

DOI: 10.18721/JPM.14203  
УДК 537

## АНАЛИЗ ПРИЧИН АНОМАЛЬНОГО ПОВЫШЕНИЯ ЕМКОСТИ ПЛЕНОК ФУЛЛЕРИТА C<sub>60</sub> НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

**Д.И. Долженко, И.Б. Захарова, Н.Т. Сударь**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Известный экспериментальный факт аномального возрастания диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пленок фуллерита C<sub>60</sub> на низких частотах (ниже 1 кГц) переменного электрического тока не имеет до настоящего времени убедительного объяснения. Данное исследование было нацелено на выяснение причин указанной аномалии. Была изготовлена структура *p*-Si/C<sub>60</sub>/эвтектика InGa и измерена частотная зависимость ее емкости. На основании полученных экспериментальных данных проведен многосторонний анализ явления. Показано, что возможной причиной аномального повышения  $\epsilon$  в низкочастотной области является интеркаляция фуллерита молекулами кислорода с образованием молекулярных групп C<sub>60</sub>/O<sub>2</sub>, обладающих значительным дипольным моментом. Наличие таких групп вызывает кардинальное различие между значениями диэлектрической проницаемости поверхностных областей кристаллитов и таковой для области их объема, что, в свою очередь, приводит к кажущемуся подъему диэлектрической проницаемости исследуемой структуры.

**Ключевые слова:** фуллерит C<sub>60</sub>, поликристаллическая пленка, диэлектрическая проницаемость, уравнение Фрëлиха, интеркаляция кислорода

**Ссылка при цитировании:** Долженко Д.И., Захарова И.Б., Сударь Н.Т. Анализ причин аномального повышения емкости пленок фуллерита C<sub>60</sub> на низких частотах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 2. С. 28–37. DOI: 10.18721/JPM.14203

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## THE ANOMALOUS RISE OF CAPACITANCE OF C<sub>60</sub> FULLERITE FILMS AT LOW FREQUENCIES: A CAUSE ANALYSIS

**D.I. Dolzhenko, I.B. Zakharova, N.T. Sudar**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

A known physical fact of the anomalous rise of dielectric permittivity  $\epsilon$  of C<sub>60</sub> fullerite films at ac low frequencies (below 1 kHz) has not had a convincing explanation up to now. Our study was aimed at elucidating the causes of that anomaly. The *p*-Si/C<sub>60</sub>/InGa-eutectic structure was made and a frequency dependence of its capacitance was measured. Relying on the experimental result, a versatile analysis of the phenomenon was carried out. It was shown that the anomalous rise of  $\epsilon$  value in the low-frequency region resulted from oxygen intercalation of fullerite with formation of C<sub>60</sub>/O<sub>2</sub> molecular groups exhibited significant dipole momenta. The presence of such groups produced a dramatic difference between dielectric permittivity of the crystallites' surface areas and that of their volumes. As a result, the difference led to an apparent increase in the dielectric permittivity  $\epsilon$  of the structure under study.

**Keywords:** C<sub>60</sub> fullerite, polycrystalline film, permittivity, Frohlich's equation, oxygen intercalation

**Citation:** Dolzhenko D.I., Zakharova I.B., Sudar N.T., The anomalous rise of capacitance of C<sub>60</sub> fullerite films at low frequencies: a cause analysis, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (2) (2021) 28–37. DOI: 10.18721/JPM.14203



This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

В настоящее время тонкие пленки фуллеренов рассматриваются как перспективный материал органической электроники [1 – 3]. При этом наибольшее внимание уделяется изучению свойств фуллерена  $C_{60}$ , поскольку его молекулы обладают наибольшей симметрией и стабильностью. Характерной особенностью фуллерена в конденсированной фазе (фуллерита) является возможность интеркаляции атомов примеси в его кристаллическую решетку [4]. В гранцентрированной кубической (ГЦК) решетке фуллерита  $C_{60}$  примесные атомы заполняют октаэдрические и тетраэдрические пустоты между молекулами «хозяина», взаимодействуют с ними и способны оказывать заметное влияние на физические свойства фуллеритовых пленок [5].

