

03,09,14

## Влияние нейтронно-легированного изотопа фосфора на микротвердость монокристаллического кремния

© Ш. Махкамов<sup>1</sup>, М.Ю. Ташметов<sup>1</sup>, М.Н. Эрдонов<sup>1</sup>, Н.Б. Исमतов<sup>1</sup>, Ш.А. Махмудов<sup>1</sup>, Ш.М. Назармаматов<sup>1</sup>, Х.М. Холмедов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup> Ташкентский университет информационных технологий имени аль-Хорезми,  
Ташкент, Узбекистан

E-mail: rdonov@inp.uzmuzaffarerdonov1978@yandex.ru, makhkamov@inp.uz

Поступила в Редакцию 15 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 1 декабря 2025 г.

Принята к публикации 2 декабря 2025 г.

Исследовано изменение микротвердости исходного кремния *n*- и *p*-типа, содержащего примеси фосфора или бора, при нейтронной трансмутации. Выявлено, что легирование кремния стабильным изотопом <sup>31</sup>P независимо от содержания фосфора в исходном кристалле приводит к увеличению микротвердости *n*-Si(P). Для кремния *p*-типа, содержащего примеси бора, микротвердость определяется соотношением концентраций бора и изотопа <sup>31</sup>P. Определено, что в *p*-Si(B) наблюдается повышение микротвердости нейтронно-трансмутационного кремния *p*-типа при соотношении концентраций  $N_{31P}/N_B > 1$ . Предложен механизм трансформации радиационных дефектных комплексов с участием изотопа <sup>31</sup>P, ответственных за изменение микротвердости кремния *n*- и *p*-типа при нейтронной трансмутации.

**Ключевые слова:** монокристаллический кремний, примесь, нейтронно-трансмутационный кремний, легирование, изотоп <sup>31</sup>P, концентрация, микротвердость.

DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62413.325-25

### 1. Введение

Микротвердость кристаллов характеризует качество и прочность полупроводниковых материалов и является одним из важных физико-механических свойств. Среди полупроводниковых кристаллов нейтронно-трансмутационный кремний является одним из базовых материалов для производства силовых полупроводниковых приборов, где основными требованиями являются высокая однородность распределения легирующей примеси по всему объему кристалла и минимальное радиальное изменение удельного сопротивления по пластине. Наличие зависимости степени трансмутационного легирования кристалла от времени облучения при постоянной плотности нейтронного потока позволяет регулировать концентрацию вводимой изотопной примеси <sup>31</sup>P в широких пределах с высокой точностью и получать монокристаллический кремний с заданными электрофизическими параметрами. Особенности ядерного легирования элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений приведены в [1], где рассмотрено влияние различных факторов на свойства ядерно-трансмутационных кристаллов.

На основе измерений микрораспределения удельного сопротивления ( $\rho$ ) в ядерно-легированном кремнии с диаметром пластин  $\simeq 40$  mm в работе [2] показано, что распределение изотопа <sup>31</sup>P в объеме образца отличается высокой однородностью. Авторами [3,4] предложены способы получения нейтронно-трансмутационного

кремния с радиальной однородностью по удельному сопротивлению для слитков с диаметром 200 mm с отклонением значений  $\rho$  до 2% по пластине. Однако в работах [2,5] выявлено, что наличие примесей кислорода и атомов фосфора в нейтронно-трансмутационном кремнии при отжиге приводит к перераспределению <sup>31</sup>P в объеме кристалла. В работе [6] рассмотрено влияние термической обработки на электрические и термоэлектрические характеристики кристаллов кремния, легированных методом ядерной трансмутации. Показано, что оптимальное значение термоэлектрической добротности ядерно-легированного кремния достигается за счет выбора температуры и длительности отжига, а также скорости охлаждения после термоотжига.

