

О ВЛИЯНИИ ЦЕНТРОВ ЗАХВАТА НА АКУСТОЭЛЕКТРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ФОТОПРОВОДЯЩЕМ СУЛЬФИДЕ КАДМИЯ

Миргородский В. И., Пешин С. В.

Теоретически рассмотрено акустоэлектронное взаимодействие в пьезополупроводниках со свободными носителями заряда, возбуждаемыми оптической подсветкой. На основе анализа кинетики фотопроводимости в высокофоточувствительных кристаллах сульфида кадмия с параметрами, обычно используемыми для акустоэлектронных экспериментальных исследований, показано, что влияние центров захвата на акустоэлектронное взаимодействие из-за их инерционности практически исключено.

Уже в первых экспериментах по исследованию акустоэлектронного взаимодействия в сульфиде кадмия, электропроводность которого задавалась внешней подсветкой, обнаружилось несоответствие между результатами экспериментов [1] и выводами теории [2, 3], заключающееся в основном в заметно меньшем, чем предсказывала теория, наблюдаемом значении акустоэлектронного усиления.

Для объяснения рассогласования был выдвинут ряд гипотез [1, 4], основные из которых состоят в учете влияния на акустоэлектронное взаимодействие центров захвата носителей заряда и неоднородностей кристаллов. В ряде работ, выполненных позже, проводился анализ влияния на акустоэлектронное взаимодействие как неоднородностей [5, 6], так и центров захвата [7, 8]. При этом, согласно одним работам, для объяснения наблюдаемых аномалий достаточно было учесть лишь центры захвата [7, 8], а согласно другим, — неоднородности [5, 6, 9, 10]. В частности, в работе [11], посвященной этому вопросу, было показано, что при специальной постановке эксперимента, направленной на минимизацию влияния неоднородностей кристаллов, удается получить довольно близкое соответствие результатов эксперимента выводам теории, не учитывающей уровней захвата. На этом основании сделано заключение об определяющем вкладе неоднородностей кристаллов в обычно наблюдаемые рассогласования с теорией.

Работа [11] и послужила основанием для постановки данного исследования, целью которого являлся теоретический анализ влияния центров захвата носителей заряда на результаты экспериментов по исследованию акустоэлектронного взаимодействия в кристаллах сульфида кадмия при фотовозбуждении свободных носителей заряда.

Анализ проводился по стандартной системе уравнений, описывающей акустоэлектронное взаимодействие. При этом были сделаны следующие приближения:

— в уравнении для тока опущены члены, описывающие диффузию, — это обычное приближение при работе на относительно низких частотах ультразвука;

— рассматривается линейное акустоэлектронное взаимодействие, поэтому в уравнении оставлены только члены, линейные по малым возмущениям электронной концентрации, связанным с пьезополем акустической волны;

— хотя анализируется ситуация биполярного фотовозбуждения носителей заряда, члены, описывающие свободные дырки, опущены, так как в сульфиде

кадмия подвижность электронов значительно (почти на порядок [12]) превосходит подвижность дырок, поэтому, как показано в [13], величина амплитуды группировки электронов почти на порядок больше аналогичной величины для дырок. Такое приближение также является обычным при описании акустоэлектронного взаимодействия в сульфиде кадмия.

В результате была получена следующая система уравнений [2, 3]:

$$\vec{j} = e\nu(n_0\vec{E} + \tilde{n}_e E_0), \quad (1)$$

$$\tilde{n} = \tilde{n}_e + \tilde{n}_i, \quad (2)$$

$$\partial\tilde{n}_i/\partial t = [\partial R_n/\partial n_e]_0 \tilde{n}_e + [\partial R_n/\partial n_i]_0 \tilde{n}_i, \quad (3)$$

