

07

Влияние гамма-излучения малых доз на электрофизические свойства мезопористого кремния

© Д.И. Биленко, В.В. Галушка, Э.А. Жаркова, В.И. Сидоров,
Д.В. Терин, Е.И. Хасина

Саратовский государственный университет, им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: lab32@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 июля 2016 г.

Исследовано влияние гамма-излучения малых экспозиционных доз (5–40 kR) на электрические характеристики структур на основе слоя мезопористого кремния (SiMP). Показано, что в структуре Al/SiMP/*p*-Si/Al воздействие гамма-квантов приводит к возрастанию проводимости слоя SiMP, смещению уровня Ферми, изменению концентрации ловушек. Обнаружена долговременная память стабильного переключенного состояния в области гистерезиса I – V -характеристики, управляемая дозой излучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.03.44228.16408

Изучение воздействия гамма-излучения на свойства кристаллических материалов (сплавов и полупроводников) показало, что существует так называемый эффект малых доз ($D = 10^3$ – 10^5 R), при котором в отличие от больших доз происходит упорядочение структуры и соответственно улучшение электрофизических свойств материала. В частности, уменьшение дефектов в кристалле приводит к повышению проводимости [1], увеличению времени жизни неосновных носителей заряда в облученных кремниевых диодных структурах [2]. Исследования влияния гамма-излучения на свойства пористого кремния (PSi) были направлены в основном на изучение радиационной стойкости, выяснение природы фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния и зависимости последней от интенсивности облучения [3]. На основании измерений рамановского рассеяния и люминесценции при радиационном воздействии ионов Ag^+ был сделан вывод о радиационной стойкости пористого кремния по сравнению с монокристаллическим Si, что связано, видимо, с развитой поверхностью PSi и возможностью стока и аннигиляции дефектов.

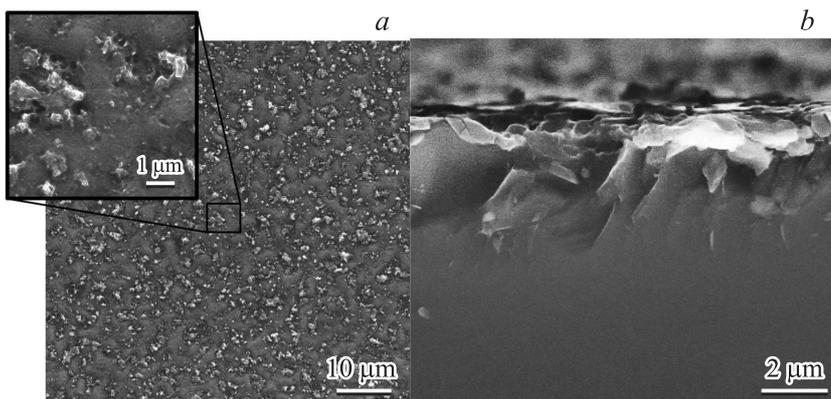


Рис. 1. Морфология поверхности структуры Al/SiMP/*p*-Si/Al после гамма-облучения. Экспозиционная доза $D = 20 \text{ kR}$: *a* — поверхность образца, *b* — скол.

В работе [4] описан эффект влияния гамма-радиации на структуру пористого кремния, который выражается в уменьшении пористости. Однако влияние гамма-излучения малой интенсивности на электрофизические свойства пористого кремния практически не изучалось. Кроме того, все исследования проводились на пористом кремнии, полученном электрохимическим путем, т.е. на нанопористом кремнии, в то время как насыщение PSi различными веществами (Fe, Ag) и лекарствами возможно в случае использования мезопористого кремния (SiMP), полученного химическим травлением с использованием металлов [5,6].

Целью настоящей работы являются исследования влияния гамма-излучения на свойства SiMP для выяснения возможности управления дефектностью в материале с высоким уровнем оборванных связей, каким является пористый кремний, и рассмотрение возможности создания на основе SiMP устройств с зарядовой связью.

