

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 621.319.4;537.311.1;621.315.592;544.23

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-153-161>

Поступила в редакцию 22.01.2024

Received 22.01.2024

Н. А. Поклонский, И. И. Аникеев, С. А. Вырко*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***НИЗКОЧАСТОТНЫЙ КОНДЕНСАТОР С ПРЫЖКОВОЙ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА
(НА ПРИМЕРЕ *a*-Si:H)**

Аннотация. Предложены структурная и электрическая схемы конденсатора на основе слоя *a*-Si:H (аморфно-водородизированного кремния) толщиной 3 мкм, отделенного от металлических обкладок диэлектрическими прослойками из SiO₂ (диоксида кремния) толщиной 0,3 мкм. Рассматриваются комнатные температуры ($T \approx 300$ К), когда в отсутствие подсветки для *a*-Si:H преобладает прыжковый механизм миграции электронов между точечными дефектами структуры. Для такого конденсатора рассчитаны зависимости электрической емкости от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$ в диапазоне от 0,1 до 300 Гц для слоя *a*-Si:H со стационарной прыжковой электропроводностью $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ (Ом · см)⁻¹. Считалось, что при малосигнальном режиме измерения емкости сквозного переноса электронов между слоем *a*-Si:H, слоями диэлектрика и обкладками конденсатора нет. Показано, что действительная часть емкости конденсатора уменьшается с увеличением угловой частоты ω , а мнимая часть отрицательна и немонотонно зависит от ω . Уменьшение действительной части емкости конденсатора до геометрической емкости последовательно соединенных оксидных слоев и слоя *a*-Si:H при увеличении ω обусловлено уменьшением электрического сопротивления конденсатора. Вследствие этого с увеличением ω мнимая часть емкости шунтируется прыжковой электрической проводимостью конденсатора. Определен сдвиг фаз для подаваемого на конденсатор синусоидального электрического сигнала в зависимости от частоты $\omega/2\pi$ в диапазоне 0,1–300 Гц для значений электропроводности слоя водородизированного аморфного кремния $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-11}$; $1 \cdot 10^{-10}$; $1 \cdot 10^{-9}$ (Ом · см)⁻¹ при температуре 300 К. С увеличением электропроводности σ_{dc} слоя *a*-Si:H минимальное абсолютное значение угла сдвига фаз ($\approx 65^\circ$) сдвигается в область высоких частот (от 1 до 100 Гц). Предложенный конденсатор может найти применение в электрических цепях регистрации низкочастотных сигналов для целей биомедицины.

Ключевые слова: водородизированный аморфный кремний, диоксид кремния, низкочастотный конденсатор, электропроводность на постоянном и переменном токах, электрическая емкость, сдвиг фаз

Для цитирования. Низкочастотный конденсатор с прыжковой электропроводностью рабочего вещества (на примере *a*-Si:H) / Н. А. Поклонский [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 153–161. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-153-161>

Nikolai A. Poklonski, Ilya I. Anikeev, Sergey A. Vyrko*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***LOW-FREQUENCY CAPACITOR WITH HOPPING ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF THE WORKING SUBSTANCE (ON THE EXAMPLE OF *a*-Si:H)**

Abstract. We propose a structural and electrical schemes of a capacitor based on a 3 μm thick *a*-Si:H (amorphous hydrogenated silicon) layer separated from the metal plates by 0.3 μm thick dielectric layers of SiO₂ (silicon dioxide). We consider room temperatures ($T \approx 300$ K) when in the absence of illumination for *a*-Si:H the hopping mechanism of electron migration via point defects of the structure prevails. For such a capacitor, the dependencies of the capacitance on the frequency of the measuring signal $\omega/2\pi$ in the range from 0.1 to 300 Hz are calculated for the *a*-Si:H layer with stationary hopping electrical conductivity $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ (Ohm · cm)⁻¹. It is assumed that there is no end-to-end electron transfer between the *a*-Si:H layer, dielectric layers and capacitor plates in the small-signal mode of capacitance measurement. It is shown that the real part of the capacitance of the capacitor decreases with increasing angular frequency ω , and the imaginary part is negative and depends non-monotonically on ω . The decrease in the real part of the device capacitance to the geometric capacitance of the series-connected oxide layers and the *a*-Si:H layer with increasing ω is due to a decrease in the electrical resistance of the capacitor. As a result, with increasing ω , the imaginary part of the capacitance is shunted by the hopping electrical conductivity of the capacitor. The phase shift for a sinusoidal electrical signal supplied to the capacitor is determined depending on the frequency $\omega/2\pi$ in the range of 0.1–300 Hz for the values of electrical conductivities of the hydrogenated amorphous silicon layer $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-11}$, $1 \cdot 10^{-10}$, and $1 \cdot 10^{-9}$ (Ohm · cm)⁻¹ at the temperature 300 K. With an increase in the electrical conductivity σ_{dc} of the *a*-Si:H layer, the minimum absolute value of the phase shift angle ($\approx 65^\circ$) shifts to the high-

frequency region (from 1 to 100 Hz). The proposed low-frequency capacitor can find application in electrical circuits for detecting low-frequency electrical signals for the purposes of biomedicine.