Особый интерес вызывает интеркаляция фуллерита атомами кислорода. Электронное сродство молекул  $C_{60}$  значительно выше, чем у молекул кислорода, оно оценивается примерно в 2,67 эВ [6], тогда как для кислорода – примерно в 0,45 эВ [7]. Поэтому можно ожидать, что кислород будет выступать как донор электронов, а фуллерит – как их акцептор. Авторы статьи [8] полагают, что частичный перенос электрона с донора на акцептор приводит к возникновению у молекулы  $C_{60}/O_2$  дипольного момента, что, по их мнению, и вызывает значительный рост диэлектрической проницаемости для пленок  $C_{60}$  на частотах ниже  $10^3$  Гц. Однако собственно физический механизм возникновения этого явления авторами [8] не обсуждается.

Зачастую причиной аномального возрастания емкости на низких частотах приложенного переменного напряжения является электродная поляризация; последняя возникает в диэлектриках, обладающих заметной электропроводностью, когда имеется плохой контакт между образцом и электродом. При таких условиях на интерфейсе формируется

тонкий слой, который характеризуется значительным электрическим импедансом [9]. Очевидно, что данная причина не связана с физическими свойствами собственно фуллеритовых пленок.

В литературе рассматриваются и другие причины аномального возрастания емкости диэлектриков в низкочастотной области. Например, поляризация Максвелла – Вагнера, которая наблюдается в неоднородных диэлектриках с проводящими примесями [10] или, для поликристаллических диэлектриков, это различие между значениями диэлектрической проницаемости (и проводимости) внешней и внутренней областей кристаллитов – модель «зерно-прослойка» [3, 10].

Цель данного исследования – выяснение возможной роли описанных эффектов и оценка их влияния на диэлектрическую проницаемость пленок фуллерита  $C_{60}$ .

## Методика эксперимента

Объектом изучения служила пленка фуллерита  $C_{60}$ , нанесенная на холодную подложку из кремния  $p$ -типа марки КДБ-1 методом термического напыления. Толщина пленки  $L$ , измеренная с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4, составляла  $250 \pm 50$  нм.

Особое внимание уделялось обеспечению надежных контактов между образцом фуллерита и электродами.

Созданная указанным методом пленка  $C_{60}$  имела поликристаллическую структуру с размерами кристаллитов  $D$ , равными 100 – 200 нм [11]. Кристаллиты, формирующие пленку, располагались на кремниевой подложке хаотично, в несколько слоев. Перед проведением экспериментов, пленки  $C_{60}$ , нанесенные на подложки, выдерживались в воздушной атмосфере в течение длительного времени с целью обеспечения надежного контакта пленки с кремниевой подложкой, поскольку последняя использовалась в качестве одного из электродов.

Вторым электродом служила зонд-игла, изготовленная из жидкой индий-галлиевой эвтектики [12]. Такой электрод обеспечивал надежный электрический контакт с пленкой фуллерита, без ее механического повреждения, за счет взаимодействия сил поверхностного натяжения эвтектики и гравитационных сил.

Для измерения емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в диапазоне частот от 25 Гц до 1 МГц использовался измеритель иммитанса Е7-20. Амплитуда тестового переменного напряжения составляла 0,04 В. Все измерения проводились при комнатной температуре  $T = 293$  К в затемненной измерительной ячейке. Перед диэлектрическими измерениями исследуемый участок пленки  $C_{60}$  подвергался электроформовке, в ходе которой на электроды в течение нескольких десятков минут подавалось постоянное напряжение  $U = 30$  В. Электроформовка значительно увеличивала стабильность показаний и воспроизводимость результатов при повторных измерениях на данном участке пленки [11].

Площадь пятна контакта игольчатого электрода  $S$  с пленкой фуллерита рассчитывалась нами на основании данных измерения емкости  $C$  исследуемой структуры на частоте 1 МГц. Принималось, что на этой частоте диэлектрическая проницаемость исследуемой пленки близка к значению высокочастотной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\infty}$  фуллерита  $C_{60}$ . Согласно литературным данным [13],  $\epsilon_{\infty} = 2,6$ . Поэтому при значении емкости  $C = 8,2$  пФ площадь пятна контакта получается равной  $S \approx 0,09$  мм<sup>2</sup>. В дальнейшем это значение  $S$  использовалось при расчете спектра диэлектрической проницаемости во всем исследованном диапазоне частот.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На первом этапе исследования стояла задача выяснить, вызвано ли возрастание емкости в области низких частот явлением электродной поляризации. Согласно сведениям, изложенным в монографии [9], при

