

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.302.8:53953

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-145-153>

Поступила в редакцию 14.01.2021

Received 14.01.2021

В. В. Емельянов¹, В. А. Емельянов¹, В. В. Баранов¹, В. В. Буслюк²¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь*²*Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь***ФОРМИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОЙ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ
В КРЕМНИЕВЫХ ДИОДАХ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА**

Аннотация. Исследованы возможности и методы создания стабильной дефектной, в том числе дислокационной, структуры вблизи зон p - n -переходов кремниевых диодов генераторов шума на пластинах с кристаллографической ориентацией (111) и (001). Эффективное управление распределением неконтролируемых примесей в монокристаллическом кремнии достигается путем формирования в его объеме стабильной дислокационной структуры. При этом для получения воспроизводимых характеристик диодов генераторов шума необходимо, чтобы плотность дислокаций была однородной по всей площади пластины. Поскольку на краю дислокационного следа плотность дислокаций несколько ниже, чем в его середине, то это означает, что дислокационные следы, образованные соседними зонами оплавления с помощью лазерного пучка, должны перекрываться. На основании экспериментальных исследований установлено, что необходимая степень равномерности плотности генерируемых дефектов достигается при соблюдении условия $a = (1,5-5,0)d$, где a – шаг, d – ширина лазерного пятна на пластине. Процесс оплавления проводили в среде азота с применением лазерной установки геттерирования. Реальная ширина зоны оплавления оказалась немного больше диаметра лазерного пятна за счет теплопроводности кремния и составила ~ 10 мкм. Усиление генерации дислокаций на образующихся включениях Si_3N_4 в отличие от дислокаций на границе Si-SiO_2 приводит к дополнительному расширению дислокационного следа на рабочей поверхности пластины. Стабильность дислокационной структуры, а также наличие в местах дислокаций примесных и вторичных атомов металлов в исследуемой структуре ND 103L подтверждены методом вторичной ионной масс-спектропии (SIMS). Результаты исследования прошли апробацию в ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и могут быть использованы при изготовлении кремниевых диодов генераторов шума.

Ключевые слова: монокристаллический кремний, диод генератор шума, твердотельная структура, примеси, дислокации, процесс формирования, свойства

Для цитирования: Формирование стабильной дефектной структуры в кремниевых диодах генераторов шума / В. В. Емельянов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №2. – С. 145–153. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-145-153>

Viktor V. Emelyanov¹, Viktor A. Emelyanov¹, Valentin V. Baranov¹, Viktor V. Busliuk²¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*²*Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus***FORMATION OF A STABLE DEFECTS STRUCTURE IN SILICON NOISE DIODES**

Abstract. The possibilities and methods of creating a stable defective structure, including dislocation structure near the zones of p - n -transitions of silicon diodes of noise generators on plates with crystallographic orientations (111) and (001) have been investigated. The effective distribution control of uncontrolled impurities in monocrystalline silicon is achieved by forming a stable dislocation structure in its volume. In order to obtain the reproducible characteristics of noise generator diodes, it is necessary that the dislocation density be homogeneous throughout the plate area. Since the density of dislocations is slightly lower at the edge of the dislocation trail than in the middle, this means that the dislocation traces formed by the adjacent melting zones with the help of a laser beam should overlap. On the basis of experimental studies, it has been established that the necessary degree of uniformity of the density of defects generated is achieved by compliance with the condition of $a = (1.5-5.0)d$, where a is a step, d is a width of the laser spot on the wafer. The melting process was carried out in a nitrogen environment using a laser hetering unit. The real width of the melting zone turns out to be slightly larger than the diameter of the laser spot due to the thermal conductivity of the silicon and is about $10 \mu\text{m}$. Increased dislocation generation on the Si_3N_4 inclusions, as opposed to dislocations on the Si-SiO_2 border, leads to an additional expansion of the dislocation track at the work surface of the plate of noise diodes. The presence of the stable dislocation structure, as well as the presence of impurities and secondary metal atoms in the noise diodes ND 103L structure are confirmed by the secondary ion mass spectroscopy (SIMS) method. The results of the study have been tested at Corporation “INTEGRAL” (Belarus) and can be used in the manufacture of silicon noise diodes.

Keywords: mono-crystal silicon, noise diodes, solid-state structure, impurities, dislocation, formation process, properties

For citation: Emelyanov V. V., Emelyanov V. A., Baranov V. V., Busliuk V. V. Formation of a stable defects structure in silicon noise diodes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 145–153 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-145-153>

Введение. Известно, что работающие средства вычислительной техники излучают электромагнитные волны, перехват которых позволяет получить несанкционированный доступ к отображаемой информации с расстояния более 100 м [1]. Эффективная защита этой информации достигается использованием генераторов шума, работающих в том же частотном диапазоне [2]. Принцип действия таких генераторов основан на процессах генерации и рекомбинации носителей заряда на электрически активных дефектах в области p – n -перехода полупроводниковых приборов, так называемых диодов генераторов шума (ДГШ), или шумовых диодов. Управление дефектностью полупроводникового материала (чаще всего кремния) позволяет управлять характеристиками таких генераторов.

