

УДК 548.35;530.145

О ПОДВИЖНОСТИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ДВУМЕРНЫХ КВАНТОВЫХ КРИСТАЛЛАХ

Г. А. ВАРДАНЯН

Ереванский государственный университет

В. В. РЖЕВСКИЙ

Московский государственный университет

А. С. СААКЯН

Ереванский политехнический институт

(Поступила в редакцию 6 декабря 1985 г.)

Теория рассеяния вакансиона на дефектоне, построенная на основе уравнения Лифшица, применена к исследованию вакансионной подвижности положительных ионов в сильных электрических полях в двумерных квантовых кристаллах. Рассмотрены случаи термоактивированных вакансий, а при низких температурах — ферми-вакансий с фиксированной концентрацией.

1. Наличие в квантовых кристаллах делокализованных вакансий — вакансионных [1] — обуславливает существование в них весьма своеобразного канала диффузии, механизмом которого является неупругое рассеяние вакансиона на дефектоне (вакансионная диффузия) [2, 3]. Индуцируемая вакансионными диффузия определяется вероятностью неупругого рассеяния, а коэффициент диффузии (КД) $D \sim a^2\nu$, где a — постоянная решетки, ν — частота актов неупругого рассеяния, причем $\nu \sim N_v v \sigma$, N_v — число вакансий в единице объема, v — их скорость, σ — сечение неупругого процесса. Тот факт, что КД прямо пропорционален плотности вакансий, говорит о том, что с экспериментальной точки зрения наиболее перспективными объектами для исследования вакансионной подвижности дефектонов являются двумерные (2Д) квантовые кристаллы, образующиеся при адсорбции изотопов гелия на графитовой подложке. Как показывают измерения, концентрация вакансий в них очень высока — $10^{-2} < x < 0,48$ [4].

Одним из наиболее удобных экспериментальных методов исследования вакансионного механизма подвижности дефектонов является изучение переноса положительных ионов в сильных электрических полях. Последние могут контролируемым образом вводиться в квантовый кристалл. В массивных квантовых кристаллах эти измерения проводились группой Шальникова [5], а теоретическое рассмотрение проведено Андреевым и Мейеровичем [6].

В настоящей работе исследуется температурная и концентрационная зависимости вакансионной подвижности положительных ионов в двумер-

ных квантовых кристаллах. Следует отметить, что в зависимости от режима адсорбции вакансии в 2Д-квантовых кристаллах могут быть либо термоактивированными, либо их число может быть фиксированным. В последнем случае при понижении температуры происходит вырождение газа ферми-вакансионных, в то время как при их термической активации этот газ является бoльцмановским. Как будет показано ниже, это обстоятельство существенно влияет на температурную зависимость подвижности.

2. В дальнейшем будет рассмотрена область низких температур $T \ll \Delta_v$, где Δ_v — ширина вакансионной энергетической зоны. В этой температурной области возбуждены низколежащие вакансионные состояния, так что спектр вакансионных квадратичен:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta_v (ak)^2, \quad \varepsilon \geq \varepsilon_0,$$

ε_0 — энергия рождения вакансий.

Тогда амплитуда неупругого рассеяния вакансии на ионе (дефектоне) приобретает следующий вид:

$$f(\varepsilon) = e^{-i\pi/4} \frac{\sqrt{a} \Delta_v^{1/4}}{4 (2\pi)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_0}} \ln \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{t}, \quad (1)$$

а сечение рассеяния —

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{a \Delta_v^{1/2}}{(8\pi)^2 \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_0}} \ln^2 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{t}, \quad (2)$$

где t — энергетическая вероятность вакансион-дефектного обмена.

Логарифм, фигурирующий как в амплитуде, так и в сечении рассеяния, описывает степень перекрытия волновых функций ближайших соседей — вакансии и положительного иона. Для ультраквантовых вакансионных ($\varepsilon \geq \varepsilon_0$) это перекрытие очень велико, что приводит к сильному росту сечения рассеяния.

3. Скорость дрейфа иона рассчитаем по известной формуле [2, 3]

$$u = \sum_a a \int \frac{d^2 k}{(2\pi)^2} \sigma(k) v(k) [n(\varepsilon) - n(\varepsilon + Fa)], \quad (3)$$

где $v(k) = \hbar^{-1} \nabla \varepsilon(k)$ — скорость вакансии, $n(\varepsilon)$ — равновесная функция распределения вакансионных, $F = eE$ — сила, действующая на ион со стороны электрического поля. Суммирование ведется по тем из ближайших соседей a , для которых $Ea > 0$, а смещения ионов на векторы a учтены в (3) как обратные процессы.

