

ОБРАЗОВАНИЕ СЛОЯ ЭДК ПРИ РАСШИРЕНИИ ОБЛАКА НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА С ОКОЛОЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

*Н.Н. Сибельдин, В.Б. Стопачинский, С.Г. Тиходеев,
В.А. Цветков*

Обнаружено, что на начальной стадии эволюции облака неравновесных носителей заряда, созданных коротким световым импульсом в Ge, фронт облака движется с околосвуковой скоростью, почти не зависящей от температуры и интенсивности возбуждения. Показано, что основные экспериментальные факты можно объяснить, учтя запаздывание между испусканием и поглощением неравновесных фононов.

При импульсном возбуждении германия образуется слой электронно-дырочных капель (ЭДК), который движется в глубь кристалла¹. В работах²⁻⁴ было установлено, что слой ЭДК формируется за время $t \lesssim 1$ мкс, а его последующее движение вызывается увлечением капель фононным ветром^{5,6,1)}. Однако, причины образования слоя ЭДК до сих пор оставались не ясными, хотя некоторые возможности и были рассмотрены в^{8,9}. Но предложенные в этих работах механизмы не могут объяснить всей совокупности экспериментальных фактов.

В настоящей статье приводятся результаты исследования начальной стадии кинетики облака неравновесных носителей на временах $t \lesssim 1$ мкс, т.е. когда в процессе образования слоя происходит зарождение и рост ЭДК. Полученные данные обсуждаются на основе модели увлечения неравновесных носителей фононами с учетом запаздывания, возникающего из-за конечности скорости звука. Рассмотренная модель позволяет объяснить образование слоя ЭДК, а так же ряд других ранее непонятных экспериментальных результатов.

Эксперименты проводились на механически полированных образцах чистого германия. Возбуждение осуществлялось лазером на молекулярном азоте (длина волны $\cong 0,34$ мкм, длительность импульса $\cong 10$ нс, максимальная энергия в импульсе $\cong 120$ эрг). Лазерное излучение фокусировалось на боковую поверхность образца в пятно размерами 3×4 мм² (рис. 1, а), так что геометрию опыта можно считать плоской, а движение капель одномерным. Измерялось пространственное распределение поглощения зондирующего излучения с длиной волны $3,39$ мкм неравновесными носителями заряда в различные моменты времени после импульса возбуждения. Более подробно методика экспериментов описана в⁴.

Зависимости скорости перемещения переднего фронта облака неравновесных носителей от расстояния x до возбуждаемой поверхности образца, полученные при различных условиях опыта, приведены на рис.1. Видно, что при малых x имеется участок, на котором фронт облака перемещается с постоянной скоростью $\cong 2 \cdot 10^5$ см/с, близкой к скорости поперечного звука. Скорость перемещения на этой стадии эволюции облака почти не зависит от интенсивности возбуждения и температуры, однако, при понижении температуры и с ростом уровня возбуждения увеличивается продолжительность движения с постоянной скоростью. При малых уровнях накачки расширение облака с постоянной скоростью отсутствует (рис.1, б). Описываемая стадия кинетики облака заканчивается резким торможением фронта облака до скоростей, соответствующих движению слоя ЭДК под действием фононного ветра, излучаемого „горячим пятном”^{10,11,7}, и за дальнейшее движение слоя (линейный участок зависимости v от x) ответственен этот механизм генерации фононов^{4,7}.

¹⁾ Обзор работ по влиянию фононного ветра на пространственное распределение и другие свойства ЭДК дан в⁷.

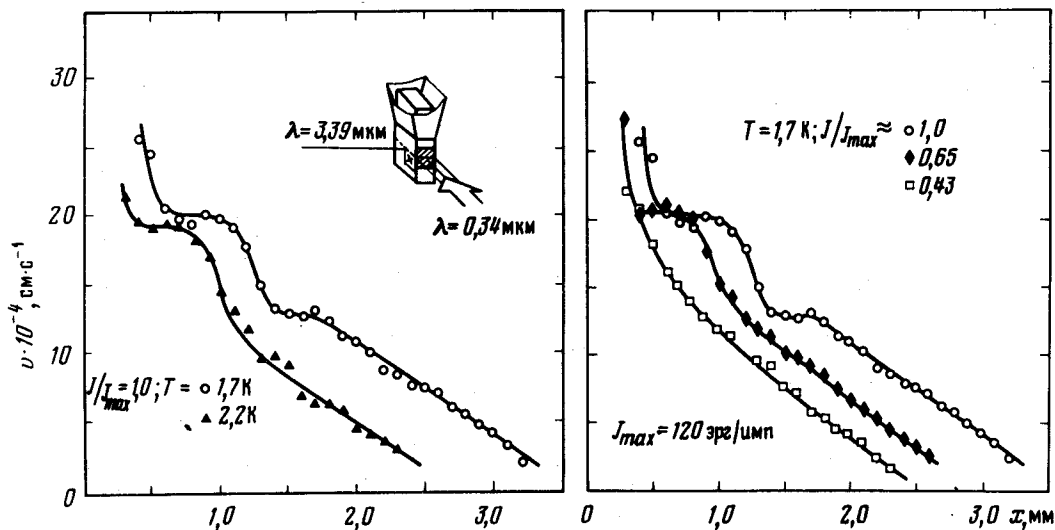


Рис.1. Экспериментальные зависимости скорости движения переднего фронта облака неравновесных носителей заряда от расстояния до возбуждаемой поверхности образца при различных температурах (а) и уровнях накачки (б). Ось x направлена вдоль $\langle 110 \rangle$

Перейдем теперь к обсуждению экспериментальных данных. Для этого рассмотрим следующую модель: пусть в начальный момент времени в бесконечном изотропