

06;07

Механизмы частотно-зависимой проводимости мезопористого кремния при гамма-облучении малыми дозами

© В.В. Галушка¹, Э.А. Жаркова¹, Д.В. Терин^{1,2,¶}, В.И. Сидоров¹, Е.И. Хасина¹¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

¶ E-mail: lab32@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 6 марта 2019 г.

Принято к публикации 7 марта 2019 г.

Исследовано влияние гамма-излучения малых доз на механизмы низкочастотной проводимости мезопористого кремния. Показано, что при гамма-облучении сохраняется прыжковый характер проводимости с изменением частоты фоновых колебаний решетки, уменьшением размера прыжка и сдвигом уровня захвата ловушек к уровню Ферми в запрещенной зоне, что делает структуры с мезопористым кремнием, облученные гамма-излучением, перспективными для создания многофункциональных резистивных и емкостных приборов.

Ключевые слова: мезопористый кремний, гамма-облучение, прыжковая проводимость, фоновая частота, колебания решетки.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.11.47814.17607

Исследования влияния гамма-излучения на свойства пористого кремния были направлены в основном на изучение радиационной стойкости и выяснение природы фотолюминесценции [1]. Эффект влияния гамма-излучения на структуру пористого кремния, выражающийся в уменьшении пористости, рассмотрен в работе [2]. Проведенные ранее исследования [3,4] влияния гамма-облучения малыми дозами на электрические и емкостные характеристики структур на основе мезопористого кремния (SiMP) показали, что при облучении SiMP происходит увеличение проводимости и уменьшение концентрации поверхностных заряженных оборванных связей. Однако сам механизм частотной зависимости проводимости не был выявлен, в то время как знать его необходимо для изучения электронных процессов в материалах при гамма-облучении и возможности создания приборов с управляемой реактивностью на основе структур с SiMP.

Настоящая работа посвящена определению характера частотной зависимости проводимости мезопористого кремния при гамма-облучении малыми дозами. Для этого необходимо знать емкость и добротность исследуемых структур в области низких частот (10^2 – 10^7 Hz), в которой проявляются особенности электродинамических процессов в неупорядоченных средах [5].

Исследовались структуры на основе мезопористых слоев кремния Al–SiMP– p^+ –Si–Al, в которых слои SiMP были получены методом химического травления кремния с использованием металлов в водном растворе $AgNO_3$ на кремниевых подложках p -типа с удельным сопротивлением $4.5 \Omega \cdot cm$. Технология получения структур Al–SiMP– p^+ –Si–Al описана ранее [3]. Образцы были получены в одинаковом технологическом режиме, но в нем возможны незначительные колебания

технологических факторов, которые, вероятно, приводят к более тонкому влиянию на структуру слоев [6]. Для облучения полученных структур применялся пучок гамма-квантов тормозного излучения бетатрона Саратовского государственного университета при максимальной энергии $E_{\gamma \max} = 25 MeV$. Экспозиционная доза D менялась от 5 до 20 kR.

Результаты измерения частотных зависимостей емкости $C(f)$ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta(f)$ приведены на рис. 1, 2. По характеру экспериментальных частотных зависимостей $C(f)$ и $tg \delta(f)$ образцы можно разделить на две группы. Группа I — облученные образцы, для которых наблюдается монотонный спад емкости и $tg \delta$ с частотой (рис. 1, 2, кривые 1, 2). При этом емкость в диапазоне частот выше 10^4 Hz стабилизируется, и ее величина соответствует геометрической емкости слоя SiMP. Образцы группы II характеризуются большим диапазоном изменения емкости в зависимости от частоты: 10–50 раз (рис. 1, кривые 3–5), а также наличием минимума на зависимости $tg \delta(f)$ в области частот 10^3 – 10^4 Hz (рис. 2, кривые 3–5). Минимум $tg \delta(f)$ для этой группы наблюдается как у необлученных (рис. 2, кривая 3), так и у облученных гамма-лучами образцов. Положение минимума $tg \delta(f)$ с облучением сдвигается в область больших частот (рис. 2, кривая 4). Уменьшение $tg \delta(f)$ при 10^4 Hz наблюдается у всех структур этой группы, что свидетельствует о снижении тока потерь. Подобную зависимость $tg \delta(\omega)$ с минимумом при электронном облучении сильнолегированного кремния наблюдали авторы работ [7,8]. Для описания полученных зависимостей авторы подбирали эквивалентные схемы, включающие активные и реактивные составляющие сопротивления, и пришли к выводу о существовании прыжковой проводимости по глубоким энергетическим

