

06

Импедансная спектроскопия жидкокристаллических ячеек 5CB с нанотрубками дихалькогенидов переходных металлов

© Я.В. Барнаш^{1–3}, Н.В. Каманина^{1–3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

² АО „Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова“, Санкт-Петербург, Россия

³ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия
E-mail: Barnash.yaroslav@yandex.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 8 июня 2026 г.

Принято к публикации 29 июня 2026 г.

Исследованы электрические характеристики жидкокристаллических ячеек 5CB с нанотрубками MoS₂ и WS₂ методом импедансной спектроскопии в диапазоне 1 Hz–1 MHz. Сравнение выполнено для одинаковой концентрации 0.1 wt.%. Показано, что введение нанотрубок слабо влияет на высокочастотную диэлектрическую проницаемость, но заметно изменяет проводимость и релаксационные параметры. Для образца с MoS₂ характеристики близки к характеристикам чистого 5CB, тогда как для образца с WS₂ наблюдаются более выраженные изменения, связанные с усилением приэлектродной поляризации и изменением ионного транспорта.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, 5CB, сенсibilизация, нанотрубки MoS₂, нанотрубки WS₂, импедансная спектроскопия.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.19.63599.20706

Модификация жидкокристаллических материалов наноразмерными добавками является эффективным способом управления их электрическими и электрооптическими свойствами [1]. Особый интерес представляют нанотрубки дихалькогенидов переходных металлов, поскольку они способны изменять проводимость, структуру межфазной области и характер накопления пространственного заряда в жидкокристаллической ячейке. Для нематических систем на основе 5CB это важно как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, поскольку электрический отклик подобных ячеек определяется не только объемными параметрами слоя, но и процессами на границе электрод–жидкий кристалл [2,3].

Импедансная спектроскопия позволяет в одном эксперименте выделить вклад объемной RC-ветви, емкости двойного электрического слоя и диффузионно-ограниченных процессов в приэлектродной области. В результате становятся доступными такие параметры, как объемная проводимость, эффективная диэлектрическая проницаемость, характерные частоты релаксации и параметры межфазной поляризации [1,2]. Для корректного сопоставления влияния различных типов нанотрубок в настоящей работе сравнение проведено для одинаковой концентрации 0.1 wt.%.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ электрических характеристик чистой ячейки 5CB и композитов 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ и 5CB + 0.1 wt.% WS₂ по данным импедансной спектроскопии.

Объектом исследования служили жидкокристаллические ячейки на основе нематического 5CB в исход-

ном состоянии и после введения нанотрубок MoS₂ и WS₂. Для сопоставления из серии образцов с разной концентрацией вводимых сенсibilизаторов были выбраны три образца: 5CB, 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ и 5CB + 0.1 wt.% WS₂. Импедансные спектры измерялись в диапазоне частот от 1 Hz до 1 MHz. При обработке данных использовались следующие геометрические параметры ячейки: площадь перекрытия электродов $A = 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ и межэлектродный зазор $d = 25 \text{ }\mu\text{m}$.

Комплексный импеданс записывался в виде $Z^*(\omega) = Z'(\omega) - jZ''(\omega)$. Для аппроксимации экспериментальных спектров использовалась эквивалентная схема, состоящая из последовательного сопротивления, объемной ветви $R_{LC} \parallel C_{LC}$ и интерфейсной ветви с элементами R_q , C_{dl} , R_a , C_a и W . Здесь R_{LC} и C_{LC} описывают соответственно объемное сопротивление и объемную емкость жидкокристаллического слоя, тогда как элементы интерфейсной ветви учитывают процессы в приэлектродной области: R_q соответствует каналу утечки, C_{dl} характеризует емкость двойного электрического слоя, R_a и C_a описывают адсорбционно-поляризационный вклад, а W (элемент Варбурга) задает диффузионный перенос заряда. Выбор данной эквивалентной схемы обусловлен формой экспериментальных спектров во всем исследованном диапазоне частот. Более простая схема, содержащая только объемную RC-ветвь жидкокристаллического слоя, описывает преимущественно высокочастотный объемный отклик, но не позволяет корректно воспроизвести низкочастотную область спектра, связанную с приэлектродной

