

Магнитосопротивление композиционных углеродных сенсоров в сильных электрических полях в диапазоне температур жидкого гелия

В.В. Вайнберг, А.С. Пилипчук, В.Н. Порошин

Институт физики Национальной академии наук Украины, г. Киев, 03680, Украина

E-mail: pylypchuk@iop.kiev.ua

Ю.П. Филиппов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980, Россия

Статья поступила в редакцию 29 июня 2016 г., опубликована онлайн 24 января 2017 г.

Исследовано влияние разогрева носителей тока импульсным электрическим полем на проводимость и магнитосопротивление композиционных углеродных резисторов (марки ТВО) в диапазоне температур жидкого гелия. Установлено, что разогрев носителей в полях до 60 В/см при $T = 4,2$ К приводит к уменьшению магнитосопротивления примерно в 4 раза при сохранении достаточно высокой температурной зависимости сопротивления. В полях более 400 В/см в диапазоне 4–20 К сопротивление ТВО резистора перестает зависеть от температуры. Результаты объясняются в рамках модели прыжковой проводимости между хаотично сгруппированными углеродными нанозернами. Показана возможность уменьшения погрешности в измерении температуры ТВО резисторами в магнитном поле.

Досліджено вплив розігріву носіїв струму імпульсним електричним полем на провідність і магнітоопір композиційних вуглецевих резисторів (марки ТВО) у діапазоні температур рідкого гелію. Встановлено, що розігрів носіїв у полях до 60 В/см при $T = 4,2$ К призводить до зменшення магнітоопору приблизно в 4 рази при збереженні досить високої температурної залежності опору. У полях понад 400 В/см у діапазоні 4–20 К опір ТВО резистора перестає залежати від температури. Результати пояснюються в рамках моделі стрибкової провідності між хаотично згрупованими вуглецевими нанозернами. Показана можливість зменшення похибки вимірювання температури ТВО резисторами в магнітному полі.

PACS: 72.15.Gd Гальваномагнитные и другие эффекты в магнитном поле;

72.20.Ee Край подвижности, прыжковая проводимость;

72.20.Ht Сильное электрическое поле и нелинейные эффекты.

Ключевые слова: магнитотранспорт, низкие температуры, сильные электрические поля, сенсор температуры, прыжковая проводимость.

Введение

Углеродные композиционные резисторы ТВО хорошо зарекомендовали себя в качестве сенсоров температуры в диапазоне от 425 до 0,1 К с малым магнитосопротивлением в магнитных полях до 15 Тл [1–9]. Токопроводящая область резистора образована углеродным композитным материалом в виде углеродных наночастиц размером 5–20 нм, находящихся в матрице из микророзернистого корунда (оксида алюминия) и связующего компонента (борно-силикатного стекла) [1,2,8]. Массо-

вое соотношение этих компонент составляет 4/90/6. Для использования в широком диапазоне низких температур наиболее подходящими для криогенной термометрии являются резисторы с сопротивлением порядка 1000 Ом при 300 К. Важно то, что резисторы ТВО стабильные и механически прочные, их параметры слабо изменяются при термоциклировании от 425 до 4,2 К и при воздействии ионизирующего излучения [1,2,4,5,10].

Магнитосопротивление ТВО резисторов при фиксированных температурах было ранее исследовано при 4,2 К и ниже 0,3 К при малых напряжениях на резисто-

ре, т.е. в отсутствие разогрева носителей тока электрическим полем [5,7]. Было установлено, что при $T < 0,3$ К в области магнитных полей $B \leq 5$ Тл магнитосопротивление отрицательно, а при больших магнитных полях положительно и почти линейно нарастает с магнитным полем [5]. При $T = 4,2$ К магнитосопротивление положительно в широкой области магнитных полей от 0 до 15 Тл. Однако его зависимость от магнитного поля с ростом поля изменяется. В полях $B \leq 5$ Тл сопротивление растёт приблизительно квадратично с ростом поля ($\sim B^2$), а в больших полях — линейно ($\sim B$). Максимальная величина магнитосопротивления резисторов при $B = 15$ Тл достигает 8–10% [7]. Отрицательное магнитосопротивление, которое наблюдалось при сверхнизких температурах, было объяснено в рамках модели прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка электронов и с учетом кулоновской щели в плотности электронных состояний в окрестности уровня Ферми [5].