низкочастотных измерениях поправка на электродные эффекты, определяемая как разность между измеряемой емкостью  $C$  и истинной емкостью  $C_{true}$  (она реализуется в отсутствие электродной поляризации), зависит от проводимости материала  $\sigma$  и частоты  $f$ , на которой проводится измерение, причем

$$C - C_{true} \sim \sigma^2 / f^2. \quad (1)$$

Поскольку фотопроводимость фуллерита  $C_{60}$  наблюдается в видимом спектральном диапазоне, проводимость исследуемой структуры можно было увеличить путем светового воздействия на нее. С этой целью мы использовали светодиод белого свечения с цветовой температурой 4000 К, создающий световой поток в 250 лм. Свет с помощью специальной линзы фокусировался на область контакта индий-галлиевого электрода с пленкой фуллерита. При освещении структуры ее проводимость возрастала от  $7 \cdot 10^{-7}$  См/см (значение при затемнении) до  $3 \cdot 10^{-5}$  См/см.

На рис. 1 представлены полученные нами низкочастотные зависимости емкости исследуемой структуры в условиях затемнения (кривая 1) и светодиодного освещения (кривая 2), т. е. при различной концентрации в ней свободных носителей заряда, определяющих проводимость. Видно, что кривые на графике практически совпадают, хотя значение емкости должно было бы вырасти примерно на четыре порядка, в соответствии с формулой (1). Следует также отметить, что в рассматриваемых координатах  $C (1/f^2)$  предполагаемая зависимость в случае электродной поляризации должна была бы быть линейной, однако этого также не наблюдается.

Таким образом, анализ эксперимента, проведенного на первом этапе исследования, позволяет не рассматривать электродную поляризацию в качестве причины аномального возрастания емкости в низкочастотной области спектра. Другими словами, наблюдаемое исследователями возрастание емкости не следует считать артефактом, т. е. не связано с особенностями проведения эксперимента

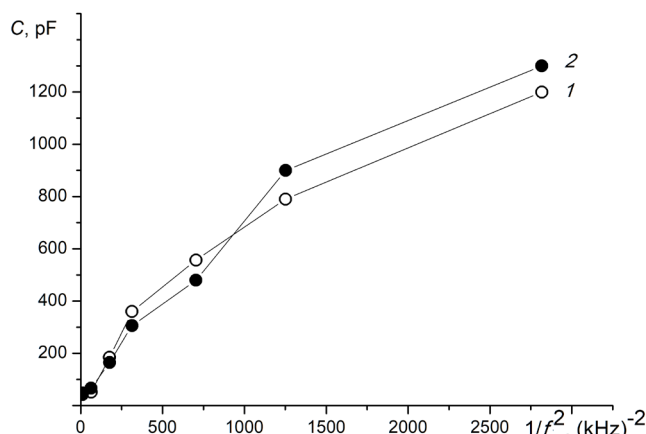


Рис. 1. Низкочастотные зависимости емкости структуры  $p\text{-Si}/\text{C}_{60}/\text{эвтектика InGa}$  в условиях затемнения (1) и светодиодного освещения (2). Световой поток (250 лм) фокусировался на область контакта  $\text{C}_{60}/\text{эвтектика InGa}$  при  $T = 293 \text{ K}$

и особенностями электрических контактов.

На втором этапе исследования рассматривались глубинные механизмы возрастания емкости рассматриваемой структуры на низких частотах.

Как отмечалось выше, пленки фуллерита, полученные методом термического напыления, являются поликристаллическими. Молекулы кислорода быстро проникают внутрь пленки, диффундируя по границам раздела кристаллитов, вследствие чего приграничные области кристаллитов насыщены кислородом в большей степени, чем их объем. Поэтому проводимость и диэлектрическая проницаемость поверхностных слоев кристаллитов и их объема будут различными [3]. Следовательно, для описания диэлектрической дисперсии в таких структурах целесообразно использовать представления о многослойных диэлектрических системах, для которых характерна аномально высокая диэлектрическая проницаемость в низкочастотной области [9].