$$-e\partial\tilde{n}/\partial t + \partial\vec{j}/\partial x = 0, \quad (4)$$

$$\partial\tilde{D}/\partial x = -4\pi e\tilde{n}, \quad (5)$$

$$\tilde{D} = \varepsilon\vec{E} - 4\pi\beta u, \quad (6)$$

$$\tilde{S} = \Delta u + \beta\vec{E}, \quad (7)$$

$$\rho\partial^2 u/\partial t^2 = \partial^2\tilde{S}/\partial x^2, \quad (8)$$

где обозначения общеприняты [14]; R_n — суммарный темп захвата электронов на центры захвата (ловушки) с учетом реэмиссии; n_0 — средняя концентрация электронов, генерируемых фотовозбуждающей подсветкой; n_0 описывается стандартным уравнением

$$\partial n_0/\partial t = g - R_n, \quad (9)$$

где g — скорость генерации светом носителей заряда.

Для небольших отклонений электронной концентрации \tilde{n}_e от среднего значения n_0 уравнение (9) будет иметь вид

$$\partial\tilde{n}_e/\partial t = -[\partial R_n/\partial n_e]_0 \tilde{n}_e - [\partial R_n/\partial n_i]_0 \tilde{n}_i. \quad (10)$$

Производные $[\partial R_n/\partial n_e]_0$ и $[\partial R_n/\partial n_i]_0$ являются ни чем иным, как обратными временами, определяющими релаксацию n_e и n_i , поэтому обозначим их следующим образом:

$$\partial R_n/\partial n_e = 1/\tau_n, \quad \partial R_n/\partial n_i = -1/\tau_i.$$

Сравнение уравнений (3) и (10) показывает идентичность их правых частей, что и неудивительно, так как захват уменьшает число носителей заряда в зоне проводимости на ту же величину, на которую увеличивает заполнение ловушек, откуда следует, что временные параметры фотопроводимости и заполнения ловушечных центров одинаковы. Это позволяет, определив из наблюдений кинетики фотопроводимости параметры R_n , использовать их для оценки вклада уровней захвата в акустоэлектронное взаимодействие. Считая \tilde{n}_e и \tilde{n}_i величинами, изменяющимися по синусоидальному закону, можно решить уравнение (3). В результате получим

$$\tilde{n}_i(\omega) = \tilde{n}_e(\omega)/(i\omega\tau_n + \tau_n/\tau_i), \quad (11)$$

где ω — круговая частота звука. Выражение (11) определяет величину переменной концентрации носителей заряда на ловушках при малых изменениях концентрации в зоне проводимости $\tilde{n}_e(\omega)$.

Для оценки возможных значений \tilde{n}_i воспользуемся данными наших экспериментов по регистрации кинетики фотопроводимости в сульфиде кадмия. Результаты экспериментов показывают, что в высокофоточувствительных кристаллах сульфида кадмия, обладающих низкой темновой проводимостью ($\leq 10^{-8}$ Ом $^{-1}\cdot$ см $^{-1}$), при возбуждении их подсветкой до проводимостей порядка 10^{-4} Ом $^{-1}\cdot$ см $^{-1}$ и последующем резком выключении подсветки наблюдается неэкспоненциальная релаксация проводимости, причем темновые значения могут достигаться через значительные промежутки времени, составляющие десятки минут. Однако на начальном этапе проводимость обычно уменьшается в e раз за время порядка или больше 10 мс. Это время близко к приведенному в работе [15] и его, по-видимому, можно принять в качестве оценки минимального значения времени релаксации фотопроводимости для монокристаллического

сульфида кадмия, обладающего достаточно высокой фоточувствительностью, чтобы при умеренном освещении его проводимость могла достигать значений $\sim 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, при которых обычно проводились акустоэлектронные исследования. Поскольку время релаксации фотопроводимости определяется процессами обмена носителями между зоной проводимости и уровнями захвата с характерными временами τ_n и τ_p , максимальное из этих времен, определяющее инерционность фотопроводимости, должно быть порядка наблюдаемого времени релаксации фотопроводимости, т. е. $\sim 10^{-2}$ с.