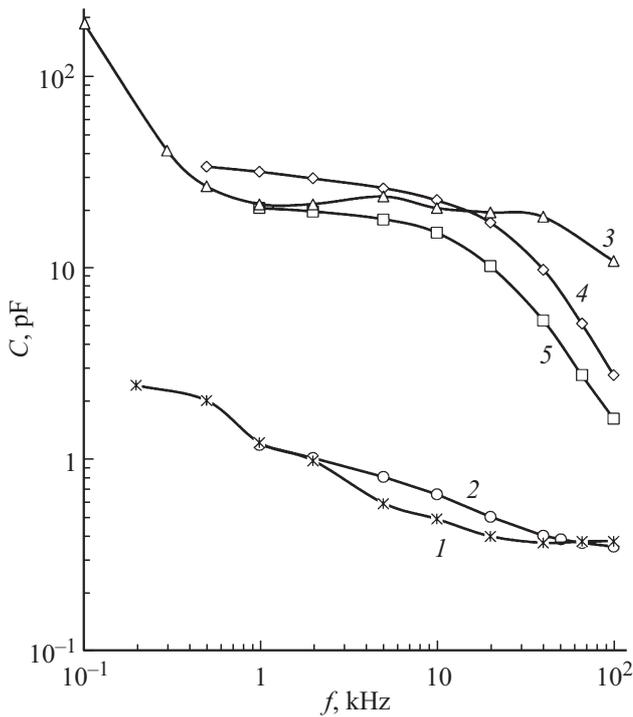


Рис. 1. Частотная зависимость емкости структуры Al-SiMP-p⁺-Si-Al при гамма-облучении. Экспозиционная доза D = 0 (3), 20 kR (1, 2, 4, 5).

уровням. При этом электронное облучение и отжиг приводят к изменению величины и положения tg δ(f).

По экспериментальным значениям емкости и tg δ(f) для всех образцов рассчитывалась низкочастотная проводимость слоя SiMP согласно выражению

$$\sigma(\omega) = \epsilon' \epsilon_0 \omega \operatorname{tg} \delta,$$

где ω = 2πf — круговая частота, ε', ε₀ — диэлектрические проницаемости слоя и вакуума.

Полученные зависимости проводимости от частоты приведены на рис. 3. Как видно, для образцов обеих групп характерен рост проводимости с частотой в области ω > 10³ с⁻¹ по степенному закону σ ~ ω^s при разных значениях s. Так, для образцов группы I s ~ 0.4–0.6 (кривые 1, 2), а для образцов группы II s > 1, при этом величина s больше у облученных образцов (~ 1.4) (кривые 4, 5), чем у необлученного образца (s ~ 1.1–1.2) (кривая 3).

Известно, что частотная проводимость зависит от частоты фононных колебаний решетки ν_{ph}, концентрации заряженных состояний вблизи уровня Ферми N(E_F) и частоты переменного тока [5]:

$$\sigma(\omega) = \frac{1}{3} \pi e^2 k T \omega [N(E_F)]^2 \alpha^{-5} \left[\ln \left(\frac{\nu_{ph}}{\omega} \right) \right], \quad (1)$$

где a — размытие потенциальной ямы (a⁻¹ = 8 Å). Величина s в зависимости ln σ(ω) от ln ω определяется

выражением

$$s = 1 - \frac{4}{\ln \left(\frac{\nu_{ph}}{\omega} \right)} \quad \text{для } \omega \ll \nu_{ph}.$$

Для образцов группы I величина ν_{ph} ~ 10⁸–10¹⁰ с⁻¹ при s ~ 0.4–0.6, что характеризует проводимость как прыжковую дебаевского типа по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Таким образом, величина ν_{ph} в облученных образцах меньше, чем в монокремнии [5] и окисленном пористом кремнии ПКО [9], не подвергнутых облучению, где она составляет 10¹² с⁻¹ при s ~ 0.8. Это указывает на то, что изменение прыжковой проводимости дебаевского типа, а именно с переменной длиной прыжка, происходит за счет прыжков через случайные барьеры и других механизмов, например влияния поляризации оболочек ядер [10].

