Влияние плотности энергии высокоинтенсивного пучка ионов титана на накопление и диффузию в кремнии

© А.И. Иванова, О.С. Корнева, И.А. Божко, С.В. Дектярев, А.В. Гурулев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

E-mail: bai@tpu.ru

Поступила в Редакцию 7 мая 2025 г.
В окончательной редакции 18 июня 2025 г.
Принята к публикации 2 июля 2025 г.

Методом синергии высокоинтенсивной имплантации и одновременного энергетического воздействия пучка ионов титана с плотностью тока 1.6 А/см^2 на поверхность кремния сформированы ионно-легированные слои толщиной до 2.6 мкм. Представлены результаты закономерностей накопления титана в кремнии от длительности и частоты импульсов при фиксированной плотности мощности ионного пучка $9.6 \cdot 10^4$ Вт/см^2. Методом электронной оже-спектроскопии получены распределения примеси по глубине модифицированного слоя. Рентгенофазовый анализ показал наличие фаз дисилицида титана $TiSi_2$, силицид титана TiSi.

Ключевые слова:синергия высокоинтенсивной имплантации и энергетического воздействия, плотность энергии, диффузия, титан, кремний.

DOI: 10.61011/FTP.2025.03.61093.8135

1. Введение

Методы ионной имплантации уникальны тем, что их использование позволяет контролируемо изменять элементный и фазовый состав ионно-легируемого слоя, его структуру и, следовательно, физико-механические свойства металлов и сплавов, электрофизические свойства полупроводниковых материалов [1–3]. Основным ограничением ионной имплантации являются малые толщины ионно-модифицированных слоев. Так, например, средний проективный пробег ионов бора в кремнии при энергии 200 кэВ составляет 0.53 мкм, ионов фосфора — 0.25 мкм, ионов титана — 0.186 мкм [4,5]. Результаты работы [6] демонстрируют, что имплантация ионов титана с энергией 45 кэВ при флюенсе $5 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 позволила получить легированный слой толщиной 115 нм. В работе [7] имплантация ионов титана при энергии 35 кэВ с дозой облучения 10^{15} ион/см^2 привела к формированию ионно-модифицированного слоя толщиной 200 нм.

В последние годы ведутся работы по сверхлегированию кремния различными примесями с целью повышения их концентраций и увеличения толщин ионно-легированных слоев до 1−3 мкм [8–10].

В работе [11] представлены результаты численного моделирования модификации кремния ионами титана методом синергии высокоинтенсивной имплантации ионов и одновременного энергетического воздействия пучка на поверхность [12]. Показано, что данный метод обеспечивает возможность увеличения толщины ионно-легированного слоя за счет диффузионного переноса, вызванного импульсно-частотным нагревом. Высокая плотность мощности ионного пучка способствует усилению диффузии ионно-легированной примеси на глубины, превышающие проективный пробег ионов на несколько порядков.

В работе [13] приведены экспериментальные результаты формирования слоев толщиной от 0.1 до 1 мкм методом синергии высокоинтенсивной имплантации ионов титана в кремний и энергетического воздействия ионного пучка на поверхность.

Результаты, представленные в работе [14], показали, что при имплантации ионов титана с энергией 70 кэВ в кремний формируются ионно-легированные слои толщиной до 1.5 мкм в зависимости от времени облучения и плотности ионного тока.

В настоящей работе представлено исследование закономерностей накопления титана в кремнии от длительности, частоты импульсов и плотности энергии при фиксированной плотности мощности ионного пучка.