Рассмотрим сначала случай термически-активированных вакансий. Тогда

$$n(\varepsilon) - n(\varepsilon + Fa) = e^{-\varepsilon/T} [1 - e^{-\varepsilon Ea/T}], \quad (4)$$

$$u = \sum_a a [1 - e^{-\varepsilon Ea/T}] \int \frac{d^2 k}{(2\pi)^2} \sigma(k) v(k) e^{-\varepsilon(k)/T}.$$

Подставляя (2) в (4) и интегрируя по k , получим

$$u = \frac{1}{2^3 \pi \hbar} T e^{-\epsilon_0/T} \ln^2 \frac{T}{t} \sum_a a [1 - e^{-\epsilon E a/T}]. \quad (5)$$

В сильных полях $\epsilon E a \gg T$ практически при всех направлениях поля дрейфовая скорость достигает насыщения и не зависит от поля:

$$u = \frac{1}{2^3 \pi \hbar} T e^{-\epsilon_0/T} \ln^2 \frac{T}{t} \sum_a a. \quad (6)$$

Здесь, как и в трехмерном случае, возникает своеобразная ситуация, когда направление электрического поля меняется; при этом направление скорости меняется почти скачкообразно, когда вектор $\mathbf{E}$ проходит через плоскость, перпендикулярную одному из векторов $\mathbf{a}$. Угловая ширина этой переходной области — порядка $T/\epsilon E a \ll 1$, где скорость меняется как по направлению, так и по величине [2].

В случае слабых полей $\epsilon E a \ll T$ дрейфовая скорость пропорциональна напряженности поля. Разлагая в ряд экспоненту в выражении (5), получим

$$u_i = \sum_k e^{\mu_{ik}} E_k,$$

где μ_{ik} — тензор подвижности [7],

$$\mu_{ik} = \frac{a^2}{8\pi \hbar} e^{-\epsilon_0/T} \ln^2 \frac{T}{t} \delta_{ik}. \quad (7)$$

Как было отмечено выше, в квантовых кристаллах, в частности двумерных, может реализоваться ситуация с фиксированной концентрацией вакансий. Тогда при понижении температуры вакансионный газ становится сильно вырожденным. Это обстоятельство существенно влияет на температурную зависимость дрейфовой скорости ионов.

В области достаточно сильных полей, как и в случае термоактивированных вакансий, дрейфовая скорость достигает насыщения и не зависит от напряженности электрического поля:

$$u = \frac{\mu}{2(2\pi)^3 \hbar} \sum_a a \left\{ A + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{T}{\mu} \right)^2 \ln \frac{\mu}{t} \right\}, \quad (8)$$

где μ — химический потенциал вакансионной подсистемы,

$$\mu = 4\pi \Delta_v x, \quad A = (\ln \mu/t - 1)^2 + 1, \quad \Delta_v = tz,$$

z — число ближайших соседей в 2D-решетке; для гексагональной плоской решетки $z = 3$.

Для выяснения концентрационной зависимости дрейфовой скорости достаточно в выражении (8) оставить первый член; тогда

$$u = \frac{a \Delta_v}{(2\pi)^3 \hbar} x [(\ln 12\pi x - 1)^2 + 1] \sum_a a. \quad (9)$$

Из (9) следует, что дрейфовая скорость u обладает минимумом при $x_c = 0,02$ ($x_c^{\text{эл}} = 0,98$). Как известно из ЯМР-измерений, при этом значении плотности покрытия завершается образование монослоя, чем и объясняется появление этого минимума [4]. Концентрационная область

существования 2Д-квантового кристалла — $x > x_c$, так что в упорядоченной фазе $\ln 12 \pi x > 1$ и достигает минимума на ее границе. С другой стороны, логарифмический фактор возникает из-за энергетической зависимости вакансион-дефектного обмена, так что на границе вышеуказанной области этот обмен достигает минимума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. Ф., Лифшиц И. М. ЖЭТФ, 56, 2057 (1969).
2. Андреев А. Ф. УФН, 118, 251 (1976).
3. Пирадашвили Н. Н. ЖЭТФ, 84, 124 (1983).
4. Richards M. G. et al. Phys. Rev. Lett., 34, 1545 (1975).
5. Шальников А. И. ЖЭТФ, 47, 1727 (1964).
6. Андреев А. Ф., Мейсерович А. Э. ЖЭТФ, 67, 1559 (1975).

ԴՐԱԿԱՆ ԻՈՆՆԵՐԻ ՇԱՐԺՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՐԿՉԱՓ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ

Գ. Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Վ. Վ. ՌԺԵՎՍԿԻ, Ա. Ս. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Վականսիոն-դեֆեկտոն ջրման տեսությունը, կառուցված Ի. Մ. Լիֆշիցի հավասարման հիման վրա, օգտագործված է ուժեղ էլեկտրական դաշտերում դոնորային երկչափ բվանտային բյուրեղներում դրական իոնների շարժունակության հետազոտման համար: Դիտարկված են թերմոակտիվացիոն վականսիաների, իսկ ջածր ջերմաստիճաններում՝ ֆիկսած կոնցենտրացիայով Ֆերմի-վականսիաների դեպքերը:

ON THE MOBILITY OF POSITIVE IONS IN TWO-DIMENSIONAL QUANTUM CRYSTALS

G. A. VARDANYAN, V. V. RZHEVSKIY, A. S. SAHAKYAN

The theory of vacancy scattering on the defectone constructed on the basis of the Lifshitz equation, was used for the study of vacancy mobility of positive ions in strong electrical fields in two-dimensional quantum crystals. The cases of thermoactivated vacancies and of Fermi-vacancies with fixed concentrations at low temperatures were considered.