Keywords: hydrogenated amorphous silicon, silicon dioxide, low-frequency capacitor, electrical conductivity at direct and alternating currents, capacitance, phase shift

For citation. Poklonski N. A., Anikeev I. I., Vyrko S. A. Low-frequency capacitor with hopping electrical conductivity of the working substance (on the example of a -Si:H). *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 153–161 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-153-161>

Введение. Согласно [1, 2] электрическая проводимость нелегированного аморфного кремния (a -Si) и пассивированного водородом (a -Si:H) обусловлена ненасыщенными ковалентными связями Si–Si. Вообще, разнообразие электронных свойств этих полупроводниковых материалов, полученных разными методами и в разных условиях, определяется как самокомпенсацией ненасыщенных Si–Si связей, так и их пассивацией атомами водорода [3].

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния (a -Si:H) обычно получают путем введения водорода в пленки аморфного кремния, полученные напылением в вакууме или катодным распылением, методом разложения моносилана (SiH_4) и водорода в тлеющем электрическом разряде, а также металл-индуцированной лазер-стимулированной кристаллизацией [4]. Отличительной особенностью a -Si:H как полупроводникового материала является возможность его легирования донорами или акцепторами, что преобразует его в полупроводник n - или p -типа и изменяет его физические свойства. Такие пленки находят применение в качестве фотодиодов, транзисторов, пьезорезисторов, детекторов электромагнитных волн инфракрасного диапазона и т. д. [4, 5].

В [6] для области температур 170–300 К проведены измерения частотных зависимостей проводимости в диапазоне 2 Гц – 30 МГц пленок a -Si:H, помещенных между металлическими, полупроводниковыми или изоляторными контактами. Однако результаты расчетов по рассмотренным там теоретическим моделям не согласуются с экспериментальными данными в области частот больше 1 кГц, а также в этой работе не рассматривался сдвиг фаз между током и напряжением.

Низкочастотный конденсатор с рабочим веществом «изолятор – собственный полупроводник – изолятор» рассматривался в работе [7], однако расчет частотной зависимости его емкости и сдвига фаз между током и напряжением не проводился. Впоследствии для такого конденсатора на основе собственного кристаллического кремния были рассчитаны [8] высокочастотная (от 0,3 до 300 МГц) емкость и сдвиг фаз при лабораторных условиях.

Причины появления на температурных зависимостях электрических потерь пиков в килогерцовом диапазоне на структурах типа (металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл) изучены в [9]. Показано, что пики определяются изменением проводимости компенсированных полупроводников, а их температурное и частотное положения позволяют определить удельную электропроводность высокоомного полупроводникового материала.

Исследование характеристик аморфного кремния и его сплавов с водородом представляет практический интерес при создании радиационно-стойких полупроводниковых приборов [10, 11]. Так, электрофизические свойства a -Si:H в меньшей степени подвержены деградации под действием ионизирующего излучения, нежели свойства кристаллического кремния. По величинам емкости и сдвига фаз электрического сигнала в аморфном кремнии можно определять синхронность токов в разных фазах и корректировать их для обеспечения стабильной работы электрической цепи. Также сдвиг фаз используется в биомедицинских целях, например для разработки систем измерения и анализа электрических сигналов головного мозга и сердца [12–14].

Итак, расчет частотных зависимостей электрических характеристик конденсаторов с различной степенью разупорядочения рабочего вещества все еще является актуальной задачей кремниевой микроэлектроники.

Цель работы – рассчитать низкочастотную электрическую емкость и сдвиг фаз конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний с прыжковой

миграцией электронов между дефектами структуры – изолятор», что может быть использовано для расширения диапазона функционирования фазосдвигающих электрических цепей (см., напр., [15, 16]).

Модель конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний – изолятор». Пусть пластина из аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) толщиной d_s и площадью поверхности S находится посередине между металлическими обкладками плоского электрического конденсатора и отделена от них слоями изолятора (диоксида кремния, SiO_2) толщиной d_{ox} (рис. 1, *a*). Конденсатор подключен к источнику переменного синусоидального электрического напряжения. Координатная ось x перпендикулярна поверхности пластины полупроводника, занимающего пространство $-d_s/2 < x < d_s/2$, координатные оси y и z параллельны поверхности пластины.

Отметим, что далее не учитываются электрические эффекты на границах раздела металл–изолятор и изолятор–полупроводник, которые учитывались в [7, 17]. Также считается, что отсутствует сквозной перенос электронов (т. е. постоянный ток проводимости [18]) между обкладками конденсатора.

