

Арутюнов К. Ю.<sup>1,2</sup>, А. С. Гурский<sup>1</sup>, Завьялов В. В.<sup>2,1</sup>, Лачинов А. Н.<sup>3,4</sup>, А. Ф. Галиев<sup>4</sup>, Д. Д. Карамов<sup>4</sup>, Юсупов А. Р.<sup>4</sup>, В. В. Артемов<sup>5,6</sup>, А. Л. Васильев<sup>5,6</sup>, В. В. Хорошко<sup>7</sup>

<sup>1</sup>МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва 10100

<sup>2</sup>ИФП им. П. Л. Капицы РАН, Москва 119334

<sup>3</sup> Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа 450054

<sup>4</sup> БГПУ им. М. Акмуллы, Уфа, 450008

<sup>5</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Москва, 123182

<sup>6</sup> Федеральный исследовательский центр «Кристаллография и фотоники» РАН, Москва, 119333

<sup>7</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, 220013

## ЭФФЕКТ НАВЕДЕННОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В СЭНДВИЧАХ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОАКТИВНОГО ПОЛИМЕРА

**Аннотация:** Полидифениленфталид (ПДФ) – органический полимер, который в основном состоянии является диэлектриком, но в метастабильном состоянии, стимулированным внешним возмущением, обнаруживает электрическую проводимость. В настоящей работе в широком диапазоне температур экспериментально исследованы транспортные свойства тонкопленочных «сэндвичей» сверхпроводник – ПДФ – сверхпроводник, где в качестве металлических электродов использовался индий и свинец. При температурах ниже соответствующих критических температур металлических обкладок наблюдались особенности, типичные для сверхпроводников. Микроскопический анализ образцов методом растровой и просвечивающей электронной микроскопии не выявил тривиальных дефектов в пленке полимера. Зависимости критического тока от продольного магнитного поля также не проявляют особенностей, которые могли бы свидетельствовать о наличии замкнутых сверхпроводящих контуров, образованных случайными металлическими контактами в толще полимера. Идентичность «сверхпроводящих»  $R(T)$  и  $V(I)$  зависимостей в системах на базе свинца и индия, и отсутствие очевидных закороток металл–металл позволяют сделать предположение, что наблюдается универсальное явление, которые можно объяснить эффектом наведенной сверхпроводимости в тонкой пленке проводящего полимера, заключенной между двумя массивными сверхпроводниками (индий или свинец).

**Ключевые слова:** электропроводящий полимер, полидифениленфталид, наведенная сверхпроводимость.

Большинство органических полимеров являются диэлектриками. Относительно недавно было обнаружено, что существует класс, так называемых, *электроактивных* полимеров, которые в основном состоянии являются широкозонными диэлектриками, но под влиянием внешних параметров могут проявлять высокую электропроводность. Эффект интерпретируется как стимулирование металлического состояния [1]. Полидифениленфталид (ПДФ) относится к классу электроактивных органических диэлектриков, которые при приложении внешнего электростатического поля и/или механического напряжения проявляют электропроводящие свойства [2].

Ранее нами исследовались структуры типа сэндвич свинец–ПДФ– свинец, в которых металлические электроды изготавливались методом термического напыления [3-5]. Несмотря на достаточно низкую температуру плавления свинца 327° С, нельзя было полностью исключить возможность термической деградации промежуточного слоя полимера. С этой целью в последующих работах [6] исследовались транспортные свойства тонкопленочных «сэндвичей» индий–ПДФ–индий, изготовленных методом холодной прокатки исключительно мягкого металла (индия). Соответственно, в такой системе с большой вероятностью можно

исключить возникновение механического или термического повреждения пленки полимера в процессе формирования гетероструктуры.