Одним из приемов возбуждения шума в полупроводниковом приборе (чаще всего диоде) является легирование его материала примесями, создающими глубокие уровни в запрещенной зоне [3]. Как правило, эти примеси содержатся уже в исходном кремнии [4–7] либо неконтролируемо вносятся в течение технологического цикла создания активных областей прибора. Управление режимами формирования этих областей позволяет сконцентрировать примеси в активной области и добиться приемлемого уровня генерации. Общим недостатком известных технических решений является постоянное перераспределение примесей по всему объему кремния под действием механических напряжений, которые в свою очередь подвержены постоянной динамике, обусловленной структурно-фазовыми превращениями. Вследствие этого требуемое распределение примесей, ответственных за генерацию шума, является крайне невозпроизводимым, а выход годных приборов низким.

Эффективное управление распределением неконтролируемых примесей в полупроводниковом кремнии обычно достигается путем формирования в объеме пластины стабильной дислокационной структуры, поглощающей эти примеси. Такие структуры, называемые геттерами, предназначены для удаления неконтролируемых примесей из активных областей приборов. Научные основы и технология их формирования в настоящее время отработаны достаточно хорошо. Однако применительно к ДГШ требуется решить обратную задачу – создать стабильную дефектную структуру именно в активной области прибора.

Такая структура может быть создана пучком лазера (патент Республики Беларусь №668 от 03.01.95 «Способ лазерного геттерирования примесей в полупроводниковых пластинах», авторы – Э. К. Лашицкий, В. А. Зеленин, В. А. Пилипенко, В. И. Кульгачев, С. Б. Ластовский). Под воздействием лазерного пучка возникают зоны плавления, которые быстро охлаждаются и кристаллизуются в неравновесных условиях, за счет чего создают области повышенных механических напряжений. Перемещение лазерного луча по поверхности пластины приводит к возникновению параллельных зон плавления с измененной морфологией поверхности и включениями продуктов взаимодействия кремния с окружающей средой. Формирование дислокационной структуры при дальнейшей термообработке протекает за счет релаксации как термических напряжений, возникших вследствие неравновесной кристаллизации, так и структурных напряжений на границе раздела кремния с вновь образованными включениями.

Распределение плотности дислокаций по объему пластины определяется взаимным расположением плоскостей генерации и скольжения дислокаций и рабочей поверхности, то есть зависит от ее кристаллографической ориентации. Поэтому процессы дефектообразования необходимо рассматривать в тесной взаимосвязи с кристаллографическими факторами, в том числе с ориентацией пластины. При этом следует учесть тот факт, что формирование структуры генераторов шума требует наличия стабильной сетки дислокаций в активной области, то есть вблизи лицевой поверхности пластины.

Также следует отметить, что проведение лазерной обработки кремния на воздухе приводит к взаимодействию расплавленного кремния с кислородом и образованием его оксидов, преимущественно диоксида. Включение диоксида кремния в зоны плавления влечет за собой

возникновение вокруг них дополнительных областей механических напряжений, обусловленных разностью коэффициентов линейного термического расширения кремния и его диоксида. Эти включения также являются центрами зарождения дислокаций. Однако диоксид кремния характеризуется наличием множества структурно-фазовых переходов в широком температурном интервале, что предопределяет интенсивное и слабоуправляемое скольжение дислокаций в процессе изготовления приборов.

Задачей настоящего исследования является стабилизация дислокационной структуры в кремниевых пластинах ориентации (111) и (001), что оказывает положительное влияние на воспроизводимость заданных параметров ДГШ и их температурную и временную стабильность.

Методика исследования. Изучение микроструктуры и особенностей топологии ДГШ проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) при помощи аппарата Hitachi S 4800 (Япония), а также методом вторично-ионной масс-спектроскопии (SIMS) на времяпролетном масс-спектрометре TOF.SIMS 5 (фирмы IONTOF, Германия).

Контроль электрофизических параметров кристаллов осуществляли с использованием зондовой станции Cascade (США), а электрических параметров диодов после сборки – при помощи комплекса Agilent B 1500 A (США), а также на специализированном измерителе параметров шумовых диодов АКЖД (ОАО «Планар», Республика Беларусь).

Результаты и обсуждение. Создание заданной дефектности в кремниевой пластине обеспечивается лазерным пучком, направленным с обратной стороны пластины, под действием которого формируются параллельные зоны оплавления с определенной шириной и шагом.

