

УДК 537.311.32
 © 1991

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В КРИСТАЛЛАХ $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$

К. А. Колесниченко, С. Ж. Коркин, А. Ю. Кудзин,
 Т. М. Столпакова, Ю. В. Гонтаренко

Исследованы температурно-частотные зависимости полной проводимости $\sigma = \sigma' + i\sigma''$ монокристаллов $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ в интервале $f = 5 \cdot 10^2 - 10^7$ Гц при температурах 290—750 К, а также ВАХ при различных температурах. Характерные особенности поведения σ , в частности наблюдаемые зависимости $\sigma' \sim f^s T^l$, $\sigma'' > \sigma'$, а также низкие значения эффективной подвижности носителей, вычисленные по данным ВАХ, и ее экспоненциальная зависимость от температуры позволяют предположить прыжковую природу проводимости в исследуемом материале.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению физики электропереноса в оксидных диэлектриках, что связано в значительной мере с их расширяющимся практическим использованием. Для кристаллов $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ такие исследования представляют интерес как для материала электрогидрационных модуляторов [1], а также в связи с изучением обнаруженного в нем эффекта стимуляции проводимости [2], природа которого окончательно не выяснена. Одним из основных критериев при выборе модели электропереноса служит поведение полной проводимости $\sigma = \sigma' + i\sigma''$ в переменных полях. Известно [3], что в случае прыжковой проводимости реализуется специфическая температурно-частотная зависимость σ , в частности степенное возрастание σ' с частотой, в то время как зонная проводимость остается постоянной вплоть до световых частот. Кроме того, для прыжкового транспорта характерны малые значения подвижности носителей и ее экспоненциальная температурная зависимость.

В связи с этим с целью изучения механизма электропереноса в кристаллах $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ в настоящей работе исследовано поведение полной проводимости кристаллов в частотном интервале $5 \cdot 10^2 - 10^7$ Гц при температурах 290—750 К. До 20 кГц использовалась мостовая установка на основе моста Е8-2, выше — куметр ВМ-560. По ВАХ, измеренным согласно методике [2] при различных температурах, изучалась эффективная подвижность носителей. Монокристаллы $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ выращивались методом Чохральского из особо чистых материалов. Основные измерения проводились на образцах толщиной порядка 0.5 мм и площадью 20 мм² для ВАХ и до 300 мм² для диэлектрических измерений. Использовались платиновые электроды, нанесенные катодным напылением, а также In—Ga электроды.

Из рис. 1, 2 видно, что в широком интервале частот f имеет место монотонное возрастание проводимости σ' , которое может быть представлено степенным законом $\sigma' \propto f^s$. Показатель степени s увеличивается с ростом частоты в пределах 0.5—2. Мнимая часть σ'' линейно возрастает с частотой, оставаясь во всем частотном интервале выше σ' , что свидетельствует о нахождении носителей заряда на локализованных состояниях [4].

Для области сильной дисперсии σ' характерна ее слабая температурная зависимость, которую можно описать законом $\sigma' \propto T^l$ ($l \approx 1$); ди-

электрическая проницаемость ϵ при этом фактически не меняется с температурой T (рис. 2, б). С ростом температуры и снижением частоты σ уменьшается, l возрастает, осуществляется постепенный переход к экспоненциальной зависимости $\sigma'(T)$, где дисперсия σ' фактически отсутствует и в пределе σ' стремится к величинам σ , измеренным на постоянном токе; при этом ϵ начинает постепенно увеличиваться с температурой, что особенно заметно на низких частотах.

Полученные данные в целом наиболее последовательно могут быть описаны в рамках моделей прыжковой проводимости, согласно которым в низкотемпературной области, где σ' слабо зависит от температуры и сильно от частоты, основной вклад в электроперенос дают перескоки носителей по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми в пределах парных центров [3] или кластеров средних размеров [4].

При этом $\sigma'' \sim \omega$ и превышает σ' . Следует, однако, отметить, что, хотя все модели прыжковой проводимости, базирующиеся на широком распределении частот прыжков, дают близкую к степенной частотную зависимость σ' , как правило, $s \leq 1$ [3-5]. В то же время экспериментальные значения s для многих оксидных кристаллов достигают значения 2, например для $\text{V}_{12}\text{GeO}_{20}$ [6]. Наблюдается это и в данной работе, где квадратичная зависимость σ' не может быть связана с неоднородностью сопротивления либо с неомичностью электродов, поскольку использовались кристаллы вы-