Таким образом, учитывая, что большинство акустоэлектронных исследований с применением фоточувствительного сульфида кадмия выполнялось на частотах звука $\omega \geq 10^8 \text{ с}^{-1}$, окончательно получаем, что величина амплитуды группировки электронов на ловушках в соответствии с выражением (14) примерно на 6 порядков меньше амплитуды группировки свободных носителей заряда, что, понятно, исключает какую-либо возможность влияния эффектов захвата свободных носителей на акустоэлектронные процессы.

В работе [7] сформулировано требование на время релаксации фотопроводимости, чтобы эффекты захвата сказывались на акустоэлектронном взаимодействии: это время должно быть $\sim 1/\omega$, т. е. 10^{-8} с. Однако при столь малом времени жизни нужна значительно большая, чем обычно используется, интенсивность оптической подсветки для создания необходимой для акустоэлектронного взаимодействия проводимости. Оценки показывают, что в этом случае интенсивность света должна быть $\sim 1 \text{ кВт/см}^2$, что практически трудно реализуемо.

Полученный результат позволяет оценить возможность пренебрежения эффектами, связанными с дырками, с новых позиций. В [16] аналитически показано, что в условиях, когда можно пренебречь эффектами диффузии и захвата, что выполняется при работе на не слишком высоких частотах ультразвука $\omega \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$ и при достаточно больших временах релаксации фотопроводимости $\tau \sim 10^{-2}$ с (что и реализуется практически), максимальные значения коэффициентов усиления и затухания в точности равны значениям, получаемым для монополярной проводимости. Если же предположить, что у дырок достаточно малое время жизни (скажем, $\sim 10^{-8}$ с), то связанные с ними эффекты будут малы, так как будет мало стационарное количество дырок.

Таким образом, приведенный анализ свидетельствует о том, что учет вклада дырок в рассматриваемые процессы не изменяет основного вывода: вклад эффектов захвата в акустоэлектронное взаимодействие в высокофоточувствительном сульфиде кадмия пренебрежимо мал.

В заключение авторы выражают признательность В. А. Сабликову за полезные замечания.

Список литературы

- [1] Hutson A. R., McFee J. H., White D. L. // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 7. N 7. P. 237—240.
- [2] Hutson A. R., White D. L. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. N 1. P. 40—47.
- [3] White D. L. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. N 86. P. 2547—2554.
- [4] White D. L. // Proc. 4 Int. Congr. Acoustics. Copenhagen, 1962. P. 321.
- [5] Davis E. F., Drews R. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 6. P. 2663—2666.
- [6] Васильев Б. П. // ФТП. 1968. Т. 10. В. 8. С. 2566—2568.
- [7] Uchida I. et al. // J. Phys. Soc. Japan. 1964. V. 19. N 5. P. 674.
- [8] Калашников С. Г., Морозов А. И., Станковский Б. А., Архипов А. Н. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 8. С. 1472—1477. Henrick V. E., Weinreich G. // Phys. Rev. 1969. V. 178. N 3. P. 1204—1217.
- [9] Гитис М. Б., Чайковский И. А. // ФТП. 1979. Т. 21. В. 4. С. 1189—1194.
- [10] Адомайтис В., Кетис Б.-П. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 4. 730—734.
- [11] Аветисян А. А., Миргородский В. И. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 36—39.
- [12] Baubinas R., Kietis B.-P., Reksnys R., Sakalas A. // Phys. St. Sol. (a). 1978. V. 50. N 1. P. K63—K65.
- [13] Fink M., Quentin G. // Phys. St. Sol. (a). 1971. V. 4. N 2. P. 397—407.
- [14] Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников и диэлектриков. М., 1977.
- [15] Skarman J. S. // Sol. St. Electron. 1965. V. 8. N 1. P. 17—29.
- [16] Creebe C. A., van Dallen P. A. // Phil. Res. Rept. 1969. V. 24. N 3. P. 168—200.