Используя полученные значения фононной частоты ν_{ph} при облучении, можно определить размер прыжка на переменном токе

$$r_\omega = \frac{1}{2a} \ln \left(\frac{\nu_{ph}}{\omega} \right). \quad (2)$$

Величина прыжка r_ω в случае образцов группы I при значениях ν_{ph} ~ 10⁸–10¹⁰ с⁻¹ на частоте 10⁴ Hz и a⁻¹ = 8 Å (размытие потенциальной ямы) для германия и кремния составляет 40–56 Å в случае облученных образцов, в то время как в случае необлученных образцов, например окисленного пористого кремния, величины r_ω составляют 60–80 Å [5,9].

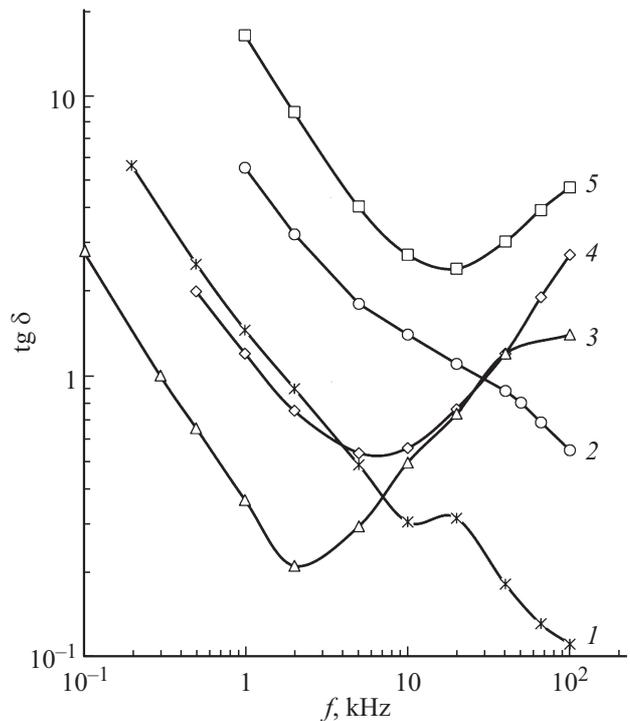


Рис. 2. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь (tg δ) структуры Al-SiMP-p⁺-Si-Al при гамма-облучении. Экспозиционная доза D = 0 (3) и 20 kR (1, 2, 4, 5).

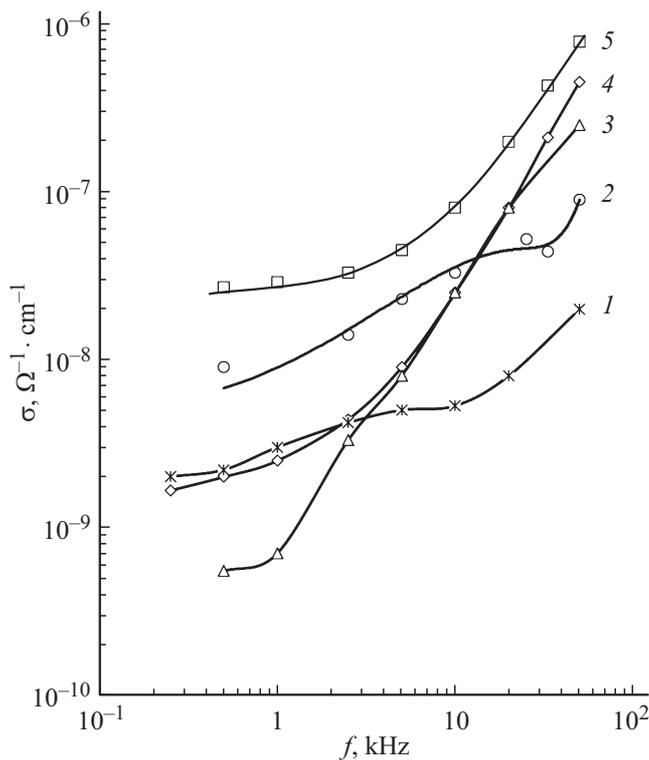


Рис. 3. Низкочастотная проводимость структуры Al-SiMP-p⁺-Si-Al при гамма-облучении. Экспозиционная доза $D = 0$ (3) и 20 kR (1, 2, 4, 5).

