- расчёт времени облучения структуры металл – полупроводник для достижения заданных глубины легирования и концентрации атомов полупроводника в слое расплава;

- визуализация концентрационных профилей в цвете;

- масштабирование при построении зависимостей;

- генерация и сохранение на диске файла формата bitmap, содержащего изображение концентрационных профилей;

- определение и визуальный контроль конкретных значений концентраций атомов полупроводника и «вакансий» в расплаве непосредственно на построенных зависимостях;

- формирование базы данных материалов, образующих структуру «металл – полупроводник», с возможностью ввода, сохранения, удаления, редактирования значений параметров.

Программное обеспечение разработано на основе результатов численного решения системы уравнений диффузии второго порядка с начальными и граничными условиями, описывающих процесс растворения кремния в расплаве алюминия при наличии в нём потока «вакансий», формируемых в процессе обработки структуры «алюминий – кремний» внеэлектродной плазмой (рис.1, а, б, в) [13].

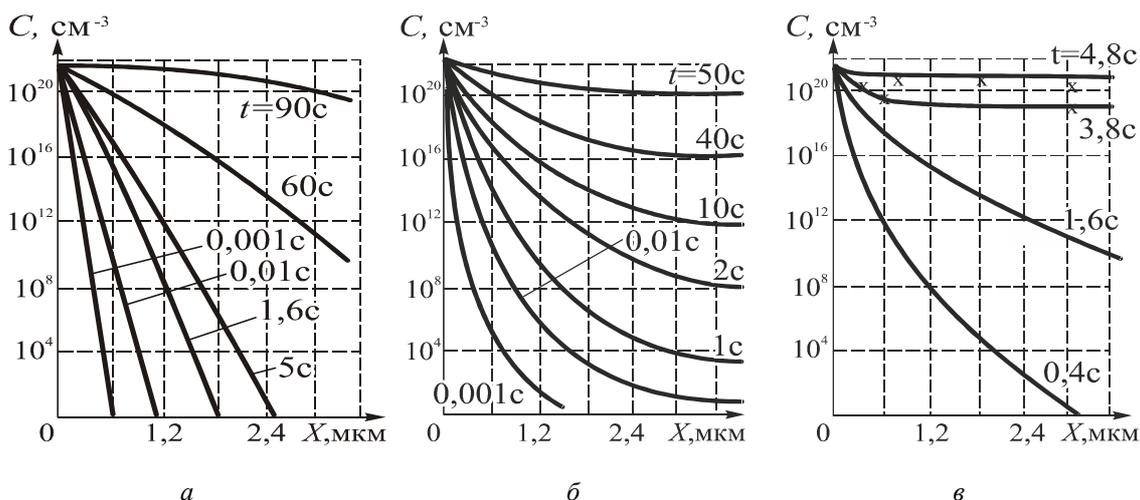


Рис.1. Распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава алюминия:
 а – $C_{v0}=10^{18} \text{ см}^{-3}$; б – $C_{v0}=3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; в – $C_{v0}=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для всех случаев $D_v=5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$
 (непрерывные линии описывают решения системы уравнений диффузии (6.7) из монографии [13];
 на рис.1, в малым x обозначены экспериментальные значения величины концентрации атомов кремния,
 измеренные на рентгеновском микроанализаторе MAP-2)

Использование предлагаемого программного обеспечения позволило повысить на порядки скорость расчёта концентрационных профилей и глубины легирования маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника, а также сократить время построения зависимостей и определения нужного режима обработки структуры «металл – полупроводник» потоком внеэлектродной плазмы до нескольких десятков секунд. Программа значительно снижает нагрузку на оператора, предоставляя удобную среду для исследования процессов формирования каталитической маски и определения режимов обработки структур «металл – полупроводник» во внеэлектродной плазме.

В целях обеспечения сопряжения ИС с технологической установкой, в которой установлен газоразрядный прибор, генерирующий потоки внеэлектродной плазмы, и учитывая функции программы и формат первичных данных, для разработки ПО был выбран объектно-ориентированный язык программирования Delphi 7, предназначенный для работы в операционных системах Windows 9x, Windows NT и выше. Приложения, написанные на Delphi 7, отличаются высокой производительностью графического ин-

терфейса и низкими требованиями к ресурсам персонального компьютера [27]. Следовательно, для работы данного ПО достаточно персонального компьютера, технические характеристики которого удовлетворяют минимальным требованиям функционирования операционной системы и который имеет параллельный или последовательный порт для подключения внешних устройств.

Программное обеспечение, создаваемое в Delphi, состоит из нескольких элементов, объединенных в проект.

Рассматриваемое ПО состоит из трёх основных модулей, объединённых общей оболочкой, которая выполняет функции интерфейса пользователя и включает в себя ряд окон, содержащих различные элементы управления и ввода данных. Программа имеет защиту от ввода некорректных параметров материала и временных констант. В случае ввода некорректных данных пользователю выдаётся соответствующее сообщение. С целью упрощения ввода данных и предотвращения их некорректных значений предусмотрена возможность сохранения введённых параметров материалов и выбора этих значений из сформированной базы.