Наиболее энергетически выгодные кристаллографические плоскости генерации дислокаций задаются кристаллографическими направлениями расположения зон плавления. Распределение плотности дислокаций по объему пластины определяется взаимным расположением плоскостей генерации и скольжения дислокаций и рабочей поверхности, то есть зависит от ее кристаллографической ориентации. Нами рассматривались структуры, изготовленные на пластинах с такими кристаллографическими плоскостями, как (111) и (001).

В кремниевой пластине ориентации (111) с полированной рабочей поверхностью и толщиной, обеспечивающей необходимую прочность, на нерабочей стороне лазером формировали параллельные зоны плавления с определенными шириной (10–100 мкм) и шагом, при этом зоны плавления были ориентированы, по крайней мере, в одном из возможных кристаллографических направлений типа $\langle 112 \rangle$, а также содержали включения нитрида кремния.

При этом использована установка лазерного геттерирования ЭМ-227, которая позволяет регулировать размер лазерного пятна в широких пределах, и установлено, что оплавление поверхности кремния, необходимое для генерации дислокаций при минимальной скорости сканирования, наблюдается при диаметре пятна ~100 мкм. С учетом отмеченного процесс оплавления проводили в среде азота. Мощность лазерного луча достигала 120 Вт, а скорость сканирования – до 1,2 м/с. Минимальный диаметр лазерного пятна составляет несколько микрометров, однако ввиду большой плотности мощности излучения лазера в этом случае реальная ширина зоны оплавления оказалась немного больше диаметра лазера за счет теплопроводности кремния и составила ~10 мкм.

Действительно, в монокристаллическом кремнии основными плоскостями скольжения дислокаций являются кристаллографические плоскости типа $\{111\}$ и $\{110\}$. В пластине ориентации (111) плоскости типа $\{111\}$ расположены под углами $\alpha_1 = 0^\circ$, то есть параллельно поверхности, а плоскости типа $\{110\}$ расположены под углами $\alpha_3 = 90^\circ$, то есть перпендикулярно поверхности.

Ориентация зон оплавления в направлениях $[\bar{1}10]$, $[10\bar{1}]$ и $[0\bar{1}1]$ позволяет сформировать сетку дислокаций в плоскостях (110) и (111), (101) и (111), (011) и (111) попарно, соответственно кристаллографическому направлению ориентации зоны плавления. Генерация дислокаций именно в этих плоскостях энергетически наиболее выгодна и обусловлена тем, что возникающие от механических напряжений на границе раздела изгибающие моменты перпендикулярны границам этих зон. При этом генерируемые дислокации пересекаются друг с другом на некотором расстоянии от поверхности пластины, в результате чего их дальнейшее проникновение в направлении рабочей поверхности блокируется вследствие образования дислокационных полупетель, закрепленных концами на обратной стороне пластины.

В данном случае именно в отмеченных плоскостях энергия образования дислокаций минимальна. При этом дислокации практически беспрепятственно прорастают на рабочую поверхность и формируют на ней характерный дислокационный след, форма которого соответствует форме зоны плавления. Однако фактическая ширина этого следа несколько больше ширины зоны плавления. Данное явление обусловлено следующими факторами. По мере формирования зон оплавления возникающие в пластине механические напряжения частично релаксируют через ее деформацию, то есть изгиб. При этом возникает взаимодействие локальных механических напряжений, вызванных соседними зонами плавления, на некотором расстоянии от поверхности пластины. Величина этого взаимодействия зависит от ширины зон плавления и расстояния между ними. Последующая термообработка для активной генерации дислокаций приводит к их возникновению не только в соответствии с действием вектора напряжений от конкретной зоны плавления, но и в области взаимодействия напряжений от соседних зон.

Создание стабильной дислокационной структуры в объеме полупроводника в дальнейшем обуславливает управляемое осаждение (управляемой сегрегации) в области p - n -перехода легирующих и неконтролируемых технологических фоновых примесей, таких как медь, железо, кальций, а также других примесей, том числе щелочных металлов и их соединений. Такие металлы, как известно, также формируют в запрещенной зоне полупроводника при обратном смещении ионизированные глубокие уровни, способствующие микроплазменному шуму [8].

Включения нитрида кремния, образованного при взаимодействии расплавленного кремния с азотом, по сравнению с диоксидом кремния являются более эффективными центрами зарождения дислокаций. Это обусловлено тем, что использование высоких температур при изготовлении полупроводниковых приборов и отсутствие полиморфных превращений Si_3N_4 приводит к возникновению более высоких механических напряжений на границе раздела $\text{Si-Si}_3\text{N}_4$, чем на границе Si-SiO_2 [9, 10]. Усиление генерации дислокаций на включениях Si_3N_4 влечет за собой дополнительное расширение дислокационного следа на рабочей поверхности. Для получения воспроизводимых характеристик шумовых диодов необходимо, чтобы плотность дислокаций была однородной по всей площади пластины. Поскольку на краю дислокационного следа плотность дислокаций несколько ниже, чем в его середине, то это означает, что дислокационные следы, образованные соседними зонами плавления, должны перекрываться.