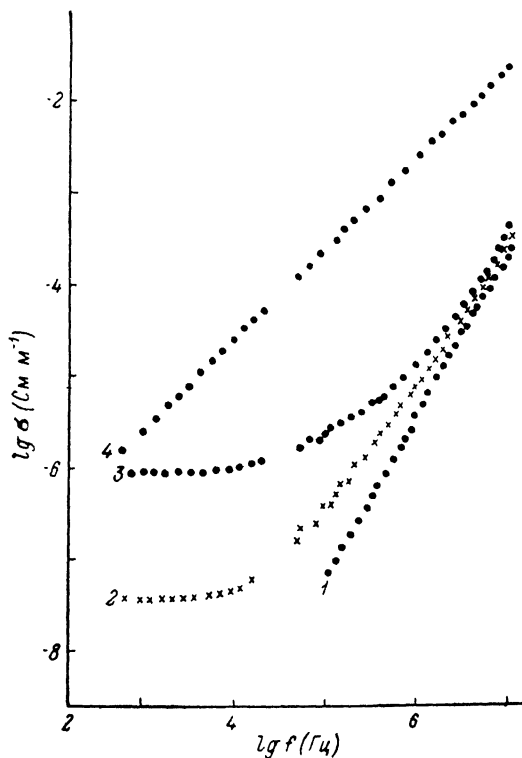


Рис. 1. Частотные зависимости σ' (1-3) и σ'' (4) для $T=293$ (1, 4), 493 (2), 573 К (3).

сокого оптического качества, образцы вырезали как перпендикулярно, так и параллельно направлению роста. Указанные зависимости сохранялись и для In-Ga электродов. Наблюдающаяся в сильных полях инжекция носителей [2] также противоречит предположению о неомичности контактов. В то же время проведенный в [7] расчет $\sigma'(f)$ показал, что при определенном пространственном и энергетическом распределении барьеров может реализоваться переход от квазилинейной частотной зависимости σ' к квадратичной; при этом s уменьшается с температурой, что и наблюдается в эксперименте.

С ростом температуры происходит переход к мультиплетной проводимости по длинным цепочкам [5], при этом s убывает, а l растет, достигая значений 19 для 1 кГц, что соответствует числу связей в кластере [8] $n^2 = (l+1)^2 = 400$. С уменьшением частоты температура такого перехода понижается. Следует отметить, что поведение σ в c - и a -направлениях кристалла различается несущественно. Наблюдается некоторое различие значений ϵ : порядка 37 для c -направления и 42 для a -направления, что несколько ниже, чем в [9]. При достаточно высоких величинах статической диэлектрической проницаемости электронный вклад сравнительно невелик ($\epsilon_c^\infty \approx 5.24$ и $\epsilon_a^\infty \approx 4.82$ на уровне длины волны 706 нм). Можно

полагать, что поляризация, связанная с прыжками носителей, вносит свой вклад в высокие значения ϵ в кристаллах $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$. Увеличение смещения носителей при переходе к мультиплетным прыжкам приводит к увеличению ϵ .

Описанное поведение σ и ϵ наблюдается в целом ряде оксидных кристаллов и связывается с прыжками по локальным состояниям, обра-