Основные модули программы осуществляют следующие функции:

- расчёт концентрационных профилей «вакансий» и атомов полупроводника в расплаве;
- расчёт времени облучения структуры «металл – полупроводник» для достижения заданных глубины легирования

и концентрации атомов полупроводника в слое расплава;

- построение соответствующих зависимостей.

Пример графика зависимости концентрации атомов полупроводника в расплаве от глубины залегания приведён на рис. 2.

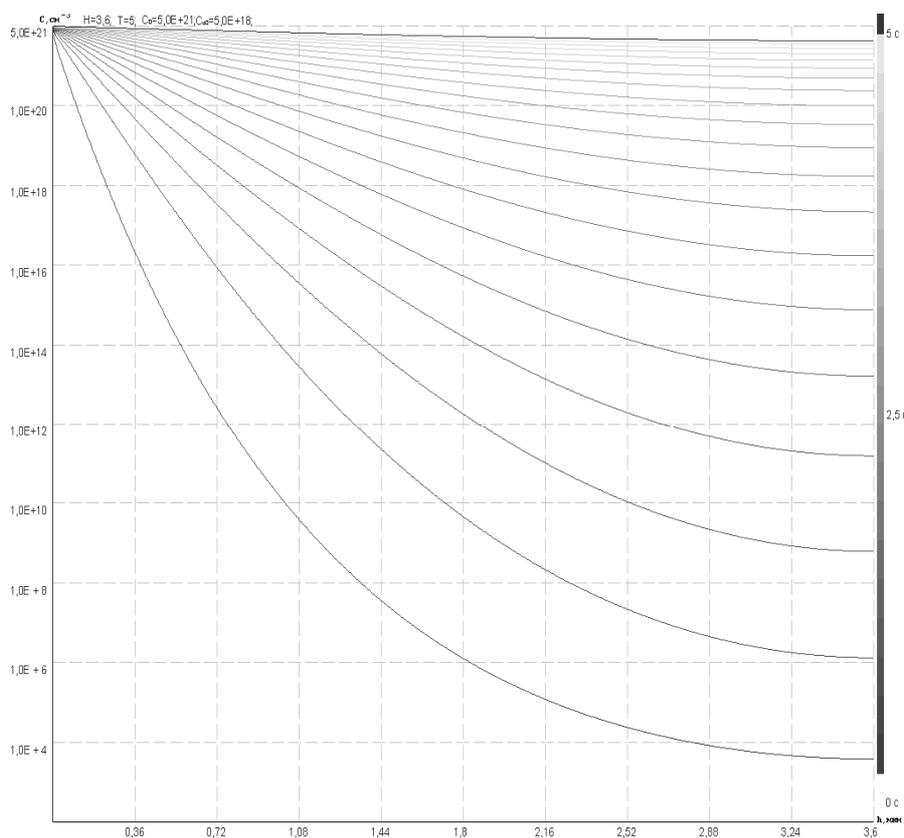


Рис.2. Вид графика временных зависимостей $C=f(h)$

Соответствие данных зависимостей концентрационным профилям, представленным на рис.1, б, в, свидетельствует об адекватности разработанного программного обеспечения имеющимся теоретическим и экспериментальным результатам.

Разработанное ПО позволяет осуществлять расчёт времени облучения структуры «алюминий – кремний», необходимого для достижения в легированном слое толщиной h требуемого значения концентрации атомов полупроводника.

Представленные возможности и структура программы позволяют выполнить её сопряжение с технологической установкой, содержащей газоразрядный

прибор, формирующий внеэлектродную плазму. Информационная система обеспечивает корректировку параметров процесса легирования поверхности полупроводника плёнками металла и создание оптического микрорельефа на поверхности кремния в режиме реального времени. Указанное является логическим продолжением проделанной работы.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ НШ-4128.2012.9 и молодых российских ученых – докторов наук МД-1041.2011.2, а также Российского фонда

фундаментальных исследований (проект № 12-07-33018 мол_а_вед).

Авторы выражают благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору Д.Л. Головашкину за эффективные и полезные консультации при обсуждении структуры данной статьи.