При проведении экспериментальных исследований с тыльной стороны кремниевой пластины ориентации (111) лазером формировали параллельные зоны оплавления с определенными шириной (10–100 мкм) и шагом.

На рис. 1 схематически показано сечение кремниевой пластины с зонами движения дислокаций, помеченных точками.

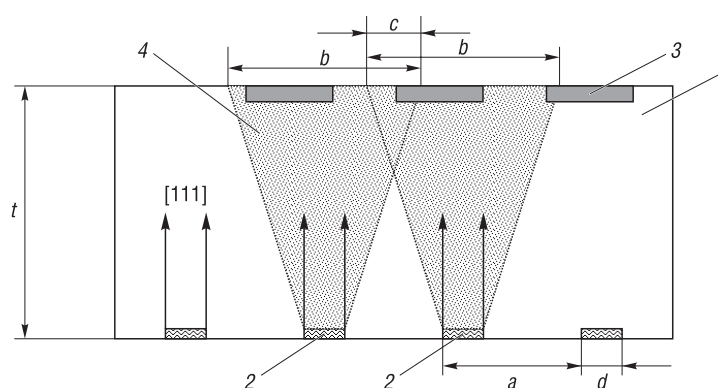


Рис. 1. Поперечное сечение кремниевой пластины: 1 – пластина, 2 – зона плавления, 3 – активная область, 4 – зона генерации дислокаций; a – шаг, b – дислокационный след, c – область перекрытия, d – ширина, t – толщина пластины

Fig. 1. Cross-section of the silicon wafer: 1 – a wafer, 2 – zone of welding, 3 – an active area, 4 – zone of dislocations generation; a – a distance, b – the dislocation track, c – an area of re-covering, d – width, t – the wafer thickness

На основании проведенных исследований установлено, что необходимая степень равномерности плотности генерируемых дефектов достигается при соблюдении условия $a = (1,5-5,0)d$, где a – шаг, d – ширина лазерного пятна на пластине.

Дополнительным фактором, способствующим генерации дислокаций, является некоторая неоднородность края зоны оплавления, обусловленная как пульсацией лазерного луча, так и процессами конвекции расплавленного кремния.

Стабилизация дислокационной структуры в пластине достигается следующим образом. Механические напряжения на тыльной (нерабочей) стороне пластины, обусловленные процессами неравновесной кристаллизации кремния и наличием в зонах оплавления включений нитрида кремния, при термообработке релаксируют через образование дислокаций, которые достигают активных областей на лицевой (рабочей) поверхности пластины в наиболее энергетически выгодном кристаллографическом направлении $[111]$ в плоскости $(\bar{1}\bar{1}0)$, перпендикулярной поверхности. Такое взаимное расположение преимущественной плоскости генерации дислокаций и плоскости поверхности пластины предопределяет максимально достижимую плотность дислокаций при минимальных механических напряжениях, поскольку расположение дислокаций под углом к поверхности сопровождается увеличением их длины и, соответственно, большими энергетическими затратами на их образование. Минимальная длина дислокаций, лежащих в рассматриваемых плоскостях, обуславливает и дальнейшую устойчивость к воздействию различных технологических факторов, поскольку их расщепление на более короткие звенья менее вероятно. Включения нитрида кремния в зонах плавления термически стабильны и не подвержены полиморфным превращениям, поэтому генерируемые ими дислокации не склонны к самоуничтожению, как в случае с включениями диоксида кремния. Формирование расширяющейся зоны генерации дислокаций за счет взаимодействия локальных механических напряжений от соседних зон плавления, а также за счет пульсации лазера и наличия включений Si_3N_4 позволяет на рабочей поверхности пластины получить равномерную плотность дислокаций за счет областей перекрытия с дислокационных следов b от соседних зон оплавления. Стабильность источников дислокаций, обусловленная ориентацией зон оплавления и термостабильностью включений нитрида кремния, дает возможность легко управлять их плотностью на рабочей стороне пластины в активных областях ДГШ исходя из выбора соотношения между шириной d и шагом a зон оплавления. Воспроизводимые и управляемые параметры дефектности кремния, в свою очередь, позволяют получать воспроизводимые электрические характеристики ДГШ.

Для пластин ориентации (001) плоскости типа $\{111\}$ наклонены к поверхности под углом $\sim 54^\circ 44'$, плоскости (110) и $(\bar{1}\bar{1}0)$ перпендикулярны ей, а плоскости (101) , $(10\bar{1})$, (011) и $(0\bar{1}1)$ наклонены под углом 45° .