При толщинах пленки ПДФ менее 400 нм выяснилось, что все образцы, как на базе свинца, как и на базе индия, проявляют свойства, которые можно ассоциировать со сверхпроводимостью [3-6]. Однако для такого вывода нужно исключить наличие тривиальных закороток металл–металл сквозь толщу полимера. С этой целью был проведен анализ при помощи растрового и просвечивающих электронных микроскопов (Рис. 1). Микроскопический анализ как сколов, так и разрезов гетероструктуры сфокусированным ионным пучком не выявили ни тривиальных закороток металл–металл в пленке полимера, ни наличия примесных материалов. Однако, отсутствие дефектов в поле зрения микроскопа не исключает их присутствия в других частях системы

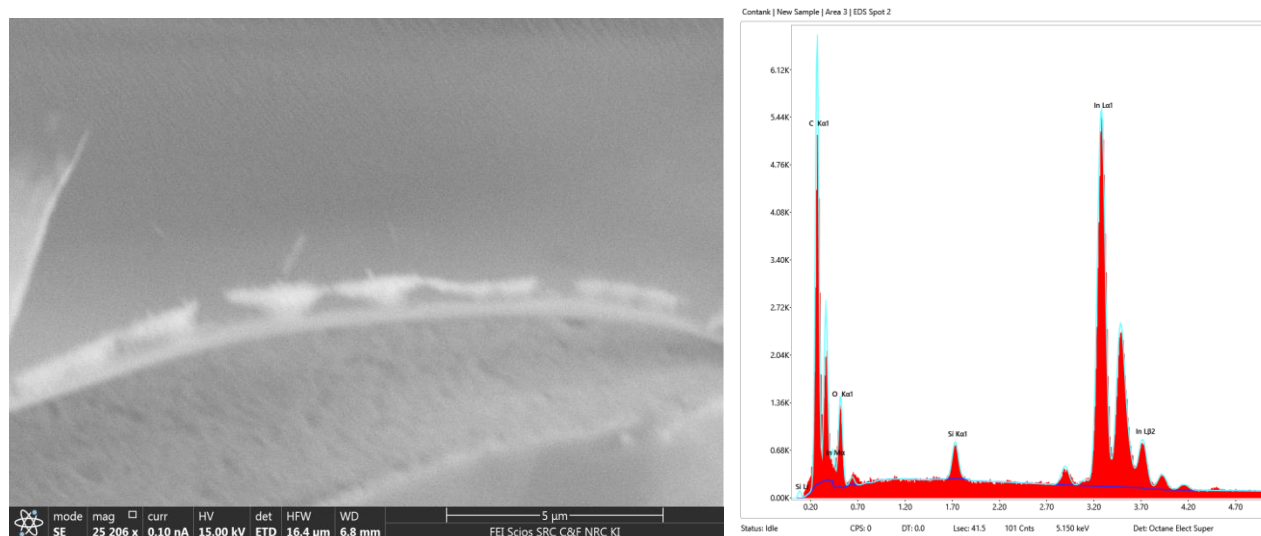


Рис. 1. Левая панель: микрофотография скола гетероструктуры, полученная методом растровой электронной микроскопии. Правая панель: точечный элементный анализ границы раздела индий–ПДФ–индий.

Как уже обсуждалось выше, в наших ранних работах  $R(T)$  и  $V(I)$  характеристики сэндвичей сверхпроводник – ПДФ – сверхпроводник на базе свинца [3-5] и индия [6] проявляли особенности, типичные для сверхпроводников. При этом ВАХ демонстрировали чеккие зависимости с критическим током, величина которого  $I_c$  убывла как с ростом температуры  $T$ , так и с приложением внешнего магнитного поля  $B$  [6]. Предположим, что в толще полимерной пленки образовались случайные металлические закоротки. В этом случае должны образовываться замкнутые сверхпроводящие контура, которые в продольном (плоскости структуры) магнитном поле должны приводить к немонотонной (например, типа фраунгоферовской), зависимости  $I_c(T=\text{const}, B)$ . Однако, ничего подобного не наблюдается. В пределах экспериментальных погрешностей при фиксированной температуре ниже критической критический ток монотонно убывает (Рис. 2). Такая зависимость может наблюдаться либо в случае, когда параметр порядка однороден в пространстве, либо если сформировано очень большое число сверхпроводящих контуров с несоразмерными площадаями. В последнем случае фраунгоферовские зависимости  $I_c(T=\text{const}, B)$  для всех контуров усредняются и остается лишь их «оггибающая». Качественно зависимости на Рис. 2 могут быть интерпретированы именно так. Но в этом случае необходимо иметь большое количество металлических закороток (и, соответственно, замкнутых контуров), что противоречит микроскопическим наблюдениям (Рис. 1).