Мезопористые слои кремния получены на подложках *p*-типа с удельным сопротивлением $4.5 \Omega \cdot \text{cm}$ в водном растворе AgNO_3 с концентрацией 0.02 mol и плавиковой кислоты концентрацией 5 mol при температуре 20°C в течение часа [5]. Часть поверхности подложек оставалась защищенной от влияния раствора. Для удаления дендритного нароста серебра образцы были протравлены в концентрированной

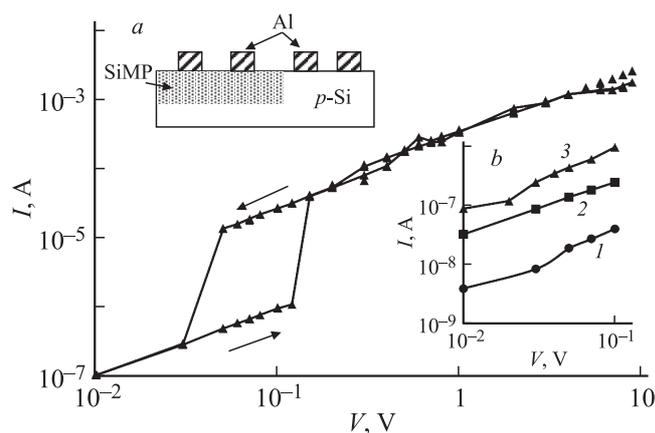


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика структуры после гамма-излучения $D = 20 \text{ kR}$, смещение — плюс на подложке. На вставках: *a* — схема образца, *b* — омический участок ВАХ при D, kR : 1 — 0, 2 — 5, 3 — 20.

азотной кислоте в течение одного часа. Отсутствие серебра было подтверждено данными элементного анализа растровой микроскопии. Контакты в виде полосок Al на слой и подложку наносились при $t \sim 120^\circ\text{C}$ напылением в вакууме порядка 10^{-5} mm Hg , причем контакты на подложке создавались до получения пористого слоя, поэтому проводилось вжигание при 400°C в вакууме в течение 40 min для получения омического контакта. Для облучения полученных структур применялся пучок гамма-квантов тормозного излучения бетатрона Саратовского государственного университета при максимальной энергии $E_{\gamma \text{ max}} = 25 \text{ MeV}$. Экспозиционная доза D менялась от 5 до 40 kR. Морфология и толщины слоев определялись на аналитическом комплексе на базе MIRA 2 LMU. Пример морфологии слоя SiMP после гамма-облучения приведен на рис. 1. При используемом технологическом режиме исходные слои до облучения имели столбчатую структуру, аналогичную приведенной в [6] для образца, полученного по такой же технологии. Пористость мезопористых слоев до облучения, определенная гравиметрическим методом, составляла 0.5–0.7 при диаметре „столбов“ 100–200 nm. При облучении проявляются более крупные образования кремния размером до 600 nm, что приводит к уменьшению

пористости (рис. 1, *b*). Это согласуется с данными работы по изучению влияния гамма-излучения на структуру пористого кремния, полученного электрохимическим путем [4].

Измерение вольт-амперных характеристик проводилось от источника постоянного тока при ступенчатом изменении напряжения с шагом 0.01 V. Схема образца приведена на вставке *a* рис. 2. ВАХ измерялись в режиме нарастания и последующего снижения напряжения. До облучения исследуемые структуры Al/SiMP/*p*-Si/Al имели ВАХ двух видов: барьерного типа и ВАХ с токами, ограниченными пространственным зарядом (ТОПЗ) [7].