Конденсатор с рабочим веществом « $\text{SiO}_2\text{-}a\text{-Si:H}\text{-SiO}_2$ » содержит параллельную $R_s C_g$ -цепь слоя $a\text{-Si:H}$, последовательно соединенную с емкостями C_{ox} диэлектрических прослоек из диоксида кремния (см. рис. 1, *b*). На рисунке использованы следующие обозначения: $\underline{R}_s = \underline{R}_s(\omega) = R_{s1}(\omega) - i R_{s2}(\omega)$ – комплексное сопротивление полупроводника ($a\text{-Si:H}$), ω – угловая частота переменной составляющей измерительного сигнала, $i = (-1)^{1/2}$ – мнимая единица, $C_{ox} = S \varepsilon_{ox} / d_{ox}$ и $C_g = S \varepsilon_s / d_s$ – геометрические емкости диэлектрика и полупроводника со статическими диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_{ox} = \varepsilon_{r,ox} \varepsilon_0$ и $\varepsilon_s = \varepsilon_{r,s} \varepsilon_0$ соответственно, $\varepsilon_{r,ox} = 3,9$ и $\varepsilon_{r,s} = 11,8$ – относительные диэлектрические проницаемости диоксида кремния и аморфного гидрогенизированного кремния [1], $\varepsilon_0 = 8,85$ пФ/м – электрическая постоянная.

Действительная C_1 и мнимая C_2 части комплексной электрической емкости $\underline{C} = \underline{C}(\omega) = C_1(\omega) + i C_2(\omega)$ эквивалентной схемы (см. рис. 1, *c*) есть [8, 19–21]

$$C_1 = \text{Re } \underline{C} = \frac{C_{ox}}{2} \frac{1 + \omega R_{s2}(C_{ox}/2 + 2C_g) + \omega^2 (R_{s1}^2 + R_{s2}^2) C_g (C_{ox}/2 + C_g)}{[1 + \omega R_{s2}(C_{ox}/2 + C_g)]^2 + \omega^2 R_{s1}^2 (C_{ox}/2 + C_g)^2}, \quad (1)$$

$$C_2 = \text{Im } \underline{C} = \frac{-\omega R_{s1} (C_{ox}/2)^2}{[1 + \omega R_{s2}(C_{ox}/2 + C_g)]^2 + \omega^2 R_{s1}^2 (C_{ox}/2 + C_g)^2} < 0,$$

где действительная $R_{s1} > 0$ и мнимая $R_{s2} > 0$ части комплексного электрического сопротивления \underline{R}_s слоя $a\text{-Si:H}$ связаны с действительной $\sigma_1 > 0$ и мнимой $\sigma_2 > 0$ частями электропроводности этого слоя $\underline{\sigma}(\omega) = \sigma_1 + i \sigma_2$ соотношениями

$$R_{s1} = \frac{d_s}{S} \frac{\sigma_1}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad R_{s2} = \frac{d_s}{S} \frac{\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (2)$$

Отметим, что в пределе $R_{s1} \rightarrow \infty$ формулы (1) переходят в $C_1 = (C_{ox}/2) C_g / (C_{ox}/2 + C_g)$ и $C_2 = 0$, что соответствует последовательно соединенным конденсаторам с геометрическими емкостями $C_{ox}/2$ и C_g и общей емкостью $C_{gt} = (C_{ox}/2) C_g / (C_{ox}/2 + C_g)$, т. е. $C_1 = C_{gt}$. В пределе $\omega \rightarrow 0$ имеем $C_1 = C_{ox}/2$ и $C_2 = 0$.

Действительная Y_1 и мнимая Y_2 части комплексного электрического адмиттанса конденсатора $\underline{Y} = \underline{Y}(\omega) = Y_1 + i Y_2$ эквивалентной схемы структуры есть $Y_1 = \text{Re } \underline{Y} = -\omega C_2$; $Y_2 = \text{Im } \underline{Y} = \omega C_1$.

Из (1) находим сдвиг фаз $\theta = \theta(\omega)$ между переменным током и напряжением на конденсаторе с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний – изолятор»:

$$\theta = \text{arctg}(-Y_2/Y_1) = \text{arctg}(C_1/C_2). \quad (3)$$

Комплексная электрическая проводимость слоя $a\text{-Si:H}$ есть (см., напр., [22–24])

$$\underline{\sigma}(\omega) = \sigma_{dc} + \underline{\sigma}_{ac}(\omega) = \sigma_1 + i \sigma_2, \quad (4)$$

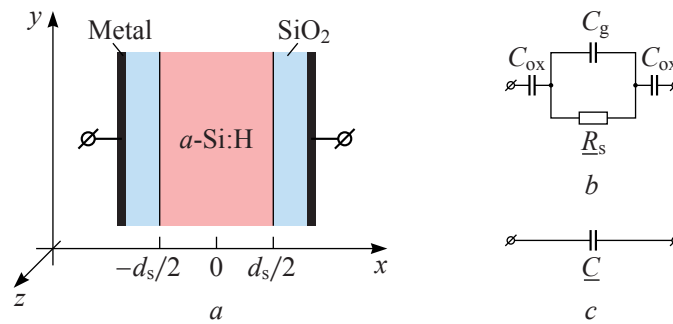


Рис. 1. Поперечное сечение конденсатора с пластиной из гидрогенизированного аморфного кремния ($a\text{-Si:H}$) толщиной d_s , отделенной от металлических обкладок конденсатора слоями изолятора (SiO_2) толщиной d_{ox} (затемнены); поперек полупроводниковой пластины создается переменная разность электрических потенциалов двумя металлическими электродами, параллельными плоскости yz (а). Эквивалентная схема конденсатора с рабочим веществом « $\text{SiO}_2\text{-}a\text{-Si:H}\text{-SiO}_2$ » (б). Упрощенная эквивалентная схема системы (с)