На рис. 2, а представлена зависимость диэлектрической проницаемости от частоты  $f$ . Значения  $\epsilon'$  рассчитаны с помощью формулы плоского конденсатора на основании измерений емкости. Видно, что диэлектрическая проницаемость при снижении частоты приложенного переменного напряжения бы-

стро и монотонно возрастает. Так, на частоте  $10^3 \text{ Гц}$  значение  $\epsilon' \approx 3$ , а на частоте  $30 \text{ Гц}$  оно достигает  $\epsilon' \approx 300$ .

Характер зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta(f)$  (рис. 2, б) — немонотонный. На частотах свыше  $10^5 \text{ Гц}$  величина  $\text{tg}\delta \approx 0,01$ , однако она постепенно возрастает по мере уменьшения частоты, достигая максимального значения около 0,8 при  $f \approx 10^2 \text{ Гц}$ , и в дальнейшем снижается до значения примерно 0,1. Точно определить позицию данного максимума на частотной шкале не представляется возможным, вследствие значительного разброса данных при измерениях  $\text{tg}\delta$ . Следует отметить, что авторы работы [8] также наблюдали широкий максимум на частотной кривой  $\text{tg}\delta$  в области 1 кГц при измерениях пленок фуллерита  $\text{C}_{60}$ . Возникновение максимума они связывали с процессом интеркаляции фуллерита кислородом и образованием дипольных групп у молекулы  $\text{C}_{60}/\text{O}_2$ .

Согласно модели «зерно-прослойка», совокупность звеньев в виде внутренних областей кристаллитов (зерен) и их внешних областей (прослоек) рассматривается как однородная структура с одним временем релаксации  $\tau$ , соответствующим времени релаксации отдельного звена, а для расчета величины  $\tau$  используются уравнения Дебая для

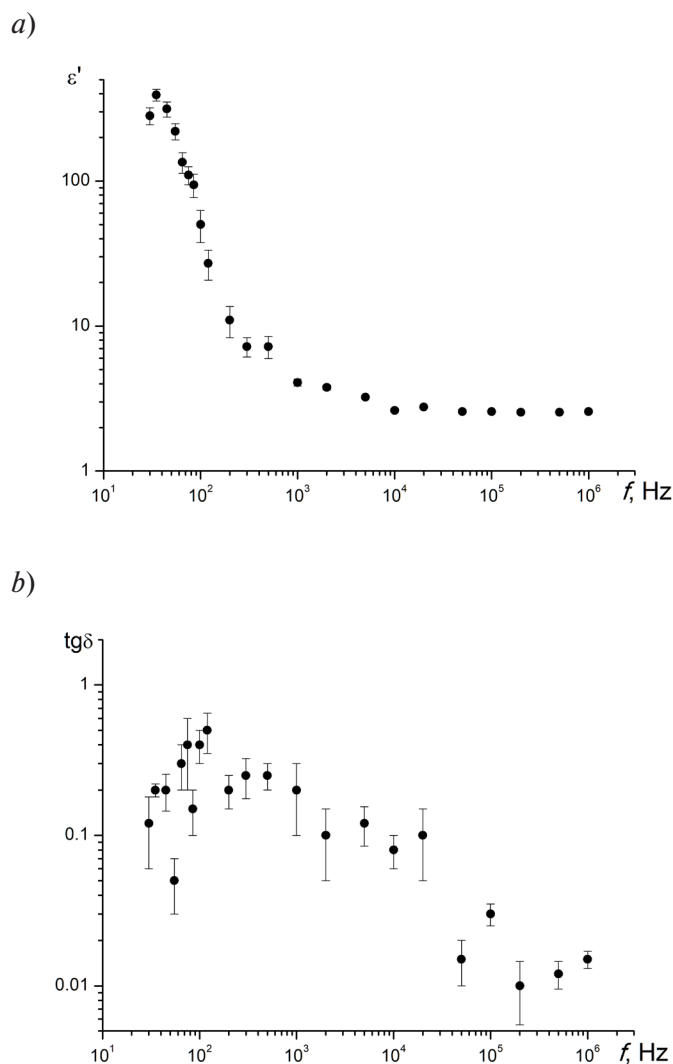


Рис. 2. Зависимости диэлектрической проницаемости (a) и тангенса угла диэлектрических потерь (b) для структуры  $p\text{-Si}/\text{C}_{60}/\text{эвтектика InGa}$ ;  $T = 293\text{ K}$

дипольно-ориентационной поляризации.