2. Методика эксперимента

Исследование влияния длительности и частоты импульсов на накопление и диффузию титана в кремний проводилось при фиксированной плотности мощности ионного пучка. Формирование импульсных и импульсно-периодических пучков ионов титана осуществлялось с использованием модифицированного источника ионов и плазмы „Радуга 5М“ [15]. Эксперименты проводились в течение 30 мин при токе дугового разряда 130 А, длительностях импульсов 100, 300 и 450 мкс, амплитуде ускоряющего напряжения 30 кВ и частоте импульсов 18, 6 и 4 имп/с соответственно. Плотность ионного тока достигала 1.6 А/см^2. Плотность мощности в импульсе удерживалась на уровне $9.6 \cdot 10^4$ Вт/см^2. При длительности импульсов 100 мкс плотность энергии составляла 9.6 Дж/см^2, а при 300 и 450 мкс — 28.8 и 43.2 Дж/см^2 соответственно. Флюенс облучения в экспериментах составлял $\sim 1.4 \cdot 10^{19}$ ион/см^2. Образцы были изготовлены

из монокристаллического кремния в форме квадрата со стороной 20 мм и толщиной 0.38 мм.

Элементный состав по поверхности образцов был проведен с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400 N, оснащенного энергодисперсионной приставкой Bruker XFlash 4010. Распределение примеси по глубине исследовалось методом электронной оже-спектроскопии. Глубина модифицированных слоев определялась методом атомно-эмиссионной спектроскопии с помощью спектрометра тлеющего разряда Profiler 2. Изучение фазового состава исследуемых образцов выполняли методом рентгенофазового анализа (РФА) на основании дифрактограмм, полученных с помощью дифрактометра XRD-7000 фирмы Shimadzu.

3. Экспериментальные результаты

Исследование элементного состава проводилось по поверхности образцов на площади 250×350 мкм^2. Метод позволял получить усредненное значение содержания элементов с глубины до двух микрометров. Примесь титана на поверхности образцов во всех режимах находится на одном уровне и составляла 38–39 ат.%, кремния ~ 60 ат.%. Обнаружено содержание кислорода 1–4 ат.%.

Детальное исследование накопления примеси титана по глубине было проведено методом электронной оже-спектроскопии (рис. 1–3).

Результаты исследования показали равномерное распределение ионов титана на глубине до 1.6 мкм с концентрацией, достигающей 40 ат.% при длительности импульса 100 мкс и частоте 18 имп/с. При длительности импульсов 300 мкс и частоте 6 имп/с концентрация титана снижалась до 35–38 ат.%. Увеличение длительности импульса до 450 мкс с частотой импульсов 4 имп/с привело к уменьшению концентрации титана до 14 ат.% на глубине 1.6 мкм. Из рисунков видно, что изменение длительности и частоты импульсов влияет не только на содержание примесей, но и на распределение элементов в тонком приповерхностном слое толщиной до 50 нм. Недостатком данного метода является ограничение глубины исследования.

Для определения глубины полученных ионно-легированных слоев была проведена атомно-эмиссионная спектроскопия. По профилю распределения элементов толщина ионно-легированного слоя при плотности энергии 9.6 Дж/см^2 составляла ~ 2 мкм. При увеличении плотности энергии до 28.8 Дж/см^2 толщина увеличилась до 2.4 мкм. Максимальная глубина слоя 2.6 мкм была достигнута при 43.2 Дж/см^2.

Проведенный качественный рентгенофазовый анализ показал, что во всех исследуемых образцах модифицированные слои содержат следующие фазы: дисилицид титана $TiSi_2$, силицид титана TiSi, оксид кремния SiO_2.

Количественный рентгенофазовый анализ показал, что в образцах с длительностью импульсов 100 и 300 мкс со-

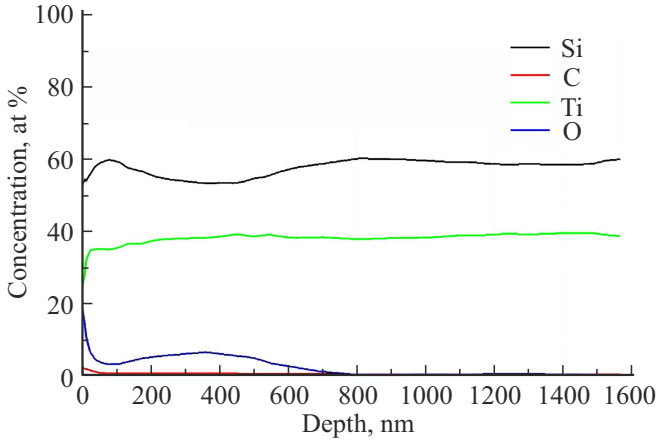

Рис. 1. Концентрационные профили распределения элементов по глубине образца, полученного при длительности импульсов 100 мкс, частоте 18 имп/с, плотности энергии 9.6 Дж/см^2.