Зоны оплавления на поверхности пластины ориентации (001) могут быть выполнены в одном из двух основных кристаллографических направлений, а именно $\langle 100 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$.

При ориентации зон оплавления в одном из двух возможных направлений типа $\langle 100 \rangle$, то есть в направлениях $[100]$ и $[010]$, генерация и скольжение дислокаций возможны только в плоскостях (101) , $(10\bar{1})$, (011) и $(0\bar{1}1)$, которые наклонены под углом 45° к поверхности пластины. Генерация дислокаций именно в этих плоскостях в данном случае энергетически наиболее выгодна и обусловлена тем, что возникающие изгибающие моменты перпендикулярны зонам плавления. Плоскости (101) , $(10\bar{1})$, (011) и $(0\bar{1}1)$ перпендикулярны друг другу, поэтому генерируемые в этих плоскостях дислокации блокируют друг друга в точках их пересечения с образованием дислокационных полупетель, закрепленных концами на обратной стороне пластины. Количество дислокаций, прорастающих в активную область, в этом случае ничтожно мало.

При ориентации зон плавления в одном из двух возможных направлений типа $\langle 110 \rangle$, а именно в направлениях $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$, генерация и скольжение дислокаций возможны в плоскостях (111) , $(1\bar{1}1)$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(\bar{1}11)$, (110) и $(\bar{1}\bar{1}0)$. Однако в связи с тем, что плоскости типа $\{111\}$ наклонены к поверхности, энергетически, наиболее выгодными плоскостями образования и скольжения дислокаций являются плоскости (110) и $(\bar{1}\bar{1}0)$, которые перпендикулярны поверхности пластины. Влияние плоскостей типа $\{111\}$ проявляется в том, что дислокации растут не строго по плоскостям (110) и $(\bar{1}\bar{1}0)$, а с некоторым отклонением в сторону сопряженных с ними плоскостей $(111)_2$, $(1\bar{1}1)$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(\bar{1}11)$, то есть веерообразно от зоны плавления с плоскостями симметрии (110) и $(\bar{1}\bar{1}0)$. Сечение области повышенной плотности дислокаций в объеме пластины плоскостью,

перпендикулярной расположению зон плавления, в этом случае можно условно представить как трапецию, которая меньшим основанием опирается на зону плавления на нерабочей стороне, а ее большее основание представляет собой дислокационный след этой зоны на рабочей поверхности пластины, то есть область повышенной дефектности на рабочей поверхности пластины несколько шире зоны плавления. Уменьшение шага зон плавления приводит к расширению дислокационного следа вследствие усиления взаимодействия дислокаций, расположенных в плоскостях типа {111}.

Отображение наличия и фактической дислокации некоторых примесных атомов в исследуемой структуре ДГШ ND 103L представлено на рис. 2. Видно, что расположение меди как типичного представителя неконтролируемо вносимого металла в течение технологического цикла создания активных областей прибора (за счет недостаточной очистки промывных вод, технологической оснастки, оборудования) сконцентрировано в центре активной области высоколегированной фосфором структуры, в местах прорастания дислокаций.

Некоторые количественные характеристики дислокационной структуры по поверхности шлифа ДГШ, полученные на масс-спектрометре TOF.SIMS 5 (табл. 1), и профили концентрации некоторых из них приведены на рис. 3. Проценты выхода годных ДГШ в технологическом процессе их изготовления показаны в табл. 2.