Авторами [7] предложена установка для нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) кремния диаметром 203 mm и длиной до 500 mm, позволяющая снизить неравномерность облучения слитков до 5%, путем использования графитового отражателя и нейтронного фильтра тепловых нейтронов. Улучшение радиальной однородности НТЛ карбида кремния до 1% достигнута в работе [8] вращением слитка во время облучения и оптимизацией размера щели выхода нейтронов. Для получения стабильной однородно распределенной примеси изотопа <sup>31</sup>P с концентрацией  $10^{14}$  cm<sup>-3</sup> в тонких кремниевых пленках с толщиной 5 и 15  $\mu$ m авторами [9] проводилось облучение образцов на исследовательском реакторе ИВВ-2М при плотности потока нейтронов

$1.46 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  в течение 168 h. В работе [10] показано, что настройкой спектра реактора с использованием нейтронных абсорбентов позволяет в большом диапазоне регулировать значение  $\rho$  и концентрации легирования  $^{31}\text{P}$  кремния за один цикл облучения. Возможность использования легированного изотопа  $^{31}\text{P}$  при НТЛ для определения абсолютных значений плотности тепловых нейтронов реактора в диапазоне флюенсов  $10^{12} - 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  показана в работе [11]. Авторами [12] приведены результаты по уменьшению разброса удельного электрического сопротивления по объему слитка кремния (особенно по высоте) применением облучительного устройства с кадмиевым экраном при НТЛ кремния в ядерном реакторе.

В работе [13] авторами обнаружено немонотонное изменение микротвердости монокристаллического кремния при малых дозах облучения электронами.

Анализ литературных данных показывает, что основные результаты исследований посвящены изучению влияния режимов облучения и отжига на электрофизические параметры ядерно-трансмутационного кремния, тогда как информация о физико-механических свойствах НТЛ кремния в зависимости от исходного типа проводимости и содержания фосфора или бора в литературе практически не идентифицирован. Учитывая, что кремний является одним из важнейших конструкционных материалов в микроэлектронике и широкое применение ее при изготовлении различных гибридных полупроводниковых приборов и других изделий, помимо электрофизических параметров, предъявляются также требования к физико-механическим свойствам, в частности к микротвердости. Последняя определяется степенью однородности легирования, состоянием сформированных структурных и собственных дефектов, типом и содержанием примесей в кристалле, а также их взаимодействием при нейтронной трансмутации и отжиге облученных образцов.

Ранее нами изучено влияние электронного облучения на микротвердость кремния, легированного примесью кобальта в работе [14]. При этом обнаружено снижение микротвердости кремния с увеличением степени легирования кобальтом кремния *n*-типа. Показано, что облучение электронами с энергией 4 MeV образцов из Si(Co) приводит к увеличению микротвердости как исходного, так и легированного кремния. Однако эффективность повышения микротвердости в нелегированных образцах остается выше по сравнению с кремнием, легированным кобальтом. Аналогичные результаты были получены и при легировании кремния германием [15], где с ростом концентрации германия микротвердость монокристаллического кремния снижалась.

Цель настоящей работы — исследование изменений микротвердости монокристаллов кремния с различным содержанием исходной примеси фосфора или бора, легированных изотопом  $^{31}\text{P}$  в результате нейтронной трансмутации.

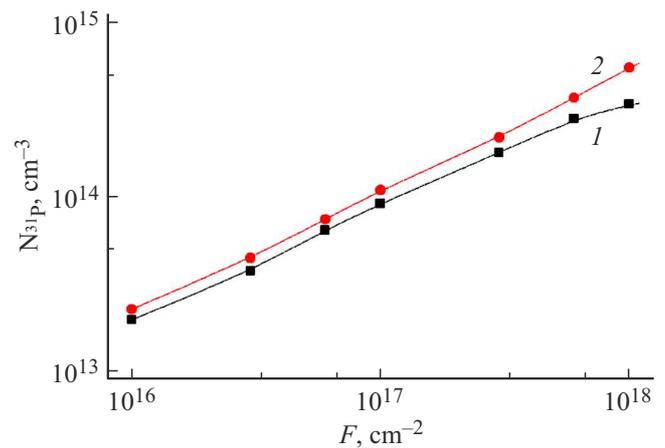


Рис. 1. Зависимость концентрации  $^{31}\text{P}$  в кремнии *n*- и *p*-типа от флюенса нейтронного облучения после отжига при  $800^\circ\text{C}$ : 1 — эксперимент, 2 — расчет.