При накоплении полярных молекулярных групп  $\text{C}_{60}/\text{O}_2$  в прослойках их диэлектрическая проницаемость оказывается выше, чем таковая у зерен, а проводимость этих групп – ниже [9]. Поэтому низкочастотную диэлектрическую проницаемость окисленного приповерхностного слоя кристаллита (прослойки)  $\epsilon_1$  можно оценить с помощью соотношения

$$\epsilon' = \epsilon_1 D/d, \quad (2)$$

где  $\epsilon'$  – диэлектрическая проницаемость пленки  $\text{C}_{60}$ , определяемая эксперименталь-

но;  $d$  – толщина окисленного приповерхностного слоя кристаллита (прослойки).

Значение толщины  $d$  можно оценить только приближенно. Согласно данным статьи [14], величина  $d$ , по-видимому, не должна превышать 15 нм. Поэтому при размере кристаллита  $D = 150\text{ нм}$  получим, что на частоте 35 Гц при значениях  $d$  в пределах от 5 до 15 нм значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  прослойки лежит в интервале от 10 до 30.

Оценим, при каких значениях дипольного момента молекулы  $\text{C}_{60}/\text{O}_2$  и при какой концентрации этих молекул достижимо данное значение  $\epsilon_1$ . Воспользуемся уравнением Фрелиха, связывающего макроскопическую ди-

электрическую проницаемость с дипольным моментом молекулы:

$$\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)(2\varepsilon_1 + \varepsilon_\infty)}{\varepsilon_1(\varepsilon_\infty + 2)^2} = \frac{Ngp^2}{9\varepsilon_0 k_B T}, \quad (3)$$

где  $N$  – число полярных молекул  $C_{60}/O_2$  (диполей) в единице объема прослойки;  $p$ , Д, – их дипольный момент;  $T$ , К, – температура,  $k_B$ , Дж·К<sup>-1</sup>, – постоянная Больцмана;  $\varepsilon_0$ , Ф/м, – электрическая постоянная;  $g$  – параметр, учитывающий локальную упорядоченность молекул;

$$g = 1 + z \langle \cos \gamma \rangle.$$

Здесь  $z$  – координационное число (для ГЦК решетки  $z = 12$ ),  $\langle \cos \gamma \rangle$  – среднее значение косинуса угла между молекулой в точке отсчета и ее ближайшими соседями (при расчетах мы принимали  $\langle \cos \gamma \rangle = 0,7$ ).

Вычислим величину  $N$ , учитывая, что на каждую ГЦК ячейку приходится две молекулы  $C_{60}$ . Допустим, что все молекулы  $C_{60}$  в приповерхностном слое соединения окислены; тогда число диполей в единице объема данного слоя равно

$$N = 2 \frac{V_{ox}}{(a \cdot D)^3}, \quad (4)$$

где  $V_{ox}$ , нм<sup>3</sup>, – объем окисленного слоя в одном кристаллите;  $a$ , нм, – длина ребра ГЦК ячейки  $C_{60}$  ( $a = 1,417$  нм [14]).

При этих условиях получим, что  $N \approx 2,5 \cdot 10^{26}$  м<sup>-3</sup>. Такое значение концентрации полярных групп представляется разумным, поскольку согласно данным работы [14] в окисленном слое относительное содержание кислорода С : О = 10 : 1.

В соответствии с данными работы [8], величина дипольного момента  $p$  молекулы  $C_{60}/O_2$  составляет 0,9 Д. При его оценке авторы предполагали, что доля  $\xi$  заряда, перешедшего с донора (интеркалированный кислород  $O_2$ ) на акцептор (молекула фуллерита  $C_{60}$ ), составляет 4 %. Такое значение  $\xi$  было

определено авторами из условия наилучшего согласия результатов расчета с экспериментом. Тем не менее, в статье [15] указывается на возможность переноса существенно большей доли заряда. Согласно приведенным там оценкам, величина  $\xi$  может достигать 49 %.