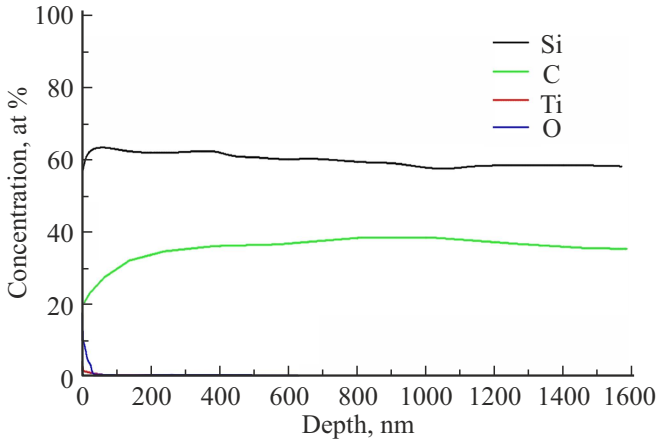

Рис. 2. Концентрационные профили распределения элементов по глубине образца, полученного при длительности импульсов 300 мкс, частоте 6 имп/с, плотности энергии 28.8 Дж/см^2.

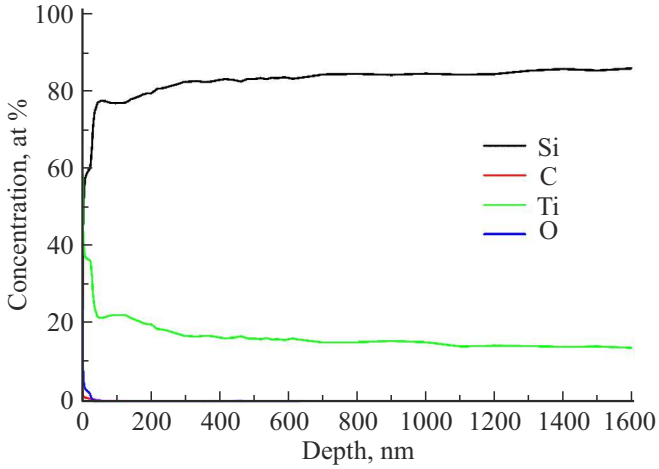

Рис. 3. Концентрационные профили распределения элементов по глубине образца, полученного при длительности импульсов 450 мкс, частоте 4 имп/с, плотности энергии 43.2 Дж/см^2.

держание фазы $TiSi_2$ одинаковое и составляет $\sim$ 88 об.%. Увеличение длительности импульсов до 450 мкс привело к незначительному снижению концентрации фазы $TiSi_2$ до 81 об.%. Анализ содержания фазы TiSi в зависимости от режимов модификации показал обратную картину. С увеличением длительности импульсов наблюдался рост процентного содержания фазы от 5 об.% до 11 об.%. Закономерность формирования фазы SiO_2 от режимов высокоинтенсивной имплантации не обнаружена, содержание фазы не превышает 7 об.%.

4. Заключение

Методом синергии высокоинтенсивной имплантации и одновременного энергетического воздействия пучка ионов титана с плотностью тока 1.6 А/см^2 и плотностью мощности $9.6 \cdot 10^4$ Вт/см^2 на поверхность кремния сформированы |hвохионно-легированные слои толщиной до 2.6 мкм. Изменение распределения примеси в тонком приповерхностном слое до 50 нм и структурно-фазового состава связано с различным энерговкладом на поверхность образцов. Методом электронной оже-спектроскопии показано, что распределение титана и кремния по исследуемой глубине равномерное. Содержание титана уменьшается с увеличением плотности энергии от 40 до 20 ат.%.