Fig. 1. Cross-section of a capacitor with a hydrogenated amorphous silicon ($a\text{-Si:H}$) plate of thickness d_s , separated from the metal plates of the capacitor by dielectric layers of thickness d_{ox} (shaded); a variable electrical potential difference is created across the semiconductor wafer by two metal electrodes parallel to the yz plane (a). Equivalent circuit of a capacitor with the working substance “ $\text{SiO}_2\text{-}a\text{-Si:H}\text{-SiO}_2$ ” (b). Simplified equivalent circuit of the system (c)

где σ_{dc} – электропроводность на постоянном токе, $\sigma_{ac}(\omega)$ – электропроводность на переменном токе, σ_1 и σ_2 – действительная и мнимая части электропроводности.

Согласно [23, 25] электропроводность неупорядоченных полупроводниковых и диэлектрических материалов на переменном токе при частотах измерительного сигнала до единиц гигагерц можно представить в виде [22–25]

$$\sigma_{ac}(\omega) = A\omega^s + iB\omega^s, \tag{5}$$

где A и B – некоторые постоянные, s – показатель степени, зависящий от свойств аморфного гидрогенизированного кремния (см. зависимость параметра s от температуры для аморфного германия [26]).

Входящие в формулу (5) величины A и B связаны соотношением [23, 25]

$$B/A = \text{tg}(\pi s/2). \tag{6}$$

Результаты расчетов и их обсуждение. Алгоритм расчета комплексной электрической емкости $\underline{C} = C_1(\omega) + iC_2(\omega)$ включает 5 этапов:

1) из экспериментально определяемой зависимости действительной части электропроводности на переменном токе $\sigma_1(\omega) = \sigma_{dc} + A\omega^s$ от угловой частоты измерительного сигнала ω и равенства переменной и постоянной составляющих электропроводности в виде $A\omega^s = \sigma_{dc}$ в области слабой зависимости σ_1 от ω определялся параметр A при $s = 0,75$;

2) найденное значение A подставляется в соотношение (6) для нахождения B ;

3) значения A и B используются для вычисления частотной зависимости электропроводности $\sigma_{ac}(\omega)$ по (5);

4) действительная σ_1 и мнимая σ_2 части комплексной электропроводности $\underline{\sigma}(\omega)$ на переменном токе по (4) с учетом (5) используются для вычисления действительной R_{s1} и мнимой R_{s2} частей комплексного электрического сопротивления \underline{R}_s по (2) слоя аморфного гидрогенизированного кремния;

5) значения величин R_{s1} и R_{s2} подставляются в формулы (1) для нахождения частотных зависимостей действительной C_1 и мнимой C_2 частей комплексной электрической емкости \underline{C} , а также модуля емкости $|\underline{C}| = (C_1^2 + C_2^2)^{1/2}$ и для нахождения сдвига фаз θ между переменным током и напряжением по формуле (3).

Расчеты проводились для толщины аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) $d_s = 3$ мкм, толщины изолятора (SiO_2) $d_{ox} = 0,3$ мкм, относительных диэлектрических проница-

емостей $\epsilon_{r,s} = 11,8$ для $a\text{-Si:H}$ и $\epsilon_{r,ox} = 3,9$ для SiO_2 . Электропроводности образцов $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-11}$; $1 \cdot 10^{-10}$; $1 \cdot 10^{-9}$ ($\text{Ом} \cdot \text{см}$) $^{-1}$ соответствуют экспериментальным данным [3, 27] для неотожженных пленок $a\text{-Si:H}$ при температуре $T \approx 300$ К. Толщина $d_s = 3$ мкм слоя полупроводника согласуется с толщинами реально получаемых пленок $a\text{-Si:H}$ [28]. Для используемых толщин последовательно соединенных слоев SiO_2 и слоя $a\text{-Si:H}$ величина геометрической емкости, приходящаяся на единицу площади S контакта металл–диэлектрик, есть $C_{gt}/S = (1/S)[(C_{ox}/2)C_g/(C_{ox}/2 + C_g)] = 2,17$ нФ/см 2 .

На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимостей действительной C_1 и мнимой C_2 частей комплексной электрической емкости по формулам (1) в единицах емкости C_{gt} от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$ при $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ ($\text{Ом} \cdot \text{см}$) $^{-1}$. Из рис. 2 видно, что действительная часть C_1 емкости с увеличением частоты $\omega/2\pi$ уменьшается до емкости C_{gt} , а мнимая часть C_2 отрицательна и немонотонно зависит от частоты $\omega/2\pi$. Монотонное уменьшение емкости C_1 до емкости C_{gt} и немонотонная зависимость емкости C_2 при увеличении $\omega/2\pi$ обусловлены уменьшением электрического сопротивления конденсатора и, как следствие, шунтированием электрической проводимостью слоя $a\text{-Si:H}$.