Отметим, что при оценке дипольных моментов рассматриваемых молекулярных групп следует иметь в виду, что процесс взаимодействия кислорода с молекулами фуллерена приводит к образованию различных форм окисленного фуллерена  $C_{60}O_n$ . Например, возможно образование так называемых «открытого» и «закрытого» эпоксидов, а также других изомеров, где атомы кислорода могут присоединяться в различных местах молекулы фуллерена. У «открытого» эпоксида,  $C_{60}O$  (5-6, пентагон-гексагон), атом кислорода присоединяется к двум атомам углерода на границе соответствующих граней. У «закрытого»,  $C_{60}O$  (6-6, гексагон-гексагон), атом кислорода располагается над двойной связью на границе двух гексагонов [16]. У других изомеров, как уже сказано, атомы кислорода могут присоединяться в самых разных местах молекулы фуллерена.

Очевидно, что все образующиеся молекулы  $C_{60}O_n$  характеризуются различными длинами химических связей и степенью переноса электронной плотности с донора на акцептор, и, как следствие этого, различными дипольными моментами.

С учетом вышеизложенного выясним, при каких значениях толщины прослойки  $d$  и дипольного момента  $p$  может выполняться соотношение (3). При вычислении его левой части для различных величин  $d$ , воспользуемся выражением (2), приняв  $\varepsilon' = 300$  и  $D = 150$  нм. Обозначим эту левую часть как  $A(d)$ , а правую, в которую входят ранее оцененные нами параметры  $N$  и  $g$ , – как  $B(d)$ . Дипольный момент молекулы  $C_{60}/O_2$  будем рассматривать в качестве параметра, варьируя его значения.

Данные зависимости представлены на рис. 3. Видно, что условие  $A = B$  может быть реализовано только при толщинах окисленного слоя  $d \approx 15$  нм (что согласуется с извест-

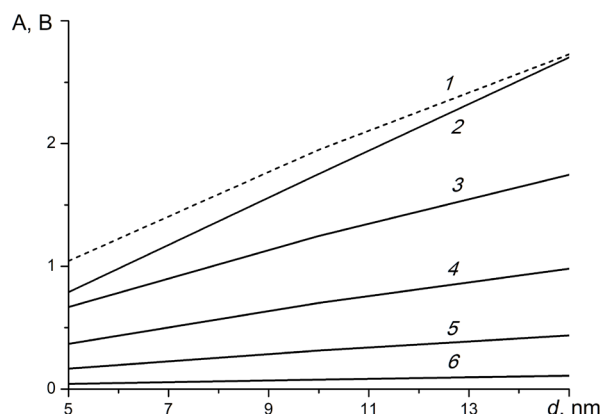


Рис. 3. Зависимости величин левой (А) (прямая 1) и правой (В) (прямые 2 – 6) частей уравнения Фрёлеха (3) от толщины окисленного приповерхностного слоя кристаллита (прослойки) при различных значениях дипольного момента молекулы  $C_{60}/O_2$ ,  $p$ , Д: 5 (2), 4 (3), 3 (4), 2 (5), 1 (6)

ными экспериментальными результатами), но при значительных дипольных моментах молекул  $C_{60}/O_2$ , составляющих 4 – 5 Д, когда относительная доля  $\delta$  переносимого заряда электрона, согласно данным работы [8], будет превышать 22 %.

### Заключение

Выполнено исследование частотной зависимости диэлектрических свойств структур  $p$ -Si/ $C_{60}$ /эвтектика InGa. Показано, что в качестве физического механизма, определяющего аномально высокое возрастание емкости исследуемой структуры на низкой частоте можно рассматривать образование во внешних областях кристаллитов фуллерита  $C_{60}$  молекулярных групп  $C_{60}/O_2$ , обладающих значительным дипольным моментом. При этом проводимость и диэлектрическая проницаемость поверхностных слоев кристал-

литов и их объема оказываются различными, что и приводит к кажущемуся увеличению диэлектрической проницаемости исследуемой структуры. Поэтому для описания диэлектрической проницаемости в таких структурах можно использовать представления о многослойных диэлектрических системах.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук В.Ф. Борозюле за помощь в проведении экспериментов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение от 17. 11. 2020 № 075-15-2020-934).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sachdeva S., Singh D., Tripathi S.K. Optical and electrical properties of fullerene  $C_{70}$  for solar cell applications // Optical Materials. 2020. Vol. 101. March. P. 109717.
2. Pascual J., Delgado J.L., Tena-Zaera R. Physicochemical phenomena and application in solar cells of perovskite: Fullerene films // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2018. Vol. 9. No. 11. Pp. 2893–2902.
3. Долженко Д.И., Борозюла В.Ф., Захарова И.Б., Сударь Н.Т. Влияние тока, ограниченного объемным зарядом, на диэлектрические



свойства поликристаллических пленок фуллерита  $C_{60}$  // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 1. С. 58–63.