Итак, длина прыжка с облучением уменьшается, что очевидно связано с изменением заряженных состояний, пассивацией заряженных центров и захватом и перекрытием оболочек ядер.

Большие значения s , полученные для образцов группы II, очевидно, связаны не только со свойствами слоя SiMP, но и со свойствами барьеров контактов Al-SiMP и гетероперехода SiMP-p⁺-Si и влиянием облучения на эти факторы, что было показано ранее [3].

Наличие минимума $\text{tg } \delta$ позволяет определить время релаксации процесса. Процесс включает в себя преодоление электроном высоты барьера при прыжках между локализованными состояниями:

$$\frac{1}{\tau} = v_{ph} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где $\tau = 1/\omega_{\min}$.

При полученном сдвиге ω_{\min} при облучении от $2 \cdot 10^3$ до $7 \cdot 10^3$ Hz (рис. 2) изменение энергетического уровня составляет от 0.32 до 0.37 eV. Это значение близко к соответствующему энергетическому уровню в результате радиационных нарушений в германии [11].

Таким образом, показано, что для ряда образцов мезопористого кремния облучение приводит к изменению частоты фоновых колебаний решетки и соответственно уменьшению длины прыжка, что связано, возможно, с деформацией решетки и ранее показанным

влиянием гамма-облучения на структуру мезопористого кремния [3], перекрытием оболочек заряженных центров и сдвигом энергетических ловушек захвата к уровню Ферми.

Итак, гамма-облучение влияет на механизм переноса носителей заряда в мезопористом кремнии с сохранением прыжкового характера проводимости. При этом уменьшаются фоновая частота колебаний решетки и концентрация заряженных ловушек, а также размер возможного прыжка, что, очевидно, связано с тем, что прыжки происходят по поверхности заряженного слоя пористого кремния.

Необходимо отметить, что все исследования проведены при малых дозах облучения, но при достаточно высоких энергиях дозы бетатрона. Дальнейшие исследования электрических и емкостных свойств структуры SiMP могут быть направлены на понижение мощности кванта гамма-излучения, что может способствовать применению SiMP в качестве фоточувствительных детекторов гамма-излучения, а также приборов с управляемой реактивностью и памятью переключения.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-07-00752а.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Астрова Е.А., Витман Р.Ф., Емцев В.В., Лебедев А.А., Полоскин Д.С., Ременюк А.Д., Рудь Ю.В. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 3. С. 507–515.
- [2] Abbas J.K., Najam L.A., Auob Sulaiman A.U. // Int. J. Phys. 2015. В. 3. N 1. Р. 1–7.
- [3] Биленко Д.И., Галушка Э.А., Жаркова Э.А., Сидоров В.И., Терин Д.В., Хасина Е.И. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 3. С. 57–63.
- [4] Галушка В.В., Жаркова Э.А., Терин Д.В., Сидоров В.И., Хасина Е.А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 21. С. 72–77.
- [5] Мотт Н., Девис Э. // Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. Т. 1. С. 252.
- [6] Биленко Д.И., Галушка Э.А., Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. // ФТП. 2011. Т. 44. В. 7. С. 984–986.
- [7] Поклонский Н.А., Вырко С.А., Забродский А.Г. // ФТП. 2008. Т. 42. В. 12. С. 1420–1425.
- [8] Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В., Вісек А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 10. С. 74–82.
- [9] Биленко Д.И., Белобровая О.Я., Галушка В.В., Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 10. С. 15–18.
- [10] Зимин С.П. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 11. С. 1385–1387.
- [11] Вавилов С.И., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых структурах. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.