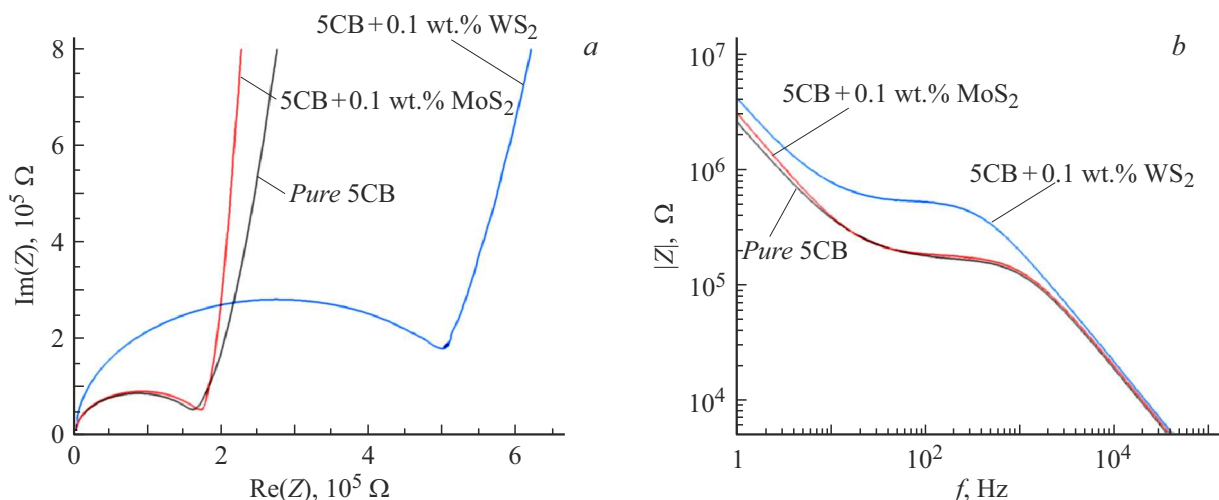


Рис. 1. Импедансные спектры и результат аппроксимации для образцов чистого 5CB, 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ и 5CB + 0.1 wt.% WS₂. *a* — диаграммы Найквиста, *b* — частотные зависимости модуля импеданса.

поляризацией и накоплением пространственного заряда. Поэтому в итоговой аппроксимации использовалась дополнительная интерфейсная ветвь с элементами C_{dl} , R_a , C_a и W , учитывающая емкость двойного электрического слоя, адсорбционно-поляризационный вклад и диффузионно-ограниченный перенос носителей заряда. Вычисление параметров проводилось в программном пакете ZView4 по экспериментальным зависимостям $Z'(f)$, $Z''(f)$ и $|Z|(f)$.

Дополнительно на основе спектров рассчитывались комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon^*(\omega)$, комплексная проводимость $\sigma^*(\omega)$, эффективная емкость $C_{eff}(\omega)$, а также характерные частоты и времена релаксации. Величина ϵ_{bulk} , характеризующая объемную диэлектрическую проницаемость жидкокристаллического слоя, определялась по высокочастотному плато $\epsilon'(f)$. Величина σ_0 , описывающая объемную проводимость, определялась по участку постоянного значения $\sigma'(f)$. Эффективная емкость C_{eff} характеризует суммарный емкостный отклик ячейки с учетом объемного и приэлектродного вкладов. Частота f_{EP} (electrode polarization) соответствует максимуму функции $\tan\delta(f)$, т. е. приэлектродной поляризации. Эта частота задает область, начиная с которой вклад накопленного пространственного заряда у электродов становится выраженным. Связанное с ней время $\tau_{EP} = 1/(2\pi f_{EP})$ характеризует скорость формирования приэлектродной области. Частота $f_{max, \epsilon''}$ соответствует максимуму мнимой части диэлектрической проницаемости и отражает наиболее выраженный релаксационный вклад в низкочастотной области спектра. Характерное время объемной зарядовой релаксации τ_{charge} , определяющее скорость перераспределения заряда в объеме ячейки, рассчитывалось как $\tau_{charge} = \epsilon_0 \epsilon_{bulk} / \sigma_0$. На рис. 1 показаны импедансные спектры и результат аппроксимации для композитов на основе выбранных составов.

Из рис. 1 видно, что для всех трех образцов сохраняется единая качественная структура спектров. В высокочастотной области отклик определяется главным образом объемной ветвью жидкокристаллического слоя, тогда как при уменьшении частоты возрастает вклад приэлектродной поляризации. Уже на уровне формы спектров заметно, что введение MoS₂ в концентрации 0.1 wt.% изменяет спектр незначительно, тогда как добавление 0.1 wt.% WS₂ приводит к более выраженному росту низкочастотного импеданса.

Переход к диэлектрическому и проводящему представлениям позволяет точнее выявить различия между образцами. Основные различия возникают в низкочастотной области, где определяющую роль играют процессы переноса и накопления заряда.

