

Создание центров рекомбинации носителей зарядов в сапфировой подложке КНС-структур

© П.А. Александров[¶], Н.Е. Белова, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

(Получена 29 декабря 2014 г. Принята к печати 19 января 2015 г.)

Предложен способ получения высококачественных радиационно стойких КНС-структур при создании слоя наноразмерных пор в сапфире с помощью ионной имплантации гелия, то есть путем создания центров рекомбинации носителей заряда, при этом одновременно улучшается и качество кремниевого слоя. Обсуждается вопрос о термостабильности пор с тем, чтобы на получившемся модифицированном образце КНС можно было создать микросхему. Слой пор, имея большую совокупную поверхность, существенно уменьшает время жизни носителей заряда, генерируемых во время облучения работающей микросхемы, что приводит к уменьшению заряда на границе раздела кремний–сапфир и к повышению радиационной стойкости.

1. Введение

Развитие космической техники и укрепление обороноспособности страны ставят перед современной микроэлектроникой серьезные задачи, связанные с постоянным уменьшением размеров приборов, увеличением быстродействия выпускаемых микросхем, их стойкостью к воздействию ионизирующих излучений и т.д. В настоящее время решение этих задач возможно только с использованием структур кремний-на-изоляторе (КНИ). Единственной технологией получения структур КНИ, получившей развитие в промышленном масштабе в России, по-прежнему остается кремний на сапфире (КНС). В настоящее время эти структуры позиционируются как радиационно стойкие. Однако, как показали наши исследования, в основном это достигается не очень хорошим качеством кремниевого слоя и особенно границы раздела кремний–сапфир. Дальнейшее развитие КНС-структур (уменьшение толщины поверхностного кремния, уменьшение размеров электронных микросхем, уменьшение паразитных емкостей, увеличение подвижности и, как следствие, увеличение быстродействия) требует значительного уменьшения дефектности эпитаксиального кремниевого слоя и границы раздела кремний–сапфир при сохранении присущей КНС радиационной стойкости. Использование метода твердофазной рекристаллизации позволяет кардинально улучшить кристаллические и электрофизические свойства кремниевого слоя [1–4]. Авторами предложена модификация метода, где рассматривается рекристаллизация с границы раздела кремний–сапфир [5–8], которая недавно подверглась необоснованной критике [9]. Если бы оппоненты потрудились ознакомиться с нашими работами, то убедились бы, что все их доводы разбиты несколько лет назад. В работах [5–8] была доказана рекристаллизация с границы раздела кремний–сапфир, подчеркнута важность выбора параметров имплантации (энергии имплантации, дозы облучения, плотности тока, температуры облучения и т.д.) и толщины эпитаксиального слоя для полу-

чения малодефектной КНС-структуры [6], исследована дефектность рекристаллизованной кремниевой пленки по всей толщине [8]. Кроме того, приборы, созданные на наших структурах, показывают существенное улучшение таких параметров, как подвижность, ток потребления, ток утечки и увеличение процента выхода годных микросхем [10,11].

К сожалению, улучшение качества поверхностного кремния приводит, как уже упоминалось выше, к уменьшению радиационной стойкости. Одним из возможных способов в разрешении этого противоречия является проведение процесса аморфизации и рекристаллизации только в верхней части эпитаксиального слоя, не затрагивая области, прилегающей к границе раздела кремний–сапфир. В этом случае удастся достичь значительного улучшения структурного качества рабочей области и соответственно электрофизических параметров созданных в этой области приборов, сохраняя при этом допустимую стойкость к радиационному воздействию [8,9].

Более радикальным возможным решением получения высококачественных радиационно стойких КНС-структур является защита рабочего кремниевого слоя от зарядов, возникающих в диэлектрике, путем увеличения скорости рекомбинации носителей зарядов непосредственно в сапфире.