## 2. Методика эксперимента

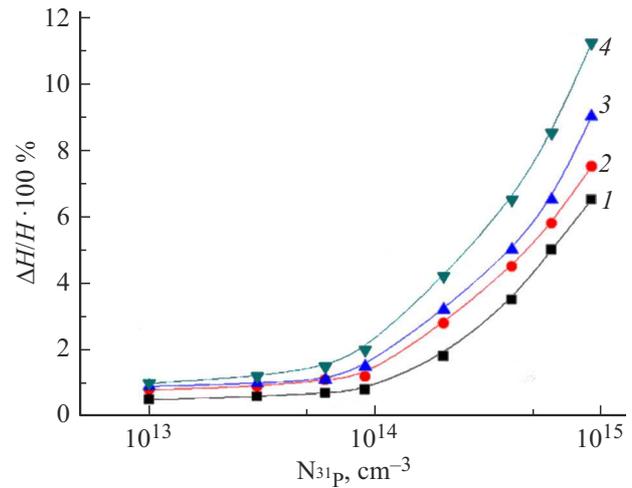
Для ядерно-трансмутационного легирования *n*-Si(P) и *p*-Si(B) был использован кремний, выращенный методом Чохральского с концентрацией исходного фосфора в пределах от  $4 \cdot 10^{13}$  до  $4.3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , бора от  $1.2 \cdot 10^{14}$  до  $2.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  и кислорода  $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  и плотностью дислокации  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$ . Нейтронное облучение пластин кремния диаметром  $\approx 45 \text{ mm}$  проводилось при температуре не выше  $60^\circ\text{C}$  в канале реактора ВВР-СМ в интервале флюенсов от  $10^{16}$  до  $4 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$  с последующим изохронным отжигом НТЛ кремния при температуре  $800^\circ\text{C}$ . Из указанных пластин *n*- и *p*-Si были изготовлены образцы размером  $2 \times 4 \times 8 \text{ mm}$ , содержащие разные исходные концентрации фосфора или бора. Изменение концентрации основных носителей тока образцов определялось по коэффициенту Холла при комнатной температуре, при этом отклонение значений радиальной однородности нейтронно-легированных (НЛ) пластин не превышало 1%. Параллельно с НЛ кремнием отжигу подвергались и необлученные образцы *n*- и *p*-Si. Измерение микротвердости (Н) проводилось с использованием цифрового микротвердомера HVS-1000 методом Виккерса на плоскости  $\langle 111 \rangle$  при нагрузке на индентор 50 g и времени нагружения 20 секунд. Разрешение микрометра при измерении диагонали отпечатка индентора составляло  $0.01 \mu\text{m}$ , измеренные значения микротвердости (HV) проводилось методом Виккерса и усреднялись по результатам 5 измерений. Затем по известной формуле

$$HV = 1.854 \cdot F/d^2$$

рассчитывали величину микротвердости, где  $F$  — приложенная нагрузка,  $d$  — среднеарифметическое диагоналей ромбического отпечатка.