Идентичность «сверхпроводящих»  $R(T)$  и  $V(I)$  зависимостей в системах на базе свинца и индия, и отсутствие очевидных закороток металл–металл позволяют сделать осторожное предположение, что наблюдается универсальное явление, которые можно объяснить эффектом наведенной сверхпроводимости (proximity effect) в тонкой пленке проводящего полимера, заключенной между двумя массивными сверхпроводниками (индий или свинец).

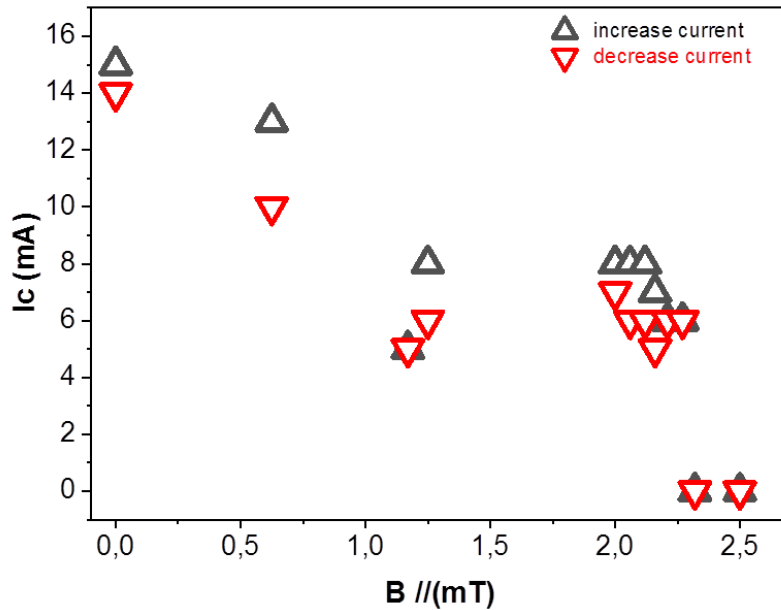


Рис. 2. Зависимости критического тока от продольного магнитного поля  $I_c(T=\text{const}, B)$  для тонкопленочной слоистой гетероструктуры In-PDP-In.

Работа поддерживалась программой сотрудничества «Зеркальные лаборатории» Национального Исследовательского Университета Высшая Школа Экономики и Башкирского Государственного Педагогического Университета им. М.В. Акмуллы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. N. Lachinov, N. V. Vorob'eva, *Physics - Uspekhi* 49(12), 1238 (2006).
2. A. N. Lachinov, V. M. Kornilov, T. G. Zagurenko, and A. Yu. Zherebov, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 102(4), 640 (2006).
3. К. Ю. Арутюнов, К. А. Беляев, В. В. Артемов, А. Л. Васильев, А. Р. Юсупов, Д. Д. Карамов, А. Н. Лачинов, *Физика твердого тела* 65(1), 151 (2023).
4. K. Yu. Arutyunov, V.V. Artemov, A. L. Vasiliev, A. R. Yusupov, D. D. Karamov, A. N. Lachinov, *Beilstein J. Nanotechnology* 13, 1551 (2022).
5. К. Ю. Арутюнов, А.С. Гурский, С.Д. Монахова, П.В. Панарина, Е.Ф. Позднякова, Д.Э. Цой, А.Р. Юсупов, Д.Д. Карамов, А.Н. Лачинов, *ИЗВЕСТИЯ УФИМСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН* 1, 42 (2023).
6. К.Ю. Арутюнов, Х.Т. Смазнова, В.В. Завьялов, А.Р. Юсупов, А.Ф. Галиев, А.Н. Лачинов, *ИЗВЕСТИЯ УФИМСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН* 1, 79 (2024).