Цель настоящей работы — исследование влияния на магнитосопротивление резисторов ТВО при 4,2 К разогрева носителей тока в них импульсным электрическим полем. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разогрев носителей заряда импульсным электрическим полем приводит к значительному уменьшению магнитосопротивления. Рассмотрено также влияние разогрева носителей тока импульсным электрическим полем на ошибку измерения температуры с помощью ТВО резисторов.

Детали эксперимента

Исследованы композиционные углеродные резисторы марки ТВО-0,125 Вт с $R_{300\text{ К}} = 1000$ Ом. Длина токопроводящей области резистора в направлении тока $L = 0,8$ см, ширина и толщина составляют 0,25 и 0,15 см соответственно. На образец подавалось импульсное электрическое напряжение U прямоугольной формы длительностью 1–2 мкс, амплитудой от 0 до 1000 В. Частота следования импульсов 1 Гц. Это позволило разогревать только носители тока без заметного разогрева тела резистора. Осциллограммы импульсов напряжения и тока через образец измерялись цифровым осциллографом PCS500 (Velleman Instruments) с дискретностью выборки в течение импульса 20 нс. Величина магнитного поля контролировалась холловским датчиком РНЕ602817А.

Исследование магнитосопротивления проводилось при 4,2 К в диапазоне магнитных полей 0–4,5 Тл в криостате со сверхпроводящим соленоидом. Измерения проведены в диапазоне приложенных напряжений 0–50 В с длительностью импульса 2 мкс. При большем напряжении величина магнитосопротивления становится меньше достижимой погрешности измерения в импульсном режиме. Умеренный разогрев в этом диапазоне напряжений позволил работать с длинными импульсами (2 мкс).

В отсутствие магнитного поля измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) при фиксированных температурах в области 4,2–20 К в диапазоне напряжений 0–1000 В; температурные зависимости сопротивления в импульсном режиме при фиксированных значениях напряжения в диапазоне 0–50 В и в режиме постоянного тока ($I = 100$ мкА). Длительность импульсов при измерениях до 1000 В была сокращена до 1 мкс. Ток и напряжение в режиме постоянного тока измерялись мультиметром Keithley2000. Рабочая температура в гелиевом криостате стабилизировалась с помощью системы УТРЕКС с точностью не хуже 0,1 К.

Выходные сигналы с осциллографа и мультиметра, включая сигналы датчиков магнитного поля и температуры, подавались на компьютер для обработки в процессе измерений.

Результаты и обсуждение

На рис. 1(а) показаны зависимости сопротивления резисторов R от напряженности магнитного поля B для различных величин приложенного электрического поля $E = U/L$. Полученные из этих данных зависимости относительного изменения сопротивления $\Delta R/R_0$ (R_0 — сопротивление в отсутствие магнитного поля) от магнитного поля представлены на рис. 1(б). Видно, что магнитосопротивление во всем диапазоне полей мало и положительно. Отметим, что зависимость $\Delta R/R_0$ от B близка к наблюдавшейся ранее для данных резисторов ТВО в режиме постоянного тока квадратичной зависимости ($\Delta R/R_0 \sim B^2$) в таком же диапазоне магнитных полей [7]. Также видно, что $\Delta R/R_0$ уменьшается с увеличением электрического поля, и это уменьшение слабо зависит от магнитного поля. Например, при $B = 4,5$ Тл величина $\Delta R/R_0$ уменьшается в 4,2 раза при увеличении E от 16 до 63 В/см, при $B = 2$ Тл уменьшение составляет 3,8 раз.

Наблюдаемая зависимость магнитосопротивления от приложенного электрического поля обусловлена, по нашему мнению, разогревом только носителей тока в проводящей области резистора импульсным электрическим полем. Об этом свидетельствует изменение вольт-амперных характеристик образца, измеренных в отсутствие магнитного поля при нескольких фиксированных температурах в интервале 4,2–20 К. Характеристики показаны на рис. 2 в виде зависимостей сопротивления от электрического поля $R(E)$.