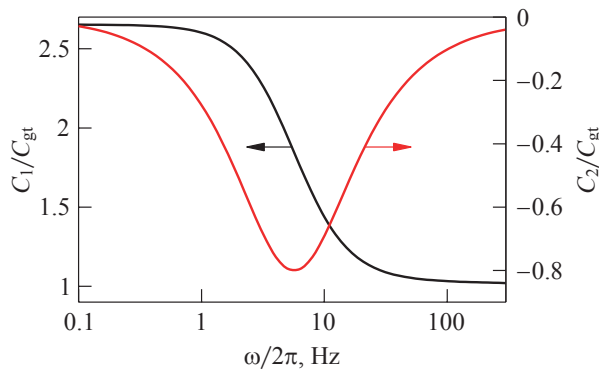


Рис. 2. Зависимости действительной $C_1 = \text{Re } \underline{C}$ и мнимой $C_2 = \text{Im } \underline{C}$ частей комплексной электрической емкости в единицах C_{gt} от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$, рассчитанные по формулам (1) для электропроводности $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ ($\text{Ом} \cdot \text{см}$) $^{-1}$ слоя $a\text{-Si:H}$ при температуре $T \approx 300$ К

Fig. 2. Dependences of the real $C_1 = \text{Re } \underline{C}$ and imaginary $C_2 = \text{Im } \underline{C}$ parts of the complex capacitance in C_{gt} units on the frequency of the measuring signal $\omega/2\pi$, calculated by formulas (1) for electrical conductivity $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ ($\text{Ohm} \cdot \text{cm}$) $^{-1}$ of $a\text{-Si:H}$ layer at temperature $T \approx 300$ K

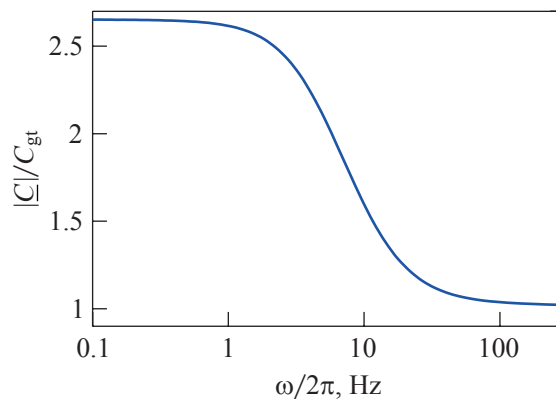


Рис. 3. Зависимость модуля $|\underline{C}| = (C_1^2 + C_2^2)^{1/2}$ комплексной электрической емкости в единицах C_{gt} от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$, рассчитанная по формулам (1) для электропроводности $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ ($\text{Ом} \cdot \text{см}$) $^{-1}$ слоя $a\text{-Si:H}$ при температуре $T \approx 300$ К

Fig. 3. Dependence of the modulus $|\underline{C}| = (C_1^2 + C_2^2)^{1/2}$ of the complex capacitance in C_{gt} units on the frequency of the measuring signal $\omega/2\pi$, calculated by formulas (1) for electrical conductivity $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ ($\text{Ohm} \cdot \text{cm}$) $^{-1}$ of $a\text{-Si:H}$ layer at temperature $T \approx 300$ K

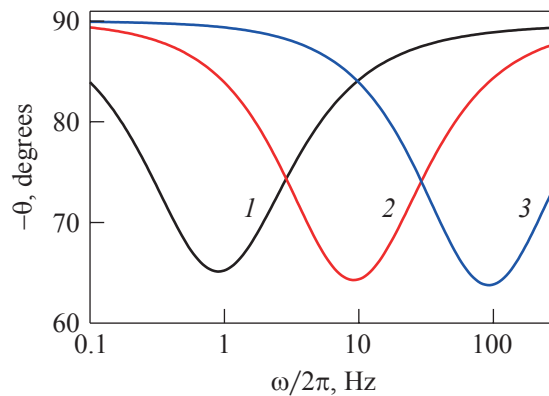


Рис. 4. Зависимости угла сдвига фаз θ от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$, рассчитанные по формуле (3) для электропроводностей σ_{dc} [(Ом · см) $^{-1}$]: $1 \cdot 10^{-11}$ (кривая 1); $1 \cdot 10^{-10}$ (кривая 2); $1 \cdot 10^{-9}$ (кривая 3) слоя a -Si:H при температуре $T \approx 300$ К

Fig. 4. Dependences of the phase shift angle θ on the frequency of the measuring signal $\omega/2\pi$, calculated by formula (3) for electrical conductivities σ_{dc} [(Ohm · cm) $^{-1}$]: $1 \cdot 10^{-11}$ (curve 1), $1 \cdot 10^{-10}$ (curve 2), and $1 \cdot 10^{-9}$ (curve 3) of a -Si:H layer at temperature $T \approx 300$ K

На рис. 3 показан результат расчета зависимости модуля $|\underline{C}| = (C_1^2 + C_2^2)^{1/2}$ комплексной электрической емкости по формулам (1) в единицах емкости C_{gt} от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$ при $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10}$ (Ом · см) $^{-1}$. Из рис. 3 видно, что с увеличением частоты $\omega/2\pi$ модуль $|\underline{C}|$ емкости уменьшается до C_{gt} , что также объясняется ее шунтированием электрической проводимостью слоя a -Si:H.