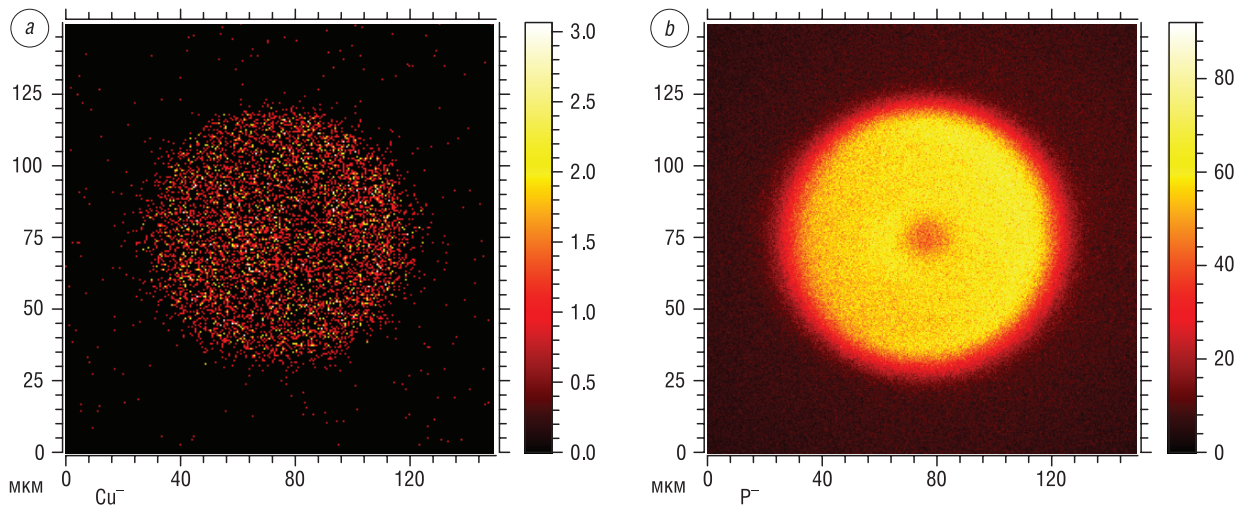


Рис. 2. Распределения примесных атомов: *a* – Cu⁻, *b* – P⁻

Fig. 2. Distribution of impurity atoms of: *a* – Cu⁻, *b* – P⁻

Т а б л и ц а 1. Наличие положительных и отрицательных ионов на поверхности шлифа диода-генератора шума ND103

T a b l e 1. Presence of positive and negative ions on the surface of the microsection of the diode-noise generator ND103L

Измеренные значения		
Положительные ионы		Отрицательные ионы
18627254	Si ⁺	29662070 O ⁻
4421623	K ⁺	17329162 OH ⁻
4214105	C ₃ H ₇ ⁺	2179843 F ⁻
2230391	Na ⁺	1791666 C ⁻
1119333	Ca ⁺	818130 Si ⁻
569385	H ⁺	557149 Cl ⁻
373001	Mg ⁺	299754 O ₂ ⁻
105523	Al ⁺	173096 S ⁻
35456	Fe ⁺	3877 P ⁻
26160	C ⁺	
22065	Ti ⁺	
6815	FeH ₂ ⁺	
3013	Cr ⁺	
2536	B ⁺	