2. Постановка задачи

Увеличение скорости рекомбинации носителей заряда в сапфире возможно при создании большого количества дефектов, что легко достигается при использовании ионной имплантации. Однако удовлетворение возникающим требованиям резко уменьшает количество возможных вариантов. Дефекты в сапфире должны быть термостабильными, чтобы выдержать термические операции, необходимые для производства микросхем, они не должны приводить к ухудшению качества рабочего кремниевого слоя и быть достаточно эффективными для захвата носителей заряда. Кроме того, очевидным

[¶] E-mail: Aleksandrov_PA@nrcki.ru

требованием является не высокая (доступная современной серийной технологии) доза имплантации. Наиболее очевидными центрами рекомбинации носителей заряда, удовлетворяющими вышеприведенным требованиям, являются преципитаты полупроводников в матрице сапфира, а также нанопоры. В этом случае преципитат в сапфире можно рассматривать как материал, зона проводимости которого находится глубоко в запрещенной зоне сапфира. Это, по определению, эффективная ловушка носителей заряда и центр рекомбинации. Взаимодействие носителей заряда с нанопорами в материале в первом приближении можно рассматривать как выход их на поверхность с большим количеством разорванных связей и существенно большей скоростью рекомбинации, чем в объеме материала. Создание непрерывного слоя преципитатов или пор вблизи границы раздела могло бы значительно обезопасить рабочий кремниевый слой от воздействия зарядов, возникающих в сапфире под воздействием радиации. В настоящее время создание нанокристаллов в сапфировой матрице при имплантации ионов кремния привлекает внимание исследователей с точки зрения развития новых технологий, таких как новые методы хранения информации и оптоэлектронные приборы [12–14]. Но, как отмечено выше, возможно и другое применение. Недавно установлено, что образующийся при имплантации ионов кремния в сапфир слой содержит аморфный кремний. Последующий высокотемпературный отжиг приводит к возникновению нанокристаллических преципитатов. Размер и количество нанокристаллов увеличиваются при увеличении температуры отжига и дозы имплантации. Таким образом, создание преципитатов кремния в сапфировой матрице не представляет технологических трудностей и может быть использовано для увеличения радиационной стойкости КНС-структур, хотя могут возникнуть некоторые проблемы. Имплантация ионов кремния требует использования специализированных имплантеров довольно большой энергии. Для создания преципитатов в сапфире на глубине около 1000 Å необходима энергия имплантации 100 кэВ [12], что практически полностью исключает возможность имплантации через кремниевый слой (~3000 Å), так как в этом случае необходимо будет увеличить энергию имплантации до 300 кэВ и решить сложные проблемы с радиационными дефектами в эпитаксиальном кремниевом слое. Таким образом, в первом приближении имплантацию ионов кремния предпочтительнее проводить в сапфир перед операцией эпитаксиального осаждения.

В этом случае создание нанопор в сапфире имплантацией ионов легких элементов выглядит предпочтительней по многим причинам. Значительное уменьшение количества дефектов, а также и отсутствие сложных дефектных комплексов не требуют высоких температур имплантации и отжига, что позволяет проводить имплантацию в готовую КНС-структуру и очень сильно упрощает всю технологическую цепочку. Этому же способствуют относительно небольшие дозы облучения

и большие проекционные пробеги ионов, что уменьшает требования к ускорителю как по мощности, так и по энергии имплантации.

Имплантация водорода и гелия в материалы с целью создания пор широко используется в микроэлектронике. Одним из важнейших требований, предъявляемых к порам в сапфире, является их термическая стабильность. Однако для водорода в сапфире наблюдается сложная картина. При температуре отжига около 1000°C водород покидает сапфир и при такой высокой температуре плотность пор резко падает [15]. Эффективность возникающих при этом дефектов как центров рекомбинации требует дальнейших исследований. Поскольку высокотемпературные обработки в технологии производства микросхем находятся вблизи указанной температуры, в этом случае нельзя говорить о термической стабильности пор водорода в сапфире.

Основываясь на поведении водорода и гелия в кремнии, германии, двуокиси кремния и других материалах, следует предположить малую растворимость и значительно меньший коэффициент диффузии гелия в сапфире, а значит, и большую стабильность гелиевых нанопор. К проведению данной работы и выбору гелия в качестве имплантируемой примеси авторов подталкивает также отсутствие в открытой печати материалов о влиянии гелия в сапфире на электрофизические свойства приборов после облучения.

3. Экспериментальные результаты

Пластины КНС диаметром 100 мм облучались на установке ИЛУ-100 [4]. Исследование возникающих в сапфире дефектов производилось оптическим микроскопом в комбинации с методикой косоугольного шлифа и электронным микроскопом.