Библиографический список

1. Попов, В.В. Материалы и методы для создания плоских фокусирующих элементов [Текст] / В.В. Попов // Компьютерная оптика. – 1987. – №1. – С. 160-162.
2. A method for the diffractive microrelief forming using the layered photoresist growth [Text] / A. V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.Yu. Moiseyev [et al.] // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29. – №№ 4-5. – P. 281-288.
3. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов [Текст] / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер [и др.] // Компьютерная оптика. – 1997. – № 17. – С. 91-93.
4. Волков, А.В. Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов [Text] / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 130-133.
5. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface [Text] / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2007. – Vol. 39. – № 6. – P.1234-1238.
6. Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ [Текст] / С.Р. Абульханов, Н.Л. Казанский, Л.Л. Досколович [и др.] // СТИН. – 2011. – № 9. – С.20-27.
7. Волков, А.В. Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине [Текст] / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 133-138.
8. Волков, А.В. Формирование микрорельефа с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников [Текст] / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2002. – № 24. – С. 74-77.
9. Казанский, Н.Л. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // Микроэлектроника. – 2004. – Том 33. – №3. – С. 209-224.
10. Bezus, E.A. Evanescent-wave interferometric nano-scale photolithography using guided-mode resonant gratings [Text] / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Microelectronic Engineering. – 2011. – Vol. 88. – № 2. – P. 170-174.
11. Безус, Е.А. Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн для наноразмерной литографии с помощью волноводных дифракционных решеток [Текст] / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – № 8. – С. 759-764.
12. Создание криволинейных дифракционных решеток для ультрафиолетового диапазона [Текст] / Д.В. Нестеренко, С.Д. Полетаев, О.Ю. Моисеев [и др.] // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 66-71.
13. Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда [Текст]/Н.Л.Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
14. Kazanskiy, N. L. Studies into a Mechanism of Catalytic Mask Generation in Irradiation of an Al-Si Structure with High-Voltage Gas-Discharge Particles [Text] / N. L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, A.I. Kolpakov // Optical Memory and Neural Networks. – 2005. – Vol. 14(3). – P. 151-159.
15. Казанский, Н.Л. Исследование механизмов формирования каталитической маски при облучении структуры алюминий-кремний частицами газового разряда высоковольтного типа [Текст] / Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Кол-

паков // Компьютерная оптика. – 2002. – № 24. – С. 84-90.

16. Колпаков, А.И. Исследование механизмов формирования каталитической маски микрорельефа оптических элементов при облучении структуры Al-Si частицами газового разряда высоковольтного типа [Текст] / А.И. Колпаков, Н.Л.Казанский, В.А. Колпаков // Тр. Междунар. конф. «Математическое моделирование». – Самара, – 2001. – С. 133-135.

17. Колпаков, В.А. Исследование эффекта увлечения атомов кремния «вакансиями», возникающими в расплаве алюминия при облучении его поверхности ионно – электронным потоком [Текст] / В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25. – Вып. 15. – С. 58-65.

18. Казанский, Н.Л. Комплекс программ анализа дифракционных характеристик фокусаторов [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.Б. Самолинова // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып.5. – С.38-43.

19. Голуб, М.А. Структура комплекса программ синтеза элементов компьютерной оптики [Текст] / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, М.В. Шинкарев // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып.5. – С.43-48.

20. Kazanskiy, N.L. Computer-aided design of diffractive optical elements [Text] / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Optical Engineering. – 1994. – Vol.33. – № 10. – P.3156-3166.

21. Software on diffractive optics and computer generated holograms [Text] /

L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy [et al.] // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol.2363. – P.278-284.

22. Программный комплекс для расчета дифракционных оптических элементов с использованием высокоскоростных вычислительных средств [Текст] / С.Г. Вологовский, Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович [и др.] // Компьютерная оптика. – 2001. – № 22. – С. 75-79.

23. Казанский, Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики [Текст] / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2006. – № 29. – С. 58-77.

24. Golovashkin, D.L. Solving Diffractive Optics Problem using Graphics Processing Units [Text] / D.L. Golovashkin and N.L. Kazanskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20. – No. 2. – P. 85–89.

25. Казанский, Н.Л. Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики [Текст] / Н.Л. Казанский // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 54-62.

26. Kazanskiy, Nikolay L. Research and education center of diffractive optics [Text] / Nikolay L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8410. – 84100R. – DOI: 10.1117/12.923233.

27. Еламова, Н.З. DELPHI 7: Первый взгляд [Текст]/ Н.З. Еламова // Компьютер пресс. – 2002. – № 10. – С. 168-172.

SOFTWARE FOR INVESTIGATING THE PROCESS OF CATALYTICAL MASKING LAYER FORMATION

© 2013 V. A. Kolpakov, A. A. Bonyachuk

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Based on the received numerical solution we have developed software which allows conducting automatic calculation of semiconductor atom concentric profiles and «vacancies» in the melt when the «metal - semiconductor» structure is treated by off-electrode plasma. It also makes it possible to determine the depth of alloying of the masking layer into the semiconductor subsurface (depth of the optical micropattern).

Diffusion, algorithm, software, metal-semiconductor, «vacancy», extra-electrode plasma, diffractive optical micropattern.

Информация об авторах

Колпаков Всеволод Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kolpakov683@gmail.com, kolpakov@ssau.ru. Область научных интересов: ионно-плазменные технологии обработки материалов, технологические процессы микро- и нанoeлектроники, дифракционной оптики.

Бонячук Александр Александрович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sprinu@mail.ru. Область научных интересов: ионно-плазменные технологии обработки материалов.

Kolpakov Vsevolod Anatol'evich, doctor of physics and mathematics, professor of the department of design and technology of electronic systems and devices, Samara State Aerospace University (National Research University). E-mail: kolpakov683@gmail.com, kolpakov@ssau.ru. Area of research: ion-plasma technologies of material processing, processes of micro-and nanoelectronics, diffractive optics.

Bonyachuk Alexander Alexandrovich, undergraduate student, Samara State Aerospace University (national research university). E-mail: sprinu@mail.ru. Area of research: ion-plasma technologies of material processing.