Видно, что с ростом поля сопротивление уменьшается при всех температурах. Резкое уменьшение начинается с некоторого поля, величина которого зависит от температуры. При 4,2 К оно начинается уже в малых полях, в то время как при более высоких температурах заметное уменьшение R наблюдается лишь при значительно больших E . В сильных электрических полях ($E > 400$ В/см) зависимости сопротивления от E

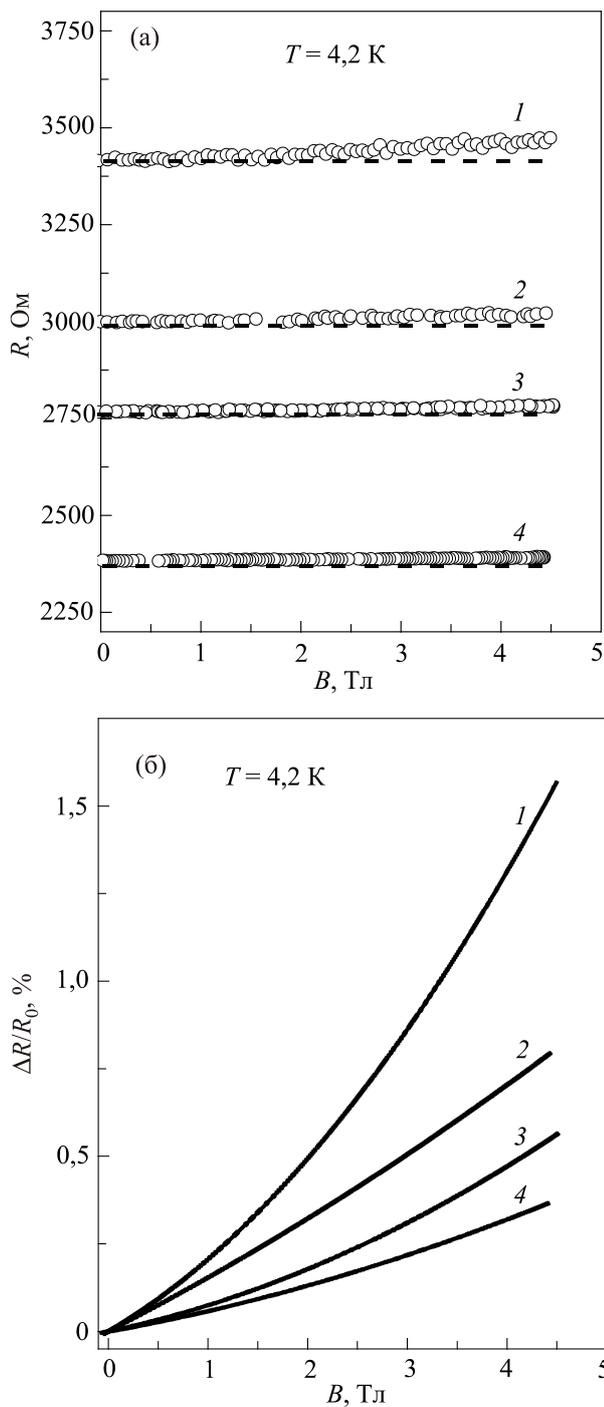


Рис. 1. Зависимости полного сопротивления резистора R (а) и его относительного изменения $\Delta R/R_0$ (б) от магнитного поля при разных значениях электрического поля E , В/см: 16,3 (1); 22,5 (2); 35 (3); 62,5 (4). $T = 4,2$ К.

при разных рабочих температурах совпадают, а общая зависимость $R(E)$ близка к $R \sim 1/E^{0,2}$. Таким образом, при $E > 400$ В/см разогрев носителей полем очевидно приводит к энергетическому перераспределению носителей тока, соответствующему $T > 20$ К.