На рис. 4 представлены результаты расчетов зависимостей угла сдвига фаз θ между током и напряжением по формуле (3) от частоты измерительного сигнала $\omega/2\pi$ для стационарных электропроводностей σ_{dc} [(Ом · см) $^{-1}$]: $1 \cdot 10^{-11}$ (кривая 1); $1 \cdot 10^{-10}$ (кривая 2); $1 \cdot 10^{-9}$ (кривая 3) слоя аморфного гидрогенизированного кремния. Из рис. 4 видно, что с увеличением электропроводности σ_{dc} на порядок минимум на зависимости $-\theta(\omega)$ сдвигается в область высоких частот примерно на один порядок.

Заключение. В качестве рабочего вещества конденсатора предложена структура «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний с прыжковой проводимостью – изолятор». Слой аморфного гидрогенизированного кремния (a -Si:H) толщиной 3 мкм отделен от металлических электродов конденсатора двумя диэлектрическими слоями из диоксида кремния, каждый толщиной 0,3 мкм. Расчет проведен для комнатной температуры (≈ 300 К), когда в слое a -Si:H наблюдается прыжковый механизм миграции электронов между точечными дефектами структуры. Для такого конденсатора рассчитаны зависимости действительной и мнимой частей комплексной электрической емкости, а также сдвиг фаз между током и напряжением от частоты $\omega/2\pi$ синусоидального измерительного сигнала малой амплитуды. Расчет показывает, что с увеличением ω действительная часть емкости конденсатора уменьшается, а мнимая часть отрицательна и немонотонно зависит от ω . Вследствие уменьшения электрического сопротивления конденсатора при увеличении ω действительная часть емкости конденсатора уменьшается до геометрической емкости последовательно соединенных емкостей двух SiO₂-слоев и слоя a -Si:H. По этой же причине с увеличением ω мнимая часть емкости шунтируется электрической проводимостью конденсатора. Угол сдвига фаз θ немонотонно зависит от частоты $\omega/2\pi$ в диапазоне от 0,1 до 300 Гц, а максимум $\theta(\omega) \approx -65^\circ$ сдвигается в высокочастотную область с увеличением электропроводности σ_{dc} слоя a -Si:H на постоянном токе.

Благодарности. Работа поддержана Государственной программой научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» Республики Беларусь.