### 3. Экспериментальные результаты и их анализ

Для контроля электрофизических параметров нейтронно-легированных образцов проводили измерения концентрации носителей тока в кремнии *n*- и *p*-типа до и после отжига при 800 °С в течение 2 ч. Выявлено, что с возрастанием интегральной дозы нейтронного облучения концентрация носителей тока как в *n*-, так и в *p*-Si уменьшается. Это связано с образованием разупорядоченных областей и формированием ряда спектров, компенсирующих глубокие энергетические уровни радиационных дефектных центров и их комплексов: акцепторного типа в *n*-Si и донорного типа в *p*-Si. Эти центры располагаясь в верхней и нижней половине запрещенной зоны кремния на расстоянии 0.16 до 0.45 eV от дна зоны проводимости и потолка валентной зоны и являясь ловушками носителей тока, приводят к существенному возрастанию значения  $\rho$ . Анализ положения глубоких РД центров, сформированных в исходном и нейтронно-трансмутационном Si, легированного изотопом  $^{31}\text{P}$ , при облучении гамма квантами  $^{60}\text{Co}$ , быстрыми электронами и нейтронами показывает, что энергетические уровни основных РД центров имеют практически близкие значения, что подтверждает Холловские измерения НТЛ образцов до и после отжига. Нами в работе [16] показано, что как без нагрева так при сопряженном воздействии температуры и электронного облучения с энергией 4 MeV или гамма квантами  $^{60}\text{Co}$  в кремнии *n*-типа формируются известные глубокие уровни с энергией:  $E_c - 0.17 \text{ eV}$  (V+O), дивакансии (VV)  $E_c - 0.23 \text{ eV}$  и  $E_c - 0.39 \text{ eV}$ ,  $E_c - 0.44 \text{ eV}$  (V+P), которые проявляют термостабильность от 160 °С до 320 °С. А при температурах облучение  $\geq 350 \text{ }^\circ\text{C}$  образуются дополнительные уровни с  $E_c - 0.13 \text{ eV}$  и  $E_c - 0.20 \text{ eV}$ , которые авторы [17] связывают с формированием вакансионно-кислородных комплексов  $\text{V}_2\text{O}_2$  и  $\text{V}_3\text{O}_2$  с термостабильностью до 530 °С. А в кремнии *p*-типа образуется дополнительный уровень  $E_v - 0.45 \text{ eV}$  (V+B) термостабильный до 220 °С. Однако, как показывают экспериментальные данные, при термообработке нейтронно облученных образцов Si при 800 °С в течение  $\approx 2 \text{ h}$  происходит полный отжиг точенных и всех сформированных компенсирующих радиационных дефектов и их комплексов [1] и повышается концентрация основных носителей тока *n*-кремния в результате образования мелкого стабильного донорного уровня примеси  $^{31}\text{P}$  с  $E_c - 0.045 \text{ eV}$  т.е. отжиг является неотъемной частью технологического процесса нормализации параметров НТЛ кремния. Для *p*-Si изменение концентрации носителей тока определяется содержанием бора в необлученном кремнии и концентрацией изотопа  $^{31}\text{P}$ , образующегося при нейтронной трансмутации. Сформированный мелкий донорный уровень в верхней половине запрещенной зоны, приводит к дополнительной компенсации *p*-Si(B). В результате тип проводимости и концентрация носителей тока после отжига нейтронно-легированного *p*-кремния зависят от



**Рис. 2.** Относительное изменение микротвердости нейтронно-легированного кремния *n*-типа в зависимости от концентрации изотопа  $^{31}\text{P}$ : после облучения (1, 3) и после термообработки при 800 °С (2, 4). Содержание фосфора в исходном *n*-Si;  $\text{см}^{-3}$ : 1, 2 —  $4 \cdot 10^{13}$ ; 3, 4 —  $4.3 \cdot 10^{14}$ .

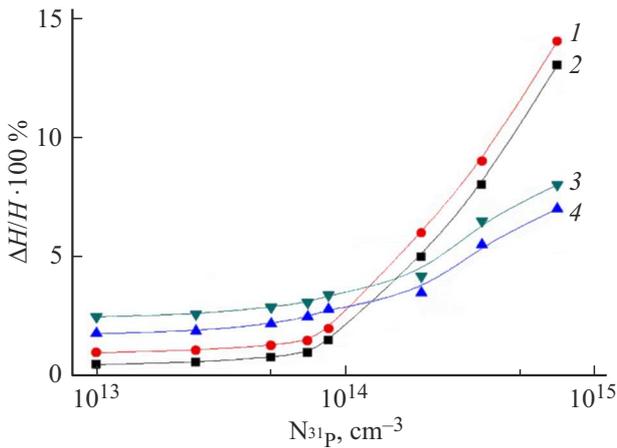
соотношения концентраций исходного бора и изотопа  $^{31}\text{P}$ . Следует отметить, что при нейтронном облучении кремния один из трех естественных стабильных изотопов —  $^{30}\text{Si}$  при взаимодействии с тепловыми нейтронами по реакции  $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si} \xrightarrow{\beta^-} ^{31}\text{P}$ , превращается в донорный стабильный изотоп  $^{31}\text{P}$ , а возбужденные ядра  $^{31}\text{Si}$  переходят в стационарное состояние, испуская  $\beta$ -частицы и гамма кванты, энергии которых достаточно для образования радиационных дефектов т.е. при воздействии тепловых нейтронов на Si не зависимо от исходного типа проводимости кристалла образуются как изотоп  $^{31}\text{P}$  так и вышеприведенные термически нестабильные радиационные дефектные центры.