Зависимости сопротивления резисторов ТВО от температуры в области 4,2–50 К при нескольких фик-

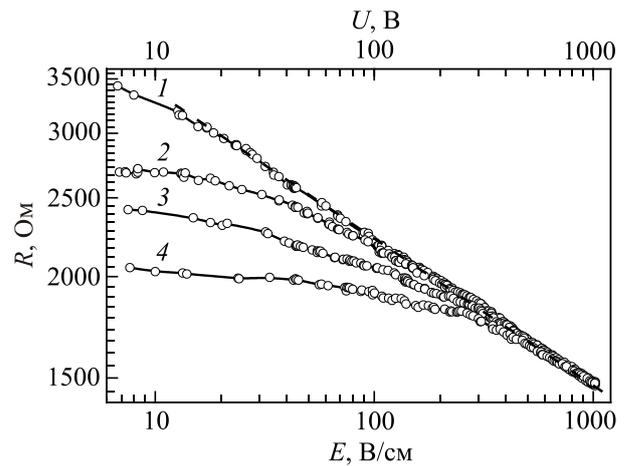


Рис. 2. Зависимости сопротивления резистора от напряженности электрического поля при температурах T , К: 4,2 (1); 10 (2); 15 (3) и 20 (4). $B = 0$.

сированных значениях электрического поля представлены на рис. 3(а). Анализ зависимости для малой величины поля (кривая 1) показал, что она хорошо описывается выражением $R \sim \exp(1/T^{1/2})$. Как известно [12], такая зависимость характерна для двух видов прыжковой проводимости: проводимости с переменной длиной прыжка в одномерном случае и проводимости в области «мягкой» кулоновской щели в окрестности уровня Ферми. Учитывая размеры токопроводящей области и распределение в ней углеродных нанозерен, предположение об одномерном случае выглядит невозможным. Вклад кулоновской щели в механизм проводимости и магнитосопротивления наблюдался для данных образцов в диапазоне сверхнизких температур ($T < 1$ К) [5].

Однако и прыжковая проводимость, и кулоновская щель в плотности состояний остаются наиболее распространенными аргументами для объяснения как температурной зависимости сопротивления, так и магнитосопротивления. Например, в работе [13] исследовано магнитосопротивление в таких близких объектах, как нанокуглеродные материалы (НУМ). Образцы НУМ состоят из жгутов нанотрубок (5 %) и неупорядоченной углеродной фазы (95 %) углеродных частиц размером от 12 до 85 нм. Такие частицы в среднем крупнее, чем в ТВО резисторе, кроме этого, различие заключается в том, что они не расположены в диэлектрической матрице. Согласно [13], магнитосопротивление в образцах НУМ определяется сжатием волновых функций в магнитном поле и спин-поляризационным механизмом при участии в проводимости электронных состояний двукратно заряженных примесей. Однако прыжковая проводимость в этих образцах подчиняется закону Мотта, $R \sim \exp(1/T^{1/4})$, чем отличается от нашего случая. Вопрос проявления спин-поляризационного механизма в рассматриваемых материалах также требует, на наш взгляд, дополнительной проработки.