Acknowledgements. The work was supported by the Belarusian National Research Program “Materials Science, New Materials and Technologies”.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физика гидрогенизированного аморфного кремния: пер. с англ. / под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. – Вып. 1. – М.: Мир, 1987. – 368 с.
2. Физика гидрогенизированного аморфного кремния: пер. с англ. / под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. – Вып. 2. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
3. Электропроводность и структура слоев аморфного кремния / А. А. Андреев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1986. – Т. 20, вып. 8. – С. 1469–1475.
4. Technology and applications of amorphous silicon / ed. by R. A. Street. – Berlin: Springer, 2000. – xii + 418 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04141-3>
5. Springer handbook of semiconductor devices / eds.: M. Rudan, R. Brunetti, S. Reggiani. – Cham: Springer, 2023. – xxiv + 1680 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79827-7>
6. Radscheit, H. Ac and Dc conductivity in amorphous silicon-hydrogen films / H. Radscheit, K. G. Breitschwerdt // Solid State Commun. – 1983. – Vol. 47, № 3. – P. 157–161. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(83\)90699-3](https://doi.org/10.1016/0038-1098(83)90699-3)
7. Djurić, Z. Static characteristics of the metal–insulator–semiconductor–insulator–metal (MISIM) structure–II. Low frequency capacitance / Z. Djurić, M. Smiljanić, D. Tjapkin // Solid-State Electron. – 1975. – Vol. 18, № 10. – P. 827–831. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(75\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(75)90002-7)
8. Poklonski, N. A. High-Frequency Capacitor with Working Substance “Insulator-Undoped Silicon-Insulator” / N. A. Poklonski, I. I. Anikeev, S. A. Vyrko // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 247–255. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2022-13-4-247-255>
9. Прибылов, Н. Н. Электрические потери в высокоомном кремнии с глубокими уровнями / Н. Н. Прибылов, Е. И. Прибылова // Физика и техника полупроводников. – 1996. – Т. 30, вып. 4. – С. 635–639.
10. Radiation effects in semiconductors / ed. K. Iniewski. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – xvi + 416 p. <https://doi.org/10.1201/9781315217864>
11. Claeys, C. Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices / C. Claeys, E. Simoen. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2002. – xxii + 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
12. Biosensors and bioelectronics / eds.: C. Karunakaran, K. Bhargava, R. Benjamin. – Amsterdam: Elsevier, 2015. – xii + 332 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03790-2>
13. Plonsey, R. Bioelectricity: a quantitative approach / R. Plonsey, R. C. Barr. – New York: Springer, 2007. – xiv + 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-48865-3>
14. Bioelectronics: from theory to applications / eds.: I. Willner, E. Katz. – Weinheim: Wiley, 2005. – xviii + 476 p. <https://doi.org/10.1002/352760376X>
15. Rawlins, J. C. Basic AC circuits / J. C. Rawlins. – Boston: Newnes, 2000. – x + 542 p. <https://doi.org/10.1016/B978-075067173-6/50006-7>
16. Rahmani-Andebili, M. AC electrical circuit analysis: practice problems, methods, and solutions / M. Rahmani-Andebili. – Cham: Springer, 2021. – x + 230 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60986-3>
17. Krupski, J. Interfacial capacitance / J. Krupski // Phys. Status Solidi B. – 1990. – Vol. 157, № 1. – P. 199–207. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221570119>
18. Rahmani-Andebili, M. DC electrical circuit analysis: practice problems, methods, and solutions / M. Rahmani-Andebili. – Cham: Springer, 2020. – x + 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50711-4>
19. Maddock, R. J. Electronics for engineers / R. J. Maddock, D. M. Calcutt. – Harlow: Longman, 1994. – xiv + 720 p.
20. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications / eds.: E. Barsoukov, J. R. Macdonald. – Hoboken: Wiley, 2018. – xviii + 528 p. <https://doi.org/10.1002/9781119381860>
21. Tooley, M. Electronic circuits: fundamentals and applications / M. Tooley. – London: Routledge, 2020. – xii + 510 p. <https://doi.org/10.1201/9780367822651>
22. Pollak, M. Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon / M. Pollak, T. H. Geballe // Phys. Rev. – 1961. – Vol. 122, № 6. – P. 1742–1753. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>
23. Long, A. R. Frequency-dependent loss in amorphous semiconductors / A. R. Long // Adv. Phys. – 1982. – Vol. 31, № 5. – P. 553–637. <https://doi.org/10.1080/00018738200101418>
24. Castro, R. High-frequency conductivity of amorphous and crystalline Sb₂Te₃ thin films / R. Castro, A. Kononov, N. Anisimova // Coatings. – 2023. – Vol. 13, № 5. – P. 950 (1–10). <https://doi.org/10.3390/coatings13050950>
25. Elliott, S. R. A.c. conduction in amorphous chalcogenide and pnictide semiconductors / S. R. Elliott // Adv. Phys. – 1987. – Vol. 36, № 2. – P. 135–218. <https://doi.org/10.1080/00018738700101971>
26. Климович, Б. В. Прыжковая электропроводность на переменном токе ковалентных полупроводников с глубокими дефектами / Б. В. Климович, Н. А. Поклонский, В. Ф. Стельмах // Физика и техника полупроводников. – 1985. – Т. 19, вып. 5. – С. 848–852.
27. AC conductivity of undoped a-Si:H and μ c-Si:H in connection with morphology and optical degradation / M. Yamazaki [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 28, № 4R. – P. 577–585. <https://doi.org/10.1143/JJAP.28.577>
28. Chen, B. Development of thick film PECVD amorphous silicon with low stress for MEMS applications / B. Chen, F. E. H. Tay, C. Iliescu // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 7269. – P. 72690M (1–11). <https://doi.org/10.1117/12.810441>