Рентгенофазовый анализ показал снижение содержания фазы $TiSi_2$ с 88 до 81 об.% с увеличением длительности импульсов и соответствующим уменьшением их частоты. Обнаружено содержание фазы TiSi на уровне 5–11 об.% в зависимости от режимов модификации, а также незначительное содержание фазы SiO_2.

Анализ полученных результатов показал, что при фиксированных параметрах пучка, таких как плотность тока 1.6 А/см^2 и плотность мощности $9.6 \cdot 10^4$ Вт/см^2, при одном флюенсе ионного облучения $1.4 \cdot 10^{19}$ ион/см^2 и значениях энерговклада 9.6, 28.8 и 43.2 Дж/см^2 на поверхность облучаемых образцов формируются глубоколегированные слои с различными глубинами и структурно-фазовыми состояниями.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10061, https://rscf.ru/project/22-79-10061/

Благодарности

Анализ структурно-фазового состояния исследуемых образцов проводился с использованием оборудования ЦКП НОИЦ „Наноматериалы и нанотехнологии“ ТПУ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J.S. Williams, J.M. Poate. *Ion Implantation and Beam Processing* (Academic Press, Orlando, 1984) p. 672.
[2] A. Anders. *Handbook of Plasma Immersion Implantation and Depositio* (John Wiley & Sons, N.Y., 2000) p. 760.
[3] R. Wei. Surf. Coat. Technol., **83**, 218 (1996).
[4] А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров. ЖТФ, **58** (3), 559 (1988).
[5] J.F. Ziegler. SRIM-2008. http://www.srim.org
[6] S.Q. Lim, A.J. Akey, E. Napolitani, P.K. Chow, J.M. Warrender, J.S. Williams. J. Appl. Phys., **129** (6), 065701 (2021).
[7] E. García-Hemme, R. García-Hernansanz, J. Olea, D. Pastor, A. del Prado, I. Mártil, G. González-Díaz. Appl. Phys. Lett., **104** (21), 211105 (2014).
[8] Z. Tong, M. Bu, Y. Zhang, D. Yang, X. Pi. J. Semicond., **43** (9), 093101 (2022).
[9] W. Kai, L. Xiao-hong, Z. Yan-bing, W. Cai, L. De-xiong. Acta Photonica Sinica, **47** (9), 916005 (2018).
[10] M-J. Sher, E.G. Hemme. Semicond. Sci. Technol., **38** (3), 033001 (2023).
[11] А.И. Иванова, Г.А. Блейхер, Д.Д. Зайцев. *Proc. 9th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effect* (Sept. 16–21, 2024, Tomsk, Russia) p. 1035.
[12] A.I. Ryabchikov. IEEE Trans. Plasma Sci., **49** (9), 2529 (2021).
[13] Д.О. Вахрушев, А.В. Гурулев, Д.Д. Ефимов, А.И. Иванова, О.С. Корнева. Изв. вузов. Физика, **66** (4), 134 (2023).
[14] А.И. Иванова, О.С. Корнева, И.А. Божко, А.В. Гурулев, Д.Д. Зайцев, И. Мерзляков. *Proc. 9th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Efft* (Sept. 16–21, 2024, Tomsk, Russia) p. 1028.
[15] A.I. Ryabchikov, D.O. Vakhrushev, S.V. Dektyarev. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **1057**, 168711 (2023).

Редактор Г.А. Оганесян

Influence of high-intensity titanium ion beam energy density on dopant accumulation and diffusion in silicon

A.I. Ivanova, O.S. Korneva, I.A. Bozhko, S.V. Dektyarev, A.V. Gurulev

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia

Abstract Ion-doped layers with a thickness up to 2.6 μm were formed using the method of synergy of high-intensity implantation and simultaneous energy impact of a titanium ion beam with a current density of 1.6 A/cm^2 on the silicon surface. The article presents the results of the regularities of titanium accumulation in silicon from the duration and frequency of pulses, when a power density of the ion beam is fixed — $9.6 \cdot 10^4$ W/cm^2. The Auger electron spectroscopy method was used to obtain dopant distributions over the modified layer depth. *X*-ray phase analysis demonstrated the presence of titanium disilicide $TiSi_2$ and titanium silicide TiSi phases.