4. Assink R.A., Schirber J.E., Loy D.A., Morosin B., Carlson G.A. Intercalation of molecular species into the interstitial sites of fullerene // Journal of Materials Research. 1992. Vol. 7. No. 8. Pp. 2136–2143.

5. Яготинцев К.А., Стеценко Ю.Е., Гальцов Н.Н., Легченкова И.В., Прохвятилов А.И. Влияние примесных молекул кислорода на структурные и термодинамические свойства фуллерита  $C_{60}$  // Физика низких температур. 2010. Т. 36. № 3. С. 335–342.

6. Brink C., Andersen L.H., Hvelplund P., Mathur D., Voldstad J.D. Laser photodetachment of  $C_{60}^-$  and  $C_{70}^-$  ions cooled in a storage ring // Chemical Physics Letters. 1995. Vol. 233. No. 1–2. Pp. 52–56.

7. Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А., Медведев В.А., Потапов В.К., Ходеев Ю.С. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: Наука, 1974. 351 с.

8. Pevzner B., Hebard A.F., Dresselhaus M.S. Role of molecular oxygen and other impurities in the electrical transport and dielectric properties of  $C_{60}$  films // Physical Review B. 1997. Vol. 55. No. 24. Pp. 16439–16449.

9. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. М.: Физматлит, 2008. 376 с.

10. Koops C.G. On the dispersion of resistivity and dielectric constant of some semiconductors at

audio frequencies // Physical Review. 1951. Vol. 83. No. 1. Pp. 121–124.

11. Захарова И.Б., Долженко Д.И., Бородзюля В.Ф., Сударь Н.Т. Эффект электроформовки в поликристаллических пленках фуллерена  $C_{60}$  // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45. Вып. 4. С. 21–23.

12. Бородзюля В.Ф., Мошников В.А., Пермьяков Н.В. Измерительный зонд и способ его изготовления. Пат. RU 2654385 С1. Россия. G 01 Q 60/00, 70/16, B 82 Y 35/00. Заявка № 2017 11 4837. Заявл. 26.04.2017. Опубл. 17.05.2018. Патентообладатели: Бородзюля В.Ф., Мошников В.А., Пермьяков Н.В. Бюл. № 14. 2018. 2 с.

13. Mondal P., Lunkenheimer P., Loidl A. Dielectric relaxation, ac and dc conductivities in the fullerenes  $C_{60}$  and  $C_{70}$  // Zeitschrift für Physik. B: Condensed Matter. 1995. Vol. 99. No. 1. Pp. 527–533.

14. Макарова Т.Л., Захарова И.Б., Зубкова Т.И., Вуль А.Я. Ориентированный рост бескислородных кристаллитов  $C_{60}$  на кремниевых подложках // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. № 2. С. 354–359.

15. Dattani R., Gibson K.F., Few S., Borg A.J., Dimaggio P.A., Nelson J., Kazarian S.G., Cabral J.T. Fullerene oxidation and clustering in solution induced by light // Journal of Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 446. 15 May. Pp. 24–30.

16. Creegan K.M., Robbins J.L., Robbins W.K., Millar J.M., Sherwood R.D., Tindall P.J., Jones D.R. Synthesis and characterization of  $C_{60}O$ , the first fullerene epoxide // Journal of the American Chemical Society. 1992. Vol. 114. No. 3. Pp. 1103–1105.