Совершенство структуры кремниевого слоя и сапфировой подложки определялось по двухкристальным кривым качания, полученным на модернизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М с монохроматором Si (111) на длине волны меди. Для оценки дефектного слоя в сапфировой матрице использовался также эллипсомер ЛЭФ-3М с длиной волны 6328 Å. Для упрощения модельных представлений и вычислений в случае эллипсометрических измерений поверхностный слой стравливался. Имплантация ионов гелия энергией 75 кэВ проводилась в стандартные КНС-структуры с толщиной эпитаксиального слоя 3000 Å при температуре не выше 200°C. Максимальная концентрация в этом случае достигается в сапфире на глубине около 1600 Å от границы раздела кремний–сапфир. Образцы облучались дозами $(2.5–7.5) \cdot 10^{16} \text{ He}^+/\text{см}^2$. После имплантации в поверхностном кремнии визуально наблюдались следы радиационных дефектов, однако поверхность оставалась гладкой. Последующие изменения происходили после отжига при температуре 1000°C. На рис. 1 показан

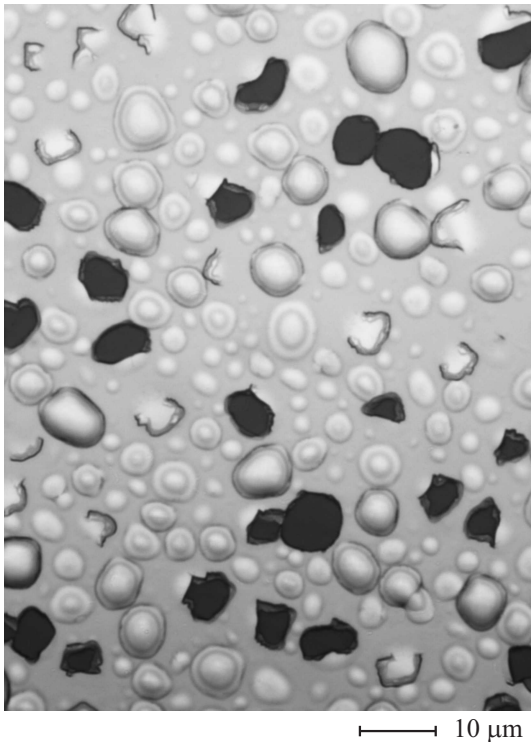


Рис. 1. Поверхность образца, имплантированного дозой $7 \cdot 10^{16} \text{He}^+/\text{см}^2$, отжиг при 1000°C — 1 ч. Энергия имплантации 75 кэВ.

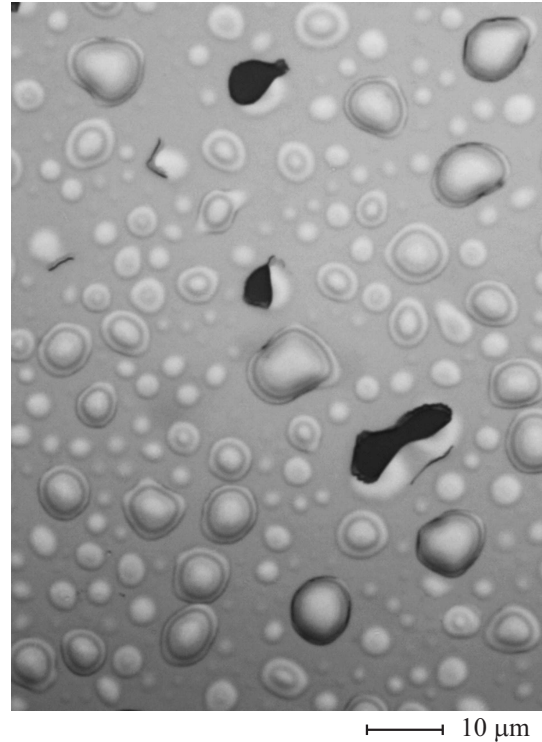


Рис. 2. Поверхность образца, имплантированного дозой $4.5 \cdot 10^{16} \text{He}^+/\text{см}^2$, отжиг при 1000°C — 1 ч. Энергия имплантации 75 кэВ.