Изменение концентрации  $^{31}\text{P}$  в кремнии *n*- и *p*-типа в зависимости от флюенса нейтронного облучения до  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  после отжига при 800 °С в течение 2 ч показано на рис. 1 (кривая 1). Как видно, концентрация образованного изотопа  $^{31}\text{P}$  увеличивается с ростом дозы нейтронного облучения и не зависит от исходного типа кремния. Для сопоставления полученных экспериментальных данных с учетом режимов облучения и доли медленных нейтронов в общем потоке реакторных нейтронов проведен расчет концентрации введенного  $^{31}\text{P}$  (рис. 1, кривая 2) по формуле:

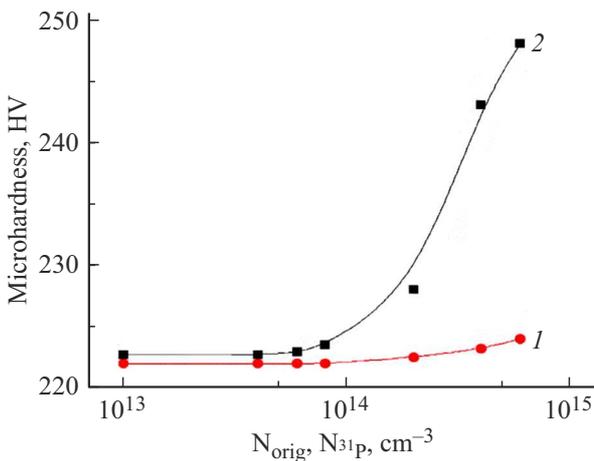
$$N(^{31}\text{P}) = N \cdot K \sigma \phi t,$$

где  $N$  — число атомов кремния в  $1 \text{ см}^{-3}$ ,  $K$  — относительное содержание изотопа  $^{30}\text{Si}$  в естественной смеси,  $\sigma$  — эффективное сечение радиационного захвата тепловых нейтронов в  $^{30}\text{Si}$ ,  $\phi$  — плотность потока медленных нейтронов,  $t$  — время облучения.

Проведенные измерения коэффициента Холла и расчет концентрации  $^{31}\text{P}$  в образцах кремния, отожженных



**Рис. 3.** Относительное изменение микротвердости в нейтронно-легированном кремнии *p*-типа в зависимости от концентрации изотопа  $^{31}\text{P}$ : после облучения (2, 4) и после термообработки при  $800^\circ\text{C}$  — (1, 3); содержание бора в исходном *p*-Si;  $\text{cm}^{-3}$ : 1, 2 —  $1.2 \cdot 10^{14}$ ; 3, 4 —  $2.5 \cdot 10^{15}$ .



**Рис. 4.** Зависимость микротвердости *n*-Si от концентрации фосфора и изотопа  $^{31}\text{P}$  после отжига  $800^\circ\text{C}$ : 1 — без изотопа  $^{31}\text{P}$ ; 2 — легированный изотопом  $^{31}\text{P}$ .

при  $800^\circ\text{C}$  после нейтронного облучения в диапазоне флюенсов от  $10^{16}$  до  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  показали, что экспериментальные и расчетные значения  $N(^{31}\text{P})$  находятся в хорошем согласии.

Зависимости микротвердости ( $H$ ) кремния *n*- и *p*-типа, содержащих различные концентрации фосфора ( $N_{\text{P}}$ ) или бора ( $N_{\text{B}}$ ) в необлученных кристаллах, после облучения нейтронами и последующего отжига приведены на рис. 2 и 3. Полученные результаты показали, что в *n*-Si с ростом концентрации изотопа  $^{31}\text{P}$  микротвердость НЛ образцов возрастает, при этом на эффективность изменения значения  $H$  влияет содержание фосфора в необлученных образцах (рис. 2). Повышение концентрации фосфора в необлученном кристалле от  $4 \cdot 10^{13}$  до  $4.3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  после отжига нейтронно-легированных

образцов приводит к увеличению  $H$  от 7% до 12% соответственно (рис. 2, кривые 2, 4).