Из рис. 2, *a* следует, что наиболее чувствительным к модификации параметром является объемная проводимость. Для чистого 5CB значение σ_0 составляет $2.80 \cdot 10^{-7}$ S/m. Для образца 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ величина σ_0 составляет $2.71 \cdot 10^{-7}$ S/m, т. е. остается близкой к значению для чистого образца. Для 5CB + 0.1 wt.% WS₂ значение σ_0 уменьшается до $8.47 \cdot 10^{-8}$ S/m. Таким образом, при одинаковой концентрации 0.1 wt.% и одинаковой геометрии ячеек влияние WS₂ на проводящий канал оказывается значительно более выраженным, чем влияние MoS₂.

Величина ϵ_{bulk} изменяется существенно слабее. Для чистого 5CB она составляет 4.244, для 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ равна 3.992, а для 5CB + 0.1 wt.% WS₂ — 3.728. Следовательно, обе добавки влияют на высокочастотную диэлектрическую проницаемость ограниченно, а различия в электрическом отклике определяются прежде всего изменением проводимости и межфазной поляризации.

Особенно показательны характерные частоты и времена релаксации. Для чистого 5CB частота f_{EP} равна 162.0 Hz, а время τ_{EP} составляет 0.983 ms.

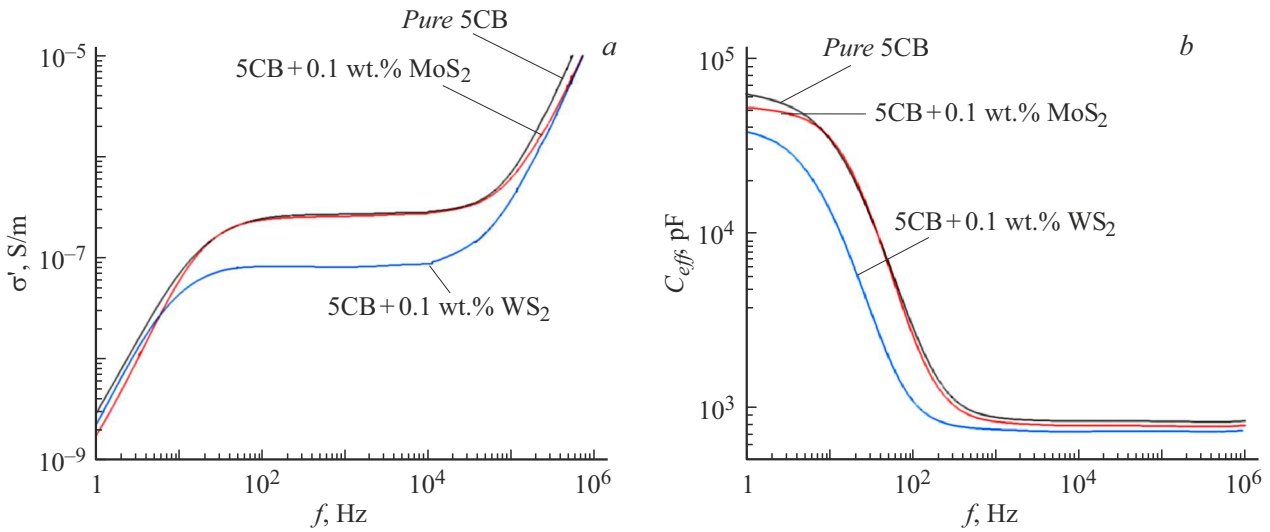


Рис. 2. Частотные зависимости электрических характеристик для образцов чистого 5CB, 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ и 5CB + 0.1 wt.% WS₂. *a* — действительная часть комплексной проводимости $\sigma'(f)$, *b* — эффективная емкость $C_{eff}(f)$.

Основные параметры, полученные на основе импедансных спектров

Образец	ϵ_{bulk}	σ_0 , 10^{-7} S/m	f_{EP} , Hz	τ_{EP} , ms	$f_{max, \epsilon''}$, Hz	τ_{charge} , ms
5CB	4.244	2.80	162.0	0.983	12.14	0.134
5CB + 0.1 wt.% MoS ₂	3.992	2.71	149.3	1.066	16.36	0.130
5CB + 0.1 wt.% WS ₂	3.728	0.847	62.84	2.533	6.53	0.390

Для образца с 0.1 wt.% MoS₂ частота f_{EP} изменяется до 149.3 Hz, а τ_{EP} увеличивается до 1.066 ms. Для образца с 0.1 wt.% WS₂ частота f_{EP} смещается до 62.84 Hz, а τ_{EP} возрастает до 2.533 ms. Аналогичная картина наблюдается и для времени объемной зарядовой релаксации: для чистого 5CB τ_{charge} равно 0.134 ms, для 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ составляет 0.130 ms, а для 5CB + 0.1 wt.% WS₂ увеличивается до 0.390 ms.