References

1. Joannopoulos J. D., Lucovsky G. (eds.). *The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon I: Structure, Preparation, and Devices*. Berlin, Springer, 1984. xiv + 290 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-12807-7>
2. Joannopoulos J. D., Lucovsky G. (eds.). *The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon II: Electronic and Vibrational Properties*. Berlin, Springer, 1984. xii + 360 p. <https://doi.org/10.1007/3540128077>
3. Andreev A. A., Sidorova T. A., Kazakova E. A., Ablova M. S., Vinogradov A. Ya. Electrical conductivity and structure of amorphous silicon films. *Soviet Physics: Semiconductors*, 1986, vol. 20, no. 8, pp. 922–926.
4. Street R. A. (ed.). *Technology and Applications of Amorphous Silicon*. Berlin, Springer, 2000. xii + 418 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04141-3>
5. Rudan M., Brunetti R., Reggiani S. (eds.). *Springer Handbook of Semiconductor Devices*. Cham, Springer, 2023. xxiv + 1680 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79827-7>
6. Radscheit H., Breitschwerdt K. G. Ac and Dc conductivity in amorphous silicon-hydrogen films. *Solid State Communications*, 1983, vol. 47, no. 3, pp. 157–161. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(83\)90699-3](https://doi.org/10.1016/0038-1098(83)90699-3)
7. Djurić Z., Smiljanić M., Tjapkin D. Static characteristics of the metal–insulator–semiconductor–insulator–metal (MISIM) structure–II. Low frequency capacitance. *Solid-State Electronics*, 1975, vol. 18, no. 10, pp. 827–831. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(75\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(75)90002-7)
8. Poklonski N. A., Anikeev I. I., Vyrko S. A. High-frequency capacitor with working substance “insulator–undoped silicon–insulator”. *Pribory i metody izmerenij = Devices and Methods of Measurements*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 247–255. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2022-13-4-247-255>
9. Pribylov N. N., Pribylova E. I. Electrical losses in high-resistivity silicon with deep levels. *Semiconductors*, 1996, vol. 30, no. 4, pp. 344–346.
10. Iniewski K. (ed.). *Radiation Effects in Semiconductors*. Boca Raton, CRC Press, 2011. xvi + 416 p. <https://doi.org/10.1201/9781315217864>
11. Claeys C., Simoen E. *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2002. xxii + 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
12. Karunakaran C., Bhargava K., Benjamin R. (eds.). *Biosensors and Bioelectronics*. Amsterdam, Elsevier, 2015. xii + 332 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03790-2>
13. Plonsey R., Barr R. C. *Bioelectricity: A Quantitative Approach*. New York, Springer, 2007. xiv + 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-48865-3>
14. Willner I., Katz E. (eds.). *Bioelectronics: From Theory to Applications*. Weinheim, Wiley, 2005. xviii + 476 p. <https://doi.org/10.1002/352760376X>
15. Rawlins J. C. *Basic AC Circuits*. Boston, Newnes, 2000. x + 542 p. <https://doi.org/10.1016/B978-075067173-6/50006-7>
16. Rahmani-Andebili M. *AC Electrical Circuit Analysis: Practice Problems, Methods, and Solutions*. Cham, Springer, 2021. x + 230 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60986-3>
17. Krupski J. Interfacial capacitance. *Physica Status Solidi B*, 1990, vol. 157, no. 1, pp. 199–207. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221570119>
18. Rahmani-Andebili M. *DC Electrical Circuit Analysis: Practice Problems, Methods, and Solutions*. Cham, Springer, 2020. x + 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50711-4>
19. Maddock R. J., Calcutt D. M. *Electronics for Engineers*. Harlow, Longman, 1994. xiv + 720 p.
20. Barsoukov E., Macdonald J. R. (eds.). *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. Hoboken, Wiley, 2018. xviii + 528 p. <https://doi.org/10.1002/9781119381860>
21. Tooley M. *Electronic Circuits: Fundamentals and Applications*. London, Routledge, 2020. xii + 510 p. <https://doi.org/10.1201/9780367822651>
22. Pollak M., Geballe T. H. Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon. *Physical Review*, 1961, vol. 122, no. 6, pp. 1742–1753. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>
23. Long A. R. Frequency-dependent loss in amorphous semiconductors. *Advances in Physics*, 1982, vol. 31, no. 5, pp. 553–637. <https://doi.org/10.1080/00018738200101418>
24. Castro R., Kononov A., Anisimova N. High-frequency conductivity of amorphous and crystalline Sb₂Te₃ thin films. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 5, pp. 950 (1–10). <https://doi.org/10.3390/coatings13050950>
25. Elliott S. R. A.c. conduction in amorphous chalcogenide and pnictide semiconductors. *Advances in Physics*, 1987, vol. 36, no. 2, pp. 135–218. <https://doi.org/10.1080/00018738700101971>
26. Klimkovich B. V., Poklonskii N. A., Stel'makh V. F. Alternating-current hopping electrical conductivity of covalent semiconductors with deep-level defects. *Soviet Physics: Semiconductors*, 1985, vol. 19, no. 5, pp. 522–524.
27. Yamazaki M., Nakata J., Imao S., Shirafuji J., Inuishi Y. AC conductivity of undoped a-Si:H and μ c-Si:H in connection with morphology and optical degradation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 28, no. 4R, pp. 577–585. <https://doi.org/10.1143/JJAP.28.577>
28. Chen B., Tay F. E. H., Iliescu C. Development of thick film PECVD amorphous silicon with low stress for MEMS applications. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 7269, pp. 72690M (1–11). <https://doi.org/10.1117/12.810441>

Информация об авторах

Поклонский Николай Александрович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: poklonski@bsu.by. <http://orcid.org/0000-0002-0799-6950>

Аникеев Илья Иванович – аспирант, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ilyaanikeev35@mail.ru

Вырко Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vyrko@bsu.by

Information about the authors

Nikolai A. Poklonski – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: poklonski@bsu.by. <http://orcid.org/0000-0002-0799-6950>

Илья I. Anikeev – Postgraduate Student, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ilyaanikeev35@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9738-6995>

Sergey A. Vyrko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vyrko@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-1145-1099>