образец, облученный дозой $7.5 \cdot 10^{16} \text{He}^+/\text{см}^2$. Наблюдаемая картина блистеринга очень похожа на ту, что получают при облучении металлов [14], и кардинально отличается от поведения гелия в кремнии, где он покидает материал при температурах свыше 800°C [15]. По всей видимости, малый коэффициент диффузии гелия и небольшая растворимость в сапфире приводят к возникновению блистеринга. Уменьшение дозы имплантации до $4.5 \cdot 10^{16} \text{He}^+/\text{см}^2$ (рис. 2) принципиально не меняет картину. Хотя максимальные диаметры пузырей в обоих случаях достигают 6–8 мкм, средний размер блистеров уменьшается при уменьшении дозы. Также уменьшается количество оторванных „крышек“. Распределение блистеров по глубине показано на рис. 3, где нами была применена методика косого шлифа. Шлиф изготавливался полирующим шаром диаметром 140 мм. Светлая область в центре рисунка — это сапфир. Максимальная глубина шлифа достигается в центре этой области. Область в радиальном направлении от центра представляет собой поперечный косой шлиф образца с переменным углом наклона. „Поликристаллическая“ картина, наблюдаемая на периферии сапфировой области, представляет собой область зарождения гелиевых пор. По всей видимости, максимальная глубина залегания блистеров, в нашем случае, должна быть близка к проекционному пробегу [16]. При дальнейшем уменьшении дозы имплантации до $3.5 \cdot 10^{16} \text{He}^+/\text{см}^2$ происходят

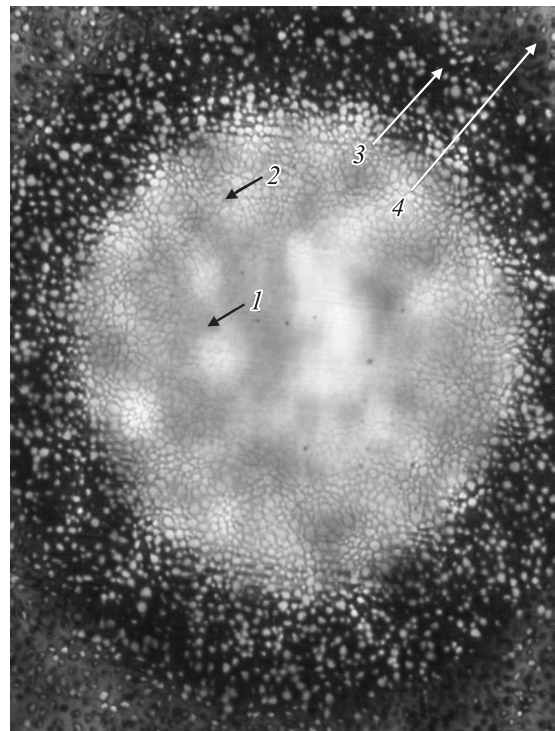


Рис. 3. Косой шлиф образца, имплантированного дозой $7 \cdot 10^{16} \text{He}^+/\text{см}^2$, отжиг при 1000°C — 1 ч. Энергия имплантации 75 кэВ. 1 — сапфировая подложка, 2 — поры в сапфире, 3 — кремниевый слой с порами, 4 — поверхность.

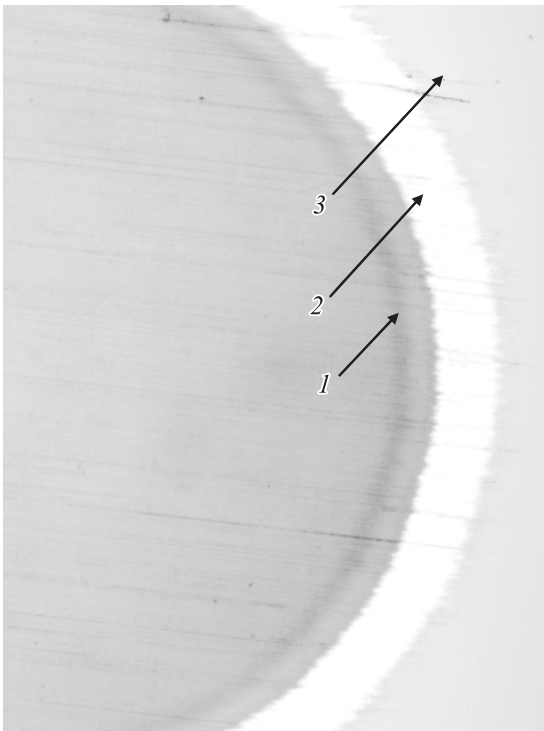


Рис. 4. Косой шлиф образца, имплантированного дозой $3.5 \cdot 10^{16} \text{ He}^+/\text{см}^2$, отжиг при 1000°C — 1 ч. Энергия имплантации 75 кэВ. 1 — дефектный слой в сапфире, содержащий нанопоры, 2 — кремниевый слой, 3 — поверхность.