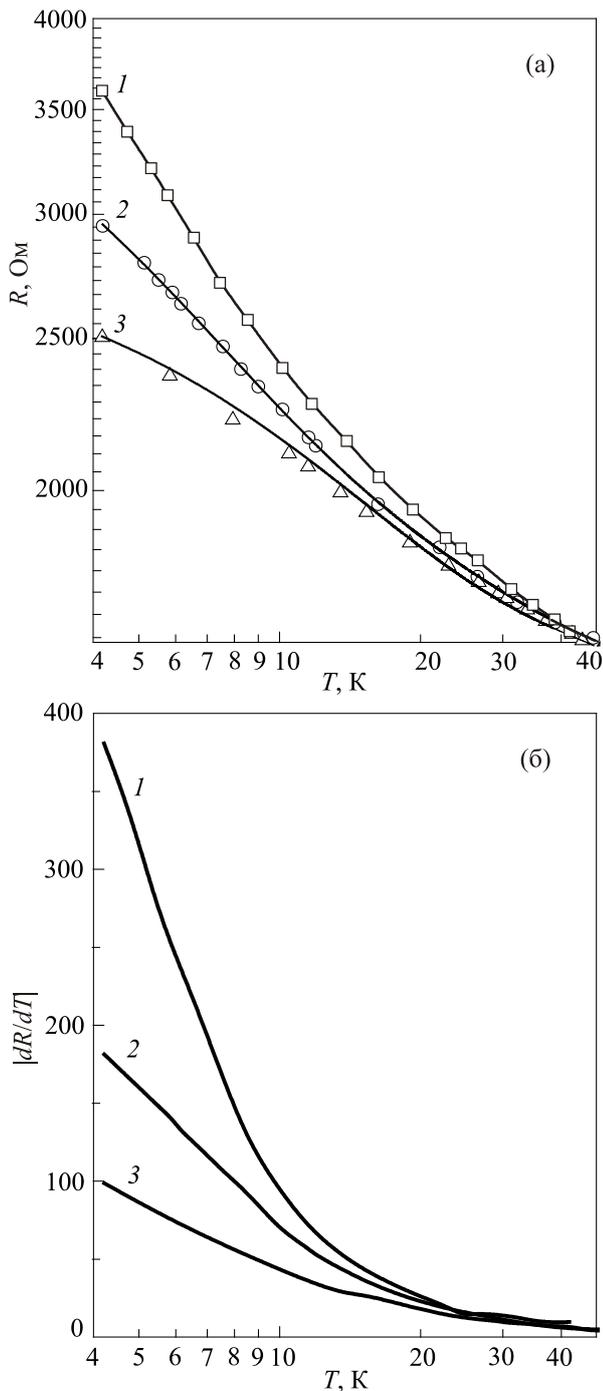


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления (а) и термочувствительности (б) ТВО резистора при разных значениях приложенного электрического поля E , В/см: 1 (1), 25 (2), 63 (3).

В работе [14] в диапазоне температур жидкого гелия для активированных углеродных волокон наблюдались температурная зависимость сопротивления вида $R \sim \exp(1/T^{1/2})$ и положительное магнитосопротивление, которое уменьшалось по величине с ростом температуры при фиксированном магнитном поле. Результаты объяснены в рамках модели прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка с кулонов-

ской щелью в плотности электронных состояний в окрестности уровня Ферми.

Мы полагаем, что в нашем случае проводимость имеет иной характер. В то время как при $T < 1$ К наблюдалась прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка и проявлением кулоновской щели в плотности состояний [5], в диапазоне температур жидкого гелия ($T > 1$ К) она осуществляется комбинировано, как по протяженным электронным состояниям выше порога подвижности, так и путем туннелирования под барьерами, разделяющими области этих состояний. Такая модель была предложена в [11] для сильно легированных и компенсированных полупроводников. Неоднородное пространственное распределение частичек углерода с разным размером, образующих проводящие области в изолирующей матрице, аналогично модели иерархического распределения таких областей в [11]. Проводимость в этой модели ограничивается критическими звеньями, в которых носители туннелируют под барьерами. С повышением температуры носители заполняют более высокие энергетические уровни, на которых длина таких звеньев уменьшается, результатом чего является температурная зависимость $R \sim \exp(1/T^{5/11})$ [11], что очень близко к $R \sim \exp(1/T^{1/2})$. При этом должно наблюдаться положительное магнитосопротивление, которое обусловлено уменьшением перекрытия огибающих волновых функций носителей за пределами проводящих областей. В случае прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка магнитосопротивление уменьшается с ростом температуры вследствие уменьшения «эффективной» длины прыжка. По-видимому, можно предположить, что аналогичный механизм работает и в нашем случае.

В заключение рассмотрим возможность применения полученных результатов для криогенной термометрии в магнитном поле. При малых величинах приложенного к резистору электрического напряжения, когда практически отсутствует разогрев носителей тока, термочувствительность (dR/dT) исследованных резисторов ТВО составляет ~ 400 Ом/К при температуре 4,2 К и уменьшается до ~ 10 Ом/К при повышении температуры до 50 К (рис. 3(б)). Увеличение напряжения, приводящее к разогреву носителей тока электрическим полем, вызывает уменьшение термочувствительности резистора. Например, при температуре 4,2 К при увеличении приложенного напряжения от 1 до 63 В dR/dT уменьшается почти в три раза, в то время как при температуре $T \geq 20$ К уменьшение dR/dT составляет всего несколько процентов.

При использовании резисторов ТВО для измерения температуры в магнитных полях повышение приложенного напряжения обеспечивает уменьшение не только величины магнитосопротивления, но и погрешности в определении температуры. Так, для магнитного поля $B = 4,5$ Тл для напряжения $U = 1$ В ($E = 1,25$ В/см) по-

грешность измерения составляет $\Delta T = 0,15$ К при $T = 4,2$ К, а для $U = 50$ В ($E = 63$ В/см) она равна $0,113$ К, т.е. уменьшение составляет $\sim 25\%$.