Эта интерпретация подтверждается и поведением низкочастотной эффективной емкости. Для чистого 5CB C_{eff} около 1 Hz составляет примерно 61.2 nF. Для 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ величина C_{eff} уменьшается до 51.1 nF, а для 5CB + 0.1 wt.% WS₂ снижается до 37.5 nF. Уменьшение C_{eff} при одновременном росте времен релаксации указывает на изменение структуры приэлектродной области и уменьшение числа носителей, эффективно участвующих в поляризации.

Данные таблицы показывают, что при одинаковой концентрации 0.1 wt.% MoS₂ и WS₂ воздействуют на жидкокристаллическую ячейку по-разному. Добавка MoS₂ практически не изменяет объемную проводимость и время объемной зарядовой релаксации в сравнении с чистым 5CB, хотя определенное смещение релаксационных особенностей все же наблюдается.

Напротив, добавка WS₂ приводит к заметному уменьшению σ_0 , снижению f_{EP} и росту τ_{EP} и τ_{charge} . Это означает, что в присутствии WS₂ уменьшается эффективная

подвижность или число свободных носителей заряда, а вклад приэлектродной поляризации возрастает.

Параметры эквивалентной схемы приводят к согласующемуся выводу. Для чистого 5CB объемное сопротивление R_{LC} составляет 154.94 k Ω , а объемная емкость C_{LC} — 874.56 pF. Для образца 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ параметр R_{LC} изменяется до 164.78 k Ω при близком значении $C_{LC} = 836.75$ pF. Для образца 5CB + 0.1 wt.% WS₂ рост R_{LC} выражен значительно сильнее (R_{LC} достигает 505.66 k Ω), тогда как C_{LC} уменьшается до 756.96 pF. Следовательно, различие между образцами определяется прежде всего ростом эффективного объемного сопротивления в системе с WS₂, тогда как при введении MoS₂ в концентрации 0.1 wt.% и одинаковой геометрии ячеек объемная ветвь изменяется значительно слабее.

Интерфейсные параметры также согласуются с этим выводом. Для чистого 5CB емкость двойного электрического слоя C_{dl} составляет 14.82 nF, а коэффициент Варбурга W равен $1.00 \cdot 10^6 \Omega \cdot s^{-1/2}$. Для образца 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ C_{dl} составляет 10.49 nF, а коэффициент Варбурга W равен $4.67 \cdot 10^5 \Omega \cdot s^{-1/2}$. Для образца 5CB + 0.1 wt.% WS₂ C_{dl} составляет 19.73 nF, а W возрастает до $4.04 \cdot 10^6 \Omega \cdot s^{-1/2}$. Это указывает на значительно более выраженный диффузионный и интерфейсный вклад в случае WS₂.

Методом импедансной спектроскопии исследованы электрические характеристики жидкокристаллических ячеек на основе 5CB и их композитов, полученных при введении нанотрубок MoS₂ и WS₂. Сравнение выполнено для одинаковой концентрации 0.1 wt.%. Показано, что введение нанотрубок слабо влияет на высокочастотную объемную диэлектрическую проницаемость, но существенно изменяет объемную проводимость, положение характерных частот и времена релаксации, определяющие низкочастотный ионно-поляризационный отклик.

Для состава 5CB + 0.1 wt.% MoS₂ основные параметры остаются близкими к параметрам чистого 5CB. Для состава 5CB + 0.1 wt.% WS₂ наблюдается отчетливое уменьшение объемной проводимости, снижение частоты начала выраженной приэлектродной поляризации и рост времени объемной зарядовой релаксации. Полученные результаты показывают, что при концентрации 0.1 wt.% нанотрубки WS₂ сильнее изменяют ионно-поляризационный отклик ячейки 5CB, чем нанотрубки MoS₂. Данный вывод относится к выбранной геометрии ячейки и фиксированной концентрации добавок, поэтому анализ концентрационных зависимостей должен рассматриваться как отдельный этап исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Urbanski, J.P.F. Lagerwall, J. Mater. Chem. C, **4** (16), 3485 (2016). DOI: 10.1039/C6TC00659K
- [2] P.-G. de Gennes, J. Prost. *The physics of liquid crystals*, 2nd ed. (Clarendon Press, Oxford, 1993).
- [3] Б.А. Беляев, Н.А. Дрокин, ФТТ, **57** (1), 170 (2015). [B.A. Belyaev, N.A. Drokin, Phys. Solid State, **57** (1), 181 (2015). DOI: 10.1134/S1063783415010060].