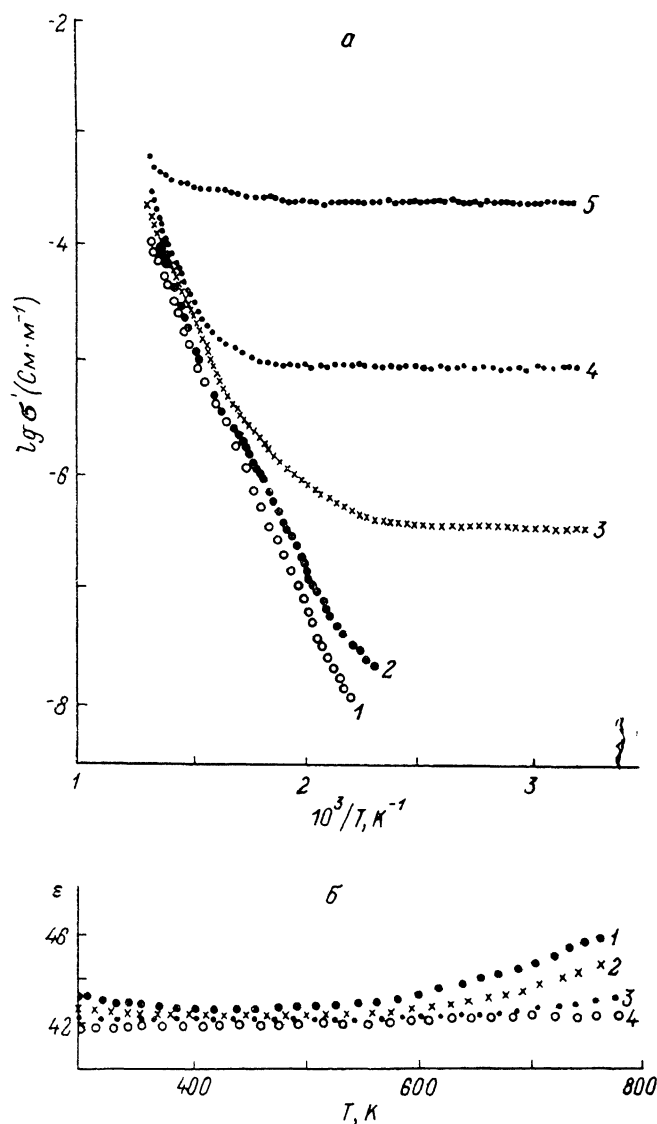


Рис. 2. Температурные зависимости σ' (а) и δ (б), измеренные для $f=10^3$ (1), 10^4 (2), (2), 10^5 (3), 10^6 (4), 10^7 Гц (5) (направление [100]).

зованным точечными дефектами (вакансиями, примесями). О существовании широкого спектра ловушек в $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ свидетельствуют данные измерения токов термостимулированной деполяризации [2].

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о прыжковом механизме проводимости в кристаллах $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ в переменных полях. С понижением частоты или повышением температуры длины цепочек, по которым происходят перескоки, возрастают, достигая межэлектродного расстояния, что обеспечивает проводимость на постоянном токе, описываемую теорией протекания [10]. Ряд исследователей допускают такую возможность, когда на постоянном токе может превалировать

зонная проводимость, а на переменном — прыжковая [3]. Однако в последнее время высказывается мнение [5], что электроперенос по локализованным состояниям, наблюдаемый в переменных полях, сохраняет доминирующее положение в постоянном.

ВАХ кристаллов $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$, как уже отмечалось в работе [2], могут быть объяснены наличием токов, ограниченных объемным зарядом.

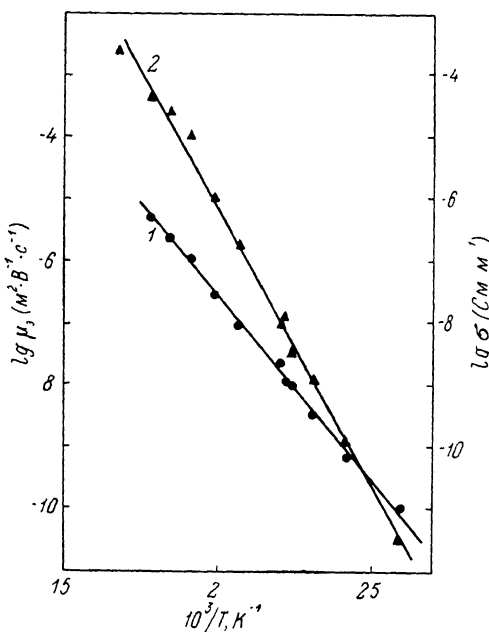


Рис. 3. Температурные зависимости проводимости σ (1) и эффективной подвижности μ_e (2).

ности (порядка $10^{-11} \text{ M}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при 370 К), ее экспоненциальная температурная зависимость характерны для прыжковой проводимости. Энергия активации μ_e , $E_\mu = 1.77 \text{ эВ}$. Соотношение $E_\mu > E_\sigma$, наблюдаемое, в частности, и в [6], может быть обусловлено влиянием дополнительного захвата инжектированных носителей на ловушки, как это осуществляется в зонной модели [11]; возможно также влияние процессов, обуславливающих временное возрастание тока, которое имеет место в кристаллах $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ в области нелинейной ВАХ.

Таким образом, наблюдаемые для $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ закономерности, характерные и для ряда других кристаллических оксидов, свидетельствуют в пользу существования прыжковой проводимости в этом материале.

Список литературы

- [1] Kostova E., Kostov M. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 12. P. 1726—1727.
- [2] Колесниченко К. А., Кудзин А. Ю., Столпакова Т. М., Акимов С. В., Коркин С. Ж. // УФЖ. 1988. Т. 33. № 12. С. 1824—1826.
- [3] Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. Т. 1. 368 с.
- [4] Bottger H., Bryksin V. V. // Phys. Stat. Sol. (b). 1982. V. 113. N 9. P. 9—49.
- [5] Dyré J. C. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 5. P. 24256—2468.
- [6] Авраменко В. П., Клименко Л. П., Кудзин А. Ю., Соколянский Г. Х. // ФТТ. 1977. Т. 12. № 4. С. 1201—1204.
- [7] Moore E. J. // J. Phys. C: Sol. Stat. Phys. 1974. V. 7. N 10. P. 1840—1853.
- [8] Pollak M. // Phys. Rev. 1965. V. 138. N 6A. P. 1822—1826.
- [9] Пелих Л. Н., Гуркаас А. А. // ФТТ. 1970. Т. 21. № 1. С. 218—219.
- [10] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
- [11] Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.