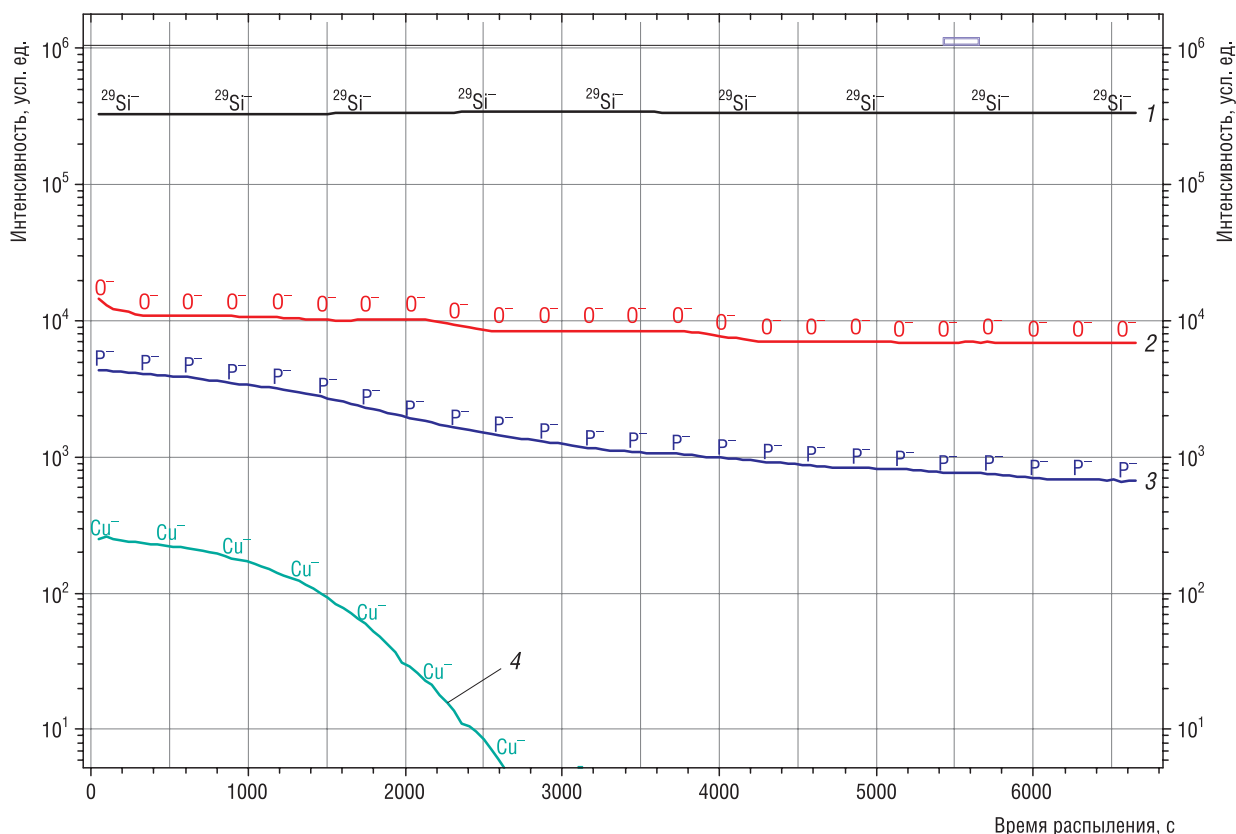


Рис. 3. Профили травления некоторых легирующих примесей и вторичных ионов: 1 – Si⁻, 2 – O⁻, 3 – P⁻, 4 – Cu⁻

Fig. 3. Etching profiles of some dopants and secondary ions: 1 – Si⁻, 2 – O⁻, 3 – P⁻, 4 – Cu⁻

Т а б л и ц а 2. Особенности пластин и их влияние на дефектность и выход годных диодов генераторов шума

T a b l e 2. Particularities of the wafers and their influence on defects and reproducibility of noise generators diodes

Ориентация зон оплавления	Ширина зон оплавления <i>d</i> , мкм	Шаг зон оплавления <i>a</i> , мкм	Вид включений в зоны оплавления	Плотность дислокаций, см ⁻²	Выход годных приборов, %	Примечание
[001]	8	40	Si ₃ N ₄	3 · 10 ⁴	45,0	Малая ширина зоны оплавления, блокирование дислокаций по плоскостям {111}
[110]	10	50	Si ₃ N ₄	8 · 10 ⁵	74,0	
[110]	50	100	Si ₃ N ₄	5 · 10 ⁵	79,0	
[110]	100	200	Si ₃ N ₄	6 · 10 ⁵	70,0	
[111]	120	200	Si ₃ N ₄	2 · 10 ⁴	54,9	Большая ширина зоны оплавления, неоднородность плотности дислокаций
[110]	50	60	Si ₃ N ₄	7 · 10 ⁴	55,1	Запредельный шаг зон оплавления, коробление пластин
[110]	50	75	Si ₃ N ₄	8 · 10 ⁵	72,0	
[110]	50	250	Si ₃ N ₄	6 · 10 ⁵	78,0	
[110]	50	400	Si ₃ N ₄	2 · 10 ⁴	55,0	Запредельный шаг зон оплавления, наличие областей пониженной плотности дислокаций
[110]	50	250	SiO ₂	8 · 10 ⁴	68,2	Наличие областей пониженной плотности дислокаций
[110]	50	100	Si ₃ N ₄	5 · 10 ⁵	80,0	
[110] и [110]	50	100	Si ₃ N ₄	2 · 10 ⁶	79,0	
[100]	50	100	Si ₃ N ₄	3 · 10 ²	44,5	Образование дислокационных петель на обратной стороне без их прорастания на рабочую сторону
[010]	50	100	Si ₃ N ₄	8 · 10 ¹	44,0	
[100] и [010]	50	100	Si ₃ N ₄	2 · 10 ¹	41,1	

Примечание: темным цветом выделены пластины с технологическими режимами, приводящими к низким процентам выхода годных изделий.

Заключение. Предложения по стабилизации дефектности, в том числе дислокационной структуры пластин кремния [11] и проведенные инструментальные и технологические исследования показали принципиальную возможность направленного управления дефектностью высоколегированных кремниевых структур ДГШ в технологическом процессе их изготовления. Сравнивая возможности создания ДГШ на пластинах с ориентацией (111) и (001), можно отметить более широкие технологические возможности последних. Однако такие пластины отличаются более высокой стоимостью и более низкой механической прочностью, что повышает требования к технологическому оборудованию и оснастке.