Проведенные исследования влияния гамма-излучения на электрофизические свойства мезопористого кремния показали следующее. Вид ВАХ структуры Al/SiMP/*p*-Si/Al типа ТОПЗ сохраняется при облучении малыми дозами. В случае структуры барьерного типа при гамма-облучении происходит изменение вида ВАХ по мере увеличения экспозиционной дозы. Уменьшается барьер в контакте Al-SiMP. Величина барьера ϕ_{bn} определяется, согласно [8], по формуле

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A^{**}T^2}{I_s} \right),$$

где A^{**} при комнатной температуре 300 K равна $120 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, I_s — плотность тока насыщения. При облучении I_s возрастает, что, видимо, связано с уменьшением ловушек в обедненном слое на границе Al-SiMP. Соответственно уменьшается барьер ϕ_{bn} . Так, при облучении с $D \sim 5 \text{ kR}$ величина ϕ_{bn} снижается от 0.67 в исходном состоянии до 0.6 V в облученном. По мере роста облучения свыше 10 kR ВАХ имеет вид токов, ограниченных пространственным зарядом (рис. 2).

Слои SiMP после облучения становятся более низкоомными. Проводимость слоя, оцененная по омическому участку ВАХ, возрастает от $5 \cdot 10^{-7} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ в исходном до $\sim 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ после облучения с $D \sim 20 \text{ kR}$ (вставка *b* рис. 2).

В зависимости ВАХ, измеренной в режиме нарастания и последующего снижения напряжения, в области ловушечного переноса носителей заряда возникает гистерезис, который обладает высокой стабильностью. При дозе облучения $\sim 20 \text{ kR}$ гистерезис наблюдается в диапазоне напряжений 0.05–0.2 V и характеризуется ростом тока в 20–30 раз.

Стабильность значений тока в гистерезисе получена при достижении $I \sim 1 \text{ mA}$ с ростом напряжения, при котором происходит практически

полное заполнение ловушек захваченными неравновесными носителями заряда, в основном электронами, так как сечение захвата электронов намного больше сечения захвата дырок. Стабильное значение тока в гистерезисе сохраняется с высокой степенью точности до долей микроампер при последовательном многократном включении и выключении напряжения в течение ~ 60 суток. Затем ток постепенно уменьшается, окончательная стабилизация гистерезиса происходит через 70–90 суток, что вероятно связано с постепенным распределением накопленной энергии в кристалле при облучении [1].

Исходные значения тока достигаются при уменьшении напряжения до $V \sim 10\text{--}20\text{ мВ}$, что соответствует переходу от ловушечного переноса носителей заряда к омическому участку ВАХ (рис. 2). В случае структур, имеющих ВАХ с ТОПЗ и гистерезис в ВАХ до облучения, после облучения наблюдается его сужение как по шкале напряжения, так и по величине тока, что свидетельствует об уменьшении концентрации ловушек.

Концентрация ловушек рассчитывалась в области ТОПЗ двумя методами: *step by step* при экспоненциальном распределении ловушек по запрещенной зоне и по критическому значению напряжения V_n — перехода от ловушечного переноса носителей заряда к квадратичной зависимости $I \sim V^2$:

$$N_t = \frac{\varepsilon' \varepsilon_0 V_n}{qd^3},$$

где d — толщина слоя, ε' — диэлектрическая проницаемость SiMP. Величина N_t ловушек при облучении $D \sim 20\text{ кР}$ падает по сравнению с исходной от $2 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, при этом участок с ТОПЗ в облученных образцах смещен по шкале напряжений в область меньших V . Резкий рост тока указывает на уменьшение концентрации ловушек. Заполнение ловушек облученного слоя SiMP неравновесными носителями приводит к сдвигу положения уровня Ферми. ΔE_F рассчитывался как

$$\Delta E_F = kT \ln(I_2 V_1 / I_1 V_2),$$

где I_1, I_2 и V_1, V_2 — значения тока и напряжения в области ТОПЗ. Сдвиг уровня Ферми обусловлен ростом концентрации свободных носителей заряда, которая изменяется в $\sim e^3$, при полученном сдвиге $\Delta E_F = 3kT$, что согласуется с изменением тока в 10–20 раз.