*Статья поступила в редакцию 16.05.2021, принята к публикации 20.05.2021.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДОЛЖЕНКО Дмитрий Игоревич** – аспирант Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
ddi.dev.94@gmail.com

**ЗАХАРОВА Ирина Борисовна** – доктор физико-математических наук, доцент инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
zakharova@rpht.spbstu.ru



**СУДАРЬ Николай Тобисович** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

sudar53@mail.ru

## REFERENCES

1. **Sachdeva S., Singh D., Tripathi S.K.**, Optical and electrical properties of fullerene  $C_{70}$  for solar cell applications, *Optical Materials*. 101 (March) (2020) 109717.
2. **Pascual J., Delgado J.L., Tena-Zaera R.**, Physicochemical phenomena and application in solar cells of perovskite: Fullerene films, *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 9 (11) (2018) 2893–2902.
3. **Dolzhenko D.I., Borodzyulya V.F., Zakharova I.B., Sudar' N.T.**, The influence of space-charge-limited current on the dielectric properties of polycrystalline films of fullerite  $C_{60}$ , *Technical Physics*. 66 (1) (2021) 53–58.
4. **Assink R.A., Schirber J.E., Loy D.A., et al.**, Intercalation of molecular species into the interstitial sites of fullerene, *Journal of Materials Research*. 7 (8) (1992) 2136–2143.
5. **Yagotintsev K.A., Stetsenko Yu.E., Gal'tsov N.N., et al.**, Effect of impurity oxygen molecules on the structural and thermodynamic properties of fullerite  $C_{60}$ , *Low Temperature Physics*. 36 (3) (2010) 266–271.
6. **Brink C., Andersen L.H., Hvelplund P., et al.**, Laser photodetachment of  $C_{60}^-$  and  $C_{70}^-$  ions cooled in a storage ring, *Chemical Physics Letters*. 233 (1–2) (1995) 52–56.
7. **Gurvich L.V., Karachevcev G.V., Kondratiev V.N., et al.**, *Energii razryva khimicheskikh svyazey. Potentsial ionizatsii i srodstvo k elektronu. Spravochnik. [Chemical bond energies. Ionization potential and electron affinity, Reference book]*, Nauka, Moscow, 1974 (in Russian).
8. **Pevzner B., Hebard A.F., Dresselhaus M.S.**, Role of molecular oxygen and other impurities in the electrical transport and dielectric properties of  $C_{60}$  films, *Physical Review B*. 55 (24) (1997) 16439–16449.
9. **Blythe A.R., Blythe T., Bloor D.**, *Electrical properties of polymers*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
10. **Koops C.G.**, On the dispersion of resistivity and dielectric constant of some semiconductors at audio frequencies, *Physical Review*. 83 (1) (1951) 121–124.
11. **Zakharova I.B., Dolzhenko D.I., Borodzyulya V.F., Sudar' N.T.**, The electroforming effect in polycrystalline fullerene  $C_{60}$  films, *Technical Physics Letters*. 45 (2) (2019) 142–144.
12. **Borodzyulya V.F., Moshnikov B.A., Permiakov H.V.**, Measuring probe and method of its manufacture. Pat. RU 2654385 C1. Russia, G 01 Q 60/00, 70/16, B 82 Y 35/00. No. 2017 11 4837. Date of filing: 26.04. 2017. Published 17.05.2018. Proprietors: Borodzyulya V.F., Moshnikov B.A., Permiakov H.V., Bul. No. 14. 2018.
13. **Mondal P., Lunkenheimer P., Loidl A.**, Dielectric relaxation, ac and dc conductivities in the fullerenes  $C_{60}$  and  $C_{70}$ , *Zeitschrift für Physik. B: Condensed Matter*. 99 (1) (1995) 527–533.
14. **Makarova T.L., Vul' A.Ya., Zakharova I.B., Zubkova T.I.**, Oriented growth of oxygen-free  $C_{60}$  crystallites on silicon substrates, *Physics of the Solid State*. 41 (2) (1999) 319–323.
15. **Dattani R., Gibson K.F., Few S., et al.**, Fullerene oxidation and clustering in solution induced by light, *Journal of Colloid and Interface Science*. 446 (15 May) (2015) 24–30.
16. **Creegan K.M., Robbins J.L., Robbins W.K., et al.**, Synthesis and characterization of  $C_{60}O$ , the first fullerene epoxide, *Journal of the American Chemical Society*. 114 (3) (1992) 1103–1105.

Received 16.05.2021, accepted 20.05.2021.

## THE AUTHORS

**DOLZHENKO Dmitry I.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ddi.dev.94@gmail.com

**ZAKHAROVA Irina B.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

zakharova@rpht.spbstu.ru

**SUDAR Nicolay T.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

sudar53@mail.ru