Отметим, что слабое повышение микротвердости в нейтронно-легированных образцах *n*-Si( $\text{P}$ ) было обнаружено и до проведения отжига, что может быть связано с трансформацией междоузельных собственных дефектов  $^{30}\text{Si}$ , приводящих к увеличению энергии межатомных связей кристаллической решетки кремния. [А Вклад исходной концентрации  $\text{P}(N_{\text{исх}})$  и содержания изотопов  $^{31}\text{P}(N_{31\text{P}})$  с учетом их суммарной концентрации ( $N_{\text{исх}} + N_{31\text{P}}$ ) в изменение микротвердости нейтронно-легированного кремния представлен на рис. 4. Как видно из сопоставления микротвердости облученных и необлученных образцов *n*-Si с идентичной общей концентрацией фосфора при условии ( $N_{\text{P}} = N_{\text{исх}} + N_{31\text{P}}$ ), увеличение  $N_{\text{P}}$  в необлученном кремнии в пределах концентрации от  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  практически не влияет на значение микротвердости (рис. 4, кривая 1). Однако повышение суммарной концентрации фосфоров ( $N_{\text{исх}} + N_{31\text{P}}$ ) в НЛ кремния до значений, характерных для необлученных образцов, приводит к увеличению микротвердости до 14%, для *n*-Si с  $N_{\text{исх}} \approx 8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

Изменение микротвердости нейтронно-легированного *p*-Si( $\text{B}$ ) (рис. 3) отличается от поведения *n*-Si( $\text{P}$ ). При исследовании микротвердости исходного кремния, легированного бором (Si( $\text{B}$ )), в зависимости от концентрации бора в диапазоне  $1.2 \cdot 10^{14} - 2.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  обнаружено незначительное изменение микротвердости  $H$ . Облучение этих образцов нейтронами показало, что изменение микротвердости (рис. 3, кривая 1–4 в *p*-Si( $\text{B}$ )) зависит от содержания бора ( $N_{\text{B}}$ ) в необлученном кремнии и определяется соотношением концентраций  $N_{\text{B}}$  и  $N_{31\text{P}}$  изотопа  $^{31}\text{P}$ , образующегося при нейтронной трансмутации. Установлено, что при соотношении  $N_{31\text{P}}/N_{\text{B}} < 1$  наблюдается незначительное снижение микротвердости по сравнению с необлученным *p*-Si( $\text{B}$ ), с выходом на плато при  $N_{\text{B}} \approx N_{31\text{P}}$ . При дальнейшем увеличении соотношения  $N_{31\text{P}}/N_{\text{B}} > 1$ , с ростом концентрации  $^{31}\text{P}$ , микротвердость начинает возрастать и определяется дозой нейтронного облучения кремния. Отжиг облученных образцов при  $800^\circ\text{C}$  в течение 2 h приводит к дополнительному повышению микротвердости *p*-Si( $\text{B}$ ) до 12% с концентрацией  $N_{\text{B}} = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (рис. 3 кривая 1). Такое поведение микротвердости в *p*-Si( $\text{B}$ ) и *n*-Si( $\text{P}$ ) может быть связано с уменьшением концентрации точечных и радиационных дефектных комплексов вследствие их аннигиляции на дислокациях в процессе отжига, а также со снижением величины внутренних упругих напряжений при увеличении концентрации  $^{31}\text{P}$  в *n*-Si( $\text{P}$ ). В случае *p*-Si( $\text{B}$ ) рост микротвердости может быть связан со снижением параметра решетки кремния вследствие уменьшения длины ковалентной связи в Si( $\text{B}$ ) при введении изотопа фосфора.

Отметим, что изохронный отжиг необлученного исходного кремния *n*- и *p*-типа при  $800^\circ\text{C}$  в течение 2 h не привело к заметному изменению микротвердости образцов.