кардинальные изменения. Поверхность эпитаксиального слоя остается гладкой после отжига. На косом шлифе в сапфировой подложке вблизи кремниевого слоя наблюдается область оптической неоднородности (рис. 4). Светлое кольцо на рис. 4 — кремниевый слой, темная область внутри которого — сапфир. Поскольку диаметр шлифа в этом случае довольно большой, применение линейной экстраполяции (учитывая, что толщина кремниевого слоя составляет 3000 \AA) дает расположение более темной области в сапфире на расстоянии приблизительно 1660 \AA от границы раздела кремний–сапфир.

Эллипсометрические измерения хотя и не дают однозначного решения, но позволяют говорить о слое с меньшим коэффициентом преломления ($n = 1.56\text{--}1.68$), чем сапфир на глубине $1600\text{--}1650 \text{ \AA}$. Основываясь на поведении гелия в других материалах, теории блистеринга, проекционном пробеге ионов гелия и результатах, приведенных выше, следует связать наблюдаемую область оптической неоднородности с возникающими при имплантации нанопорами, наполненными гелием [17]. При дозах имплантации, меньших $3.5 \cdot 10^{16} \text{ He}^+/\text{см}^2$, давление в близлежащих нанопорах недостаточно для превышения предела прочности материала, возникновения микротрещин и начала процесса блистеринга.

Рентгеновские измерения также свидетельствуют, что при таких дозах с последующим часовым отжигом при 1000°C в сапфире создается нарушенный слой

и при этом одновременно улучшается качество кремниевого слоя. Полуширина двухкристалльных кривых качания кремниевого слоя значительно уменьшилась после проведенных операций: ее величина составляла ~ 850 угл.сек, в то время как исходная полуширина кривых качания была ~ 1600 угл.сек.

В то же время кривые качания, полученные для отражения (1–102) сапфировой подложки, после имплантации ионами гелия ($3.5 \cdot 10^{16} \text{ He}^+/\text{см}^2$) и часового отжига, указывают на сильные изменения, происшедшие в так называемой „хвостовой области“ кривой (см. рис. 5), что, возможно, является косвенным подтверждением возникновения нанопор в сапфире. Сравнение кривых качания, полученных для образцов с последующим отжигом в течение 1–2 ч, показывает, что дополнительный отжиг приводит к уменьшению эффекта, но слой сапфира с измененным параметром решетки остается.

Создание нанопор в подложке эффективно используется для получения бездислокационного ненапряженного кремний-германиевого слоя на кремниевой подложке. Эта структура является исходной для получения высококачественных напряженных кремниевых пленок, используемых для получения быстродействующих микросхем [18,19]. Возникающие нанопоры являются центрами генерации дислокационных петель, рост которых и взаимодействие с границей раздела эпитаксиального слоя и подложки приводят к избыточному количеству в эпитаксиальном слое пронизывающих дислокаций, что резко увеличивает вероятность рекомбинации дислокаций при температуре отжига [18]. Таким образом, получают практически бездислокационные пленки Si, Ge на кремнии. Описанная процедура справедлива и для нашего случая. Уменьшение ширины кривой качания при рентгеновском рассеянии на кремниевом слое

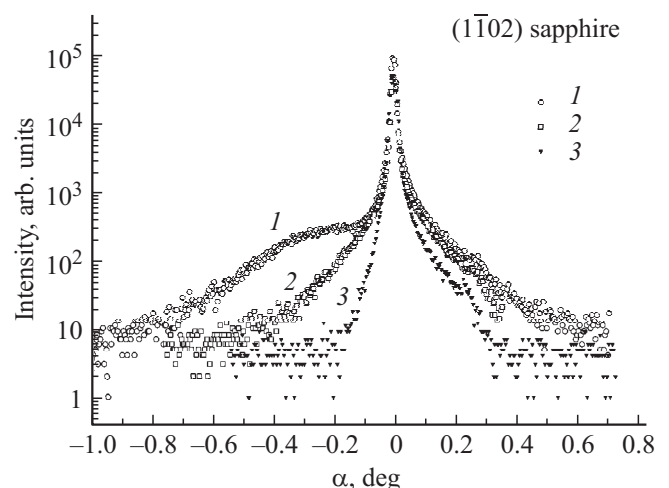


Рис. 5. Кривые качания для отражения сапфира (1–102); α^0 — отклонение от точного значения угла Брегга; 1 — кривая для образца КНС после имплантации дозой $3.5 \cdot 10^{16} \text{ He}^+/\text{см}^2$ и 1-часового отжига, 2 — для образца КНС после имплантации дозой $3.5 \cdot 10^{16} \text{ He}^+/\text{см}^2$ и 2-часового отжига, 3 — для образца КНС до имплантации.