Список использованных источников

1. Баранов, В.В. Приборы твердотельной электроники, тестирование, измерения. Биомедицинские диагностические технологии / В.В. Баранов // Докл. БГУИР. – 2014. – №2 (80). – С. 23–31.
2. A comprehensive study of the impact of dislocation loops on leakage currents in Si shallow junction devices / C. Nyamhere [et al.] // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 118. – P. 184501. <http://doi.org/10.1063/1.4935293>
3. Особенности дефектообразования в процессе термообработки бездислокационных монокристаллических пластин кремния большого диаметра с заданным распределением в объеме кислородсодержащих геттерирующих центров / Ю.Б. Васильев [и др.] // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2012. – №2. – С. 43–50. <http://doi.org/10.17073/1609-3577-2012-2-43-50>
4. Emelyanov, V.A. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods / V.A. Emelyanov, V.V. Baranov, A.V. Emelyanov // Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008. – London, 2008. – P. 779–783. <https://doi.org/10.1109/estc.2008.4684450>
5. Емельянов, В.А. Технология микромонтажа интегральных схем / В.А. Емельянов; под ред. В.В. Баранова. – Минск: Беларус. навука, 2002. – 335 с.
6. Достанко, А.П. Распределение остаточных механических напряжений в тонких пленках / А.П. Достанко, В.В. Баранов, Я.А. Соловьев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46, №4. – С. 119–122.
7. Баранов, В.В. Изделия силовой электроники, датчики, биомедицинские технологии / В.В. Баранов // Докл. БГУИР. – 2019. – №3 (121). – С. 70–75.
8. Достанко, А.П. Пленочные токопроводящие системы СБИС / А.П. Достанко, В.В. Баранов, В.В. Шаталов. – Минск: Высш. шк., 1989. – 238 с.
9. Кислый, П.С. Кремния нитрид / П.С. Кислый // Химическая энциклопедия. – М.: Совет. энцикл., 1990. – Т. 2. – С. 519.
10. Мильвидский, М.Г. Кремний. / М.Г. Мильвидский // Химическая энциклопедия. – М.: Совет. энцикл., 1990. – Т. 2. – С. 508–509.
11. Электрофизические параметры диодов генераторов широкополосного шума / В.В. Буслюк [и др.] // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, №4. – С. 314–320. <http://doi.org/10.31857/S0544126920040031>

References

1. Baranov V. V. Solid state devices, testing, measuring. Biomedical diagnostic technologies. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 2 (80), pp. 23–31 (in Russian).
2. Nyamhere C., Scheinmann A., Schenk A., Scheit A., Olivie F., Cristiano F. A comprehensive study of the impact of dislocation loops on leakage currents in Si shallow junction devices. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 118, pp. 184501. <http://doi.org/10.1063/1.4935293>
3. Vasil'ev Yu. B., Verezub N. A., Mezhenyi M. V., Prosolovich V. S., Prostomolotov A. I., Reznik V. Ya. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-crystal large-diameter silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian Microelectronics*, 2013, vol. 42, no. 8, pp. 467–476. <http://doi.org/10.1134/S1063739713080155>
4. Emel'yanov V. A., Baranov V. V., Emel'yanov F. V. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods. *Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008*. London, 2008, pp. 779–783. <https://doi.org/10.1109/estc.2008.4684450>
5. Emel'yanov V. A. Baranov V. V. (ed.). *Technology of Micromontage of Integrated Circuits*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2002. 335 p. (in Russian).
6. Dostanko A. P., Baranov V. V., Solov'ev Ya. A. Residual stress distribution in thin films. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2002, vol. 46, no. 4, pp. 119–122 (in Russian).
7. Baranov V. V. Power Electronics Products, Sensors, Biomedical Technologies. *Doklady BGUIR*, 2019, no. 3 (121), pp. 70–75 (in Russian).
8. Dostanko A. P., Baranov V. V., Shatalov V. V. *VLSI Film Conductive Systems*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1989. 238 p. (in Russian).
9. Kisly P. S. Silicon Nitride. *Chemical Encyclopaedia. Vol. 2*. Moscow, Soviet encyclopaedia Publ., 1990, pp. 519 (in Russian).

10. Milvidski M. G. Silicon. *Chemical Encyclopaedia*. Vol. 2. Moscow, Soviet encyclopaedia Publ., 1990, pp. 508–509 (in Russian).

11. Buslyuk V. V., Odzhaev V. B., Panfilenko A. K., Petlitskii A. N., Prosolovich V. S., Filipenya V. A., Yankovskii Yu. N. Physical Parameters of the Broadband Noise-Generator Diodes. *Russian Microelectronics*, 2020, vol. 49, no. 4, pp. 295–301 (in Russian). <http://doi.org/10.1134/S1063739720040034>

Информация об авторах

Емельянов Виктор Викторович – магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: emeljnov@bk.ru

Емельянов Виктор Андреевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: emeljnov@bk.ru

Баранов Валентин Владимирович – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vvb@bsuir.by

Булюк Виктор Вячеславович – магистр технических наук, доцент, заведующий лабораторией кафедры «ЭВМ и системы», Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, Брест, Республика Беларусь). E-mail: b_viktor@tut.by

Information about the authors

Viktor V. Emelyanov – Magister of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: emeljnov@bk.ru

Viktor A. Emelyanov – Correspondent Member of the National Academy of Science of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Professor (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: emeljnov@bk.ru

Valentin V. Baranov – Dr. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vvb@bsuir.by

Viktar V. Busliuk – Master of Engineering, Associate Professor, Laboratory Head of the Department of Computers and Systems, Brest State Technical University (267, Moskovskaja Str., 224017, Brest, Republic of Belarus). E-mail: b_viktor@tut.by