Следует отметить, что в слоях с ТОПЗ до облучения изменение тока в гистерезисе не превышало 2–3 раза, что соответствует сдвигу

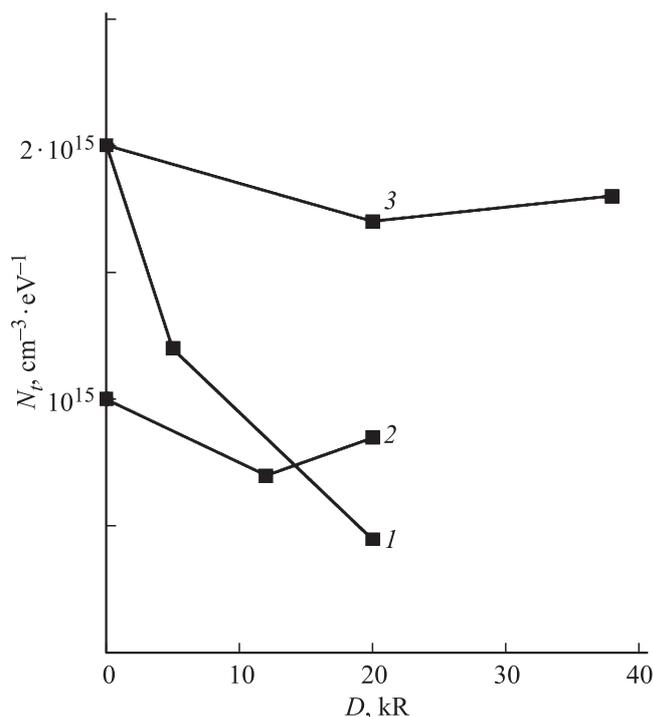


Рис. 3. Концентрация ловушек в облученных структурах Al/SiMP/*p*-Si/Al с ТОПЗ. Толщина слоя SiMP, μm : 1 — 2.5, 2 — 1, 3 — облученная подложка.

$\Delta E_F \sim kT$. Полученное стабильное значение тока в гистерезисе свидетельствует о равновесном состоянии, при котором скорости захвата и возбуждения электронов с ловушек равны. При этом уровень Ферми сдвинут в новое стабильное положение.

Изменение концентрации ловушек в слоях пористого кремния, вызванное воздействием ионизирующего гамма-излучения зависит от свойств слоя, его толщины, вида ВАХ, влияния контактных областей. Так, например, при мощности излучения 5–20 kR концентрация ловушек в пористом кремнии падает от $2 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, а влияние излучения указанной мощности на подложку практически не наблюдается (рис. 3).

Таким образом, показано, что малые дозы гамма-облучения снижают дефектность мезопористого кремния, повышают его стабильность и создают возможность управления зарядовыми состояниями с долговременной памятью переключенного состояния. Необходимы дальнейшие исследования для выяснения механизма временного управления этими процессами.

Авторы благодарны И.Б. Мысенко за помощь в получении образцов. Работа подготовлена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 3468).

Список литературы

- [1] *Мамонтов А.П., Чернов И.П.* Эффект малых доз ионизирующего излучения. Томск: Дельтаплан, 2009. 286 с.
- [2] *Рахматов А.З., Таиметов М.Ю., Сандлер Л.С.* // Вопросы атомной науки и техники. 2011. № 4. С. 26.
- [3] *Астрова Е.В., Витман Р.Ф., Емцев В.В.* и др. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 3. С. 507.
- [4] *Abbas J.K., Najat L.A., AuobSulaiman A.U.* // Int. J. Physics. 2015. V. 3. N 1. P. 1.
- [5] *Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А.* и др. // ФТП. 2014. Т. 48. С. 1405.
- [6] *Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 21. С. 80.
- [7] *Ламперт М., Марк П.* Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
- [8] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир, 1984. 455 с.