мы считаем положительным фактом, так как, согласно имеющимся представлениям, пропорционально увеличивается подвижность носителей заряда, что ведет к увеличению быстродействия.

4. Заключение

Показана возможность создания в сапфировой подложке термостабильных гелиевых нанопор как возможных центров рекомбинации носителей зарядов непосредственно в сапфире.

Список литературы

- [1] S.S. Lau, J.W. Mayer, T.W. Sigmon. USA Patent, N 4177084 (1979).
- [2] I. Golecki. USA Patent, N 4588447 (1986).
- [3] M.L. Burgener, R.E. Reedy. USA Patent, N 5416043 (1995).
- [4] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. Нано- и микросистемная техника, **3**, 54 (2008).
- [5] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. ФТП, **43** (5), 627 (2009).
- [6] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. ФТП, **44** (10), 1433 (2010).
- [7] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. Патент РФ, № 2427941 (2011).
- [8] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. ФТП, **47** (2), 264 (2013).
- [9] А.А. Шелухин, Ю.В. Балакшин, В.С. Черныш, С.А. Голубков, Н.Н. Егоров, А.И. Сидоров. ФТП, **48** (4), 535 (2014).
- [10] В.М. Воротынцев, Е.Л. Шолобов, В.А. Герасимов. ФТП, **45** (12), 1662 (2011).
- [11] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов. Неопубликованные материалы.
- [12] S. Yerchi, U. Serincan, I. Dogan, S. Tokay, M. Genisel, A. Aydinli, R. Turan. J. Appl. Phys., **100** (7), 074 301 (2006).
- [13] S. Yerchi, M. Kulaksi, U. Serincan, M. Barozzi, M. Bersani, R. Turan. J. Appl. Phys., **102** (2), 024 309 (2007).
- [14] C.J. Park, Y.H. Kwon, Y.H. Lee, T.W. Kang, H.Y. Cho, S.Kim, S.H. Choi, R.G. Elliman. Appl. Phys. Lett., **84** (14), 2667 (2004).
- [15] W.T. Spratt, M. Huang, C. Jia, L. Wang, V.K. Kamineni, A.C. Diebold, H. Xia. Appl. Phys. Lett., **99** (11), 111 909 (2011).
- [16] М.И. Гусева, Ю.В. Мартыненко. УФН, **13** (4), 671 (1981).
- [17] C.C. Griffioen, J.H. Evans, P.C. de Jong, A. van Veen. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **27** (3), 417 (1987).
- [18] H. Trinkaus, B. Hollander, St. Rongen, S. Mantl, H.-J. Herzog, J. Kuchebecker, T. Hackbarth. Appl. Phys. Lett., **76** (24), 32 (2000).
- [19] J. Cai, P.M. Mooney, S.H. Christiansen, H. Chen, J.O. Chu, J.A. Ott. J. Appl. Phys., **95** (10), 5347 (2004).

Редактор А.Н. Смирнов

Generation of recombination centers of charge carrier in sapphire substrate for silicon-on-sapphire structures

P.A. Aleksandrov, N.E. Belova, K.D. Demakov, S.G. Shemardov

National Research Centre „Kurchatovskiy Institut“,
123182 Moscow, Russia

Abstract We suggest a method for generation of high-quality radiation-resistant SOS structures during creation nanopores inside sapphire by means of helium ion implantation, that is by the way of creation of charge carrier recombination centers, simultaneously silicon layer quality becomes better.

Pore thermal stability is discussed in order to create microcircuit on the modified specimen of SOS structure. The pore layer has large joint surface and it decreases considerably the lifetime of charge carriers that generated during working microcircuit irradiation. This results to charge reducing on the silicon-sapphire interface and to radiation resistance rising.