Таким образом, установлено, что эффективность изменения микротвердости нейтронно-легированного  $n$ -Si⟨P⟩ и  $p$ -Si⟨B⟩ определяется содержанием фосфора или бора в исходном кремнии и концентрацией трансмутационного  $^{31}\text{P}$ . Увеличение содержания  $N_P$  и  $N_{31P}$  в  $n$ -Si приводит к возрастанию микротвердости, тогда как увеличение содержания  $N_B$  в  $p$ -Si, в области малых концентраций  $^{31}\text{P}$  т.е.  $N_{31P} < N_B$  способствует ее снижению при нейтронном легировании.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований микротвердости нейтронно-трансмутационного кремния, содержащего примеси фосфора или бора, установлено, что эффективность повышения микротвердости при идентичных концентрациях  $N_P$ ,  $N_B$  и режимах нейтронного легирования в  $n$ -Si⟨P⟩ выше, чем в  $n$ -Si⟨B⟩, и определяется концентрацией радионуклида  $^{31}\text{P}$ . Обнаружено, что в нейтронно-легированном кремнии  $p$ -типа, содержащем примеси бора, увеличение микротвердости наблюдается при соотношении концентраций  $N_{31P}/N_B > 1$ .

#### Финансирование работы

Работа финансируется за счет средств государственного бюджета Республики Узбекистан.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л.С. Смирнова, Новосибирск: „Наука“. (1980). 296 с.
- [2] W.E. Has, M.C. Schnoller. Silicon Doping by Nuclear Transmutation // *Electronic materials*. **5**, 1, 57 (1978).
- [3] Artur Wilson Carbonari. Proceedings of the 4 Brailian meeting on Nuclear Applications, **2**, 71 (1997).
- [4] L. Anders, M. Græsvænge, C. Hindrichsen. *J. Cryst.* **512**, 65 (2019). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.02.017
- [5] И.М. Гресъков, С.П. Соловьев, В.А. Харченко. *ФТП* **11**, 8, 1598 (1977).
- [6] Г.П. Гайдар. *Электронная обработка материалов*, **56**, 6, 61 (2020)
- [7] I.I. Lebedev, D.E. Zolotikh, A.G. Naymushin, N.V. Smolnikov, M.N. Anikin, V.A. Varlachev. *Atom Indonesia* **47**, 1, 39–44 (2021). DOI: <https://doi.org/10.17146/aij.2021.1005>
- [8] Do Hyun Kim, Han Rim Lee, Jiseok Kim, Myong-Seop Kim, Byung Gun Park. *Journal of the Korean Physical Society* **79**, 12–18 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40042-021-00178-z>
- [9] Andrey Isakov, Sergey Khvostov, Evgeny Kinev, Michael Laptev, Anastasia Khudorozhkova, Olga Grishenkova, Vladimir Rychkov and Yurii Zaikov. *Journal of The Electrochemical Society* **167**, 8, (2020). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab933c>.
- [10] J. Van de Pitte, J. Wagemans, A. Gusarov, I. Uytendhouwen, C. Detavernier, J. Lauwaert. *NUCLEAR TECHNOLOGY* 2020. American Nuclear Society <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1697172>
- [11] V.A. Varlacheva, E.G. Emetsa, Yu. Mua, E.A. Bondarenkoa, V.A. Govorukhina. *Instruments and Experimental Techniques* **65**, 6, 887–890 (2022).
- [12] А.А. Шаймерденов, Н.К. Романова, Д.С. Сайранбаев, Ш.Х. Гизатулин. *Вестник НЯЦ РК* **3**, 9–14 (2021).
- [13] Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, И.А. Пушкин, Н.Ю. Сучкова. *ФТТ* **46**, 10, 1790 (2004).
- [14] M.Yu. Tashmetov, Sh. Makhkamov, M.N. Erdonov, R.P. Saidov, N.T. Sulaymanov, T.S. Tillaev, Kh.M. Kholmedov. *AIP Conf. Proc.* **3020**, 040006 (2024).
- [15] С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич. Д.И. Бринкевич. *Вестник полоцкого государственного Университета. Серия С. Фундаментальные науки* **3**, 109 (2010).
- [16] Ш. Махкамов, М.Ю. Ташметов, М.Н. Эрдонов, Р.П. Саидов, Х.М. Холмедо. XIII международной научной школы-конференции по радиационной физике, посвященная 90-летию А.А. Алыбакова — основателя физики твердого тела в Кыргызской Республике. 31 июля–6 августа. С. 15–18 (2023)
- [17] Е.А. Толкачева, В.П. Маркевич, Л.И. Мурин. *ФТП* **52**, 9, 973 (2018).

Редактор Т.Н. Василевская