Выводы

Разогрев носителей тока импульсным электрическим полем в проводящей области композиционных углеродных резисторов в диапазоне низких температур приводит к изменению их энергетического распределения, в результате чего в несколько раз уменьшается магнитосопротивление углеродных резисторов. В диапазоне электрических полей до 60 В/см магнитосопротивление уменьшается примерно в 4 раза. При этом температурная зависимость сопротивления уменьшается слабо, в результате чего уменьшение магнитосопротивления позволяет уменьшить погрешность измерения температуры в магнитном поле с помощью резисторов ТВО. При $E > 400$ В/см и $T = 4,2$ К разогрев импульсным электрическим полем эквивалентен подъему температуры примерно до 20 К. Результаты объясняются в рамках модели прыжковой проводимости между проводящими областями, образованными хаотично сгруппированными углеродными нанозернами.

Авторы выражают благодарность профессору О.Г. Сарбею за обсуждение результатов.

1. М.П. Орлова, О.Ф. Погорелова, С.А. Улыбин, Низкотемпературная термометрия, Энергоатомиздат, Москва (1987), с. 144.
2. V.I. Datskov and J.G. Weisand, *Cryogenics, ICEC Suppl.* **34**, 425 (1994).
3. Y.A. Dedikov and Y.P. Filippov, *Characteristics of Russian Cryogenic Temperature Sensors*, In: *Proc. 18th Inter. Cryogenic Engineering Conference*, Mumbai, India (2000), p. 627.
4. Y.P. Filippov and T.I. Smirnova, *Cryogenics* **44**, 735 (2004).
5. Y.P. Filippov, G.G. Ihas, and V.V. Vainberg, *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 094902 (2009).
6. Y.P. Filippov and V.I. Shabratov, *Cryogenics* **42**, 127 (2002).
7. M. Suesser and F. Wuechner, *Cryogenics* **40**, 235 (2000).
8. Y.P. Filippov, *Cryogenics* **50**, 243 (2010).
9. M. Suesser and F. Wuechner, *Cryogenics* **41**, 213 (2001).
10. Y.P. Filippov, V.M. Miklayev, and A.K. Sukhanova, *Rev. Sci. Instrum.* **78** (4), 043502 (2007).
11. Б.И. Шкловский, *ФТП* **7**, 112 (1973).
12. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос, *Электронные свойства легированных полупроводников*, Наука, Москва (1979).
13. Т.А. Лень, Л.Ю. Мацуй, И.В. Овсиенко, Ю.И. Прилуцкий, В.В. Андриевский, И.Б. Беркутов, Г.Е. Гречнев, Ю.А. Колесниченко, *ФНТ* **37**, 1027 (2011) [*Low Temp. Phys.* **37**, 819 (2011)].
14. A.W.P. Fung, Z.H. Wang, M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R.W. Pekala, and M. Endo, *Phys. Rev. B* **49** 17325 (1994).

Magnetoresistance of composite carbon sensors in strong electric fields in the liquid helium temperature range

V.V. Vainberg, A.S. Pylypchuk, V.N. Poroshin, and Y.P. Filippov

The effect of heating carriers by pulsed electric field on the conductivity and magnetoresistance of the carbon composite TVO resistors in the temperature range of liquid helium was investigated. It is found that heating of carriers in the fields up to 60 V/cm at $T = 4.2$ K leads to a decrease in magnetoresistance approximately by 4 times, while keeping a sufficiently high temperature dependence of resistance. At the fields above 400 V/cm in the range of $4-20$ K the resistance of the TVO resistor becomes independent of temperature. The results are explained by the model of hopping conduction among randomly grouped carbon nanograins. The possibility to reduce an error in measurement of temperature by the TVO resistors in magnetic field is shown.

PACS: 72.15.Gd Galvanomagnetic and other magnetotransport effects;
72.20.Ee Mobility edges; hopping transport;
72.20.Ht High-field and nonlinear effects.

Keywords: magnetoresistance, low temperatures, strong electric fields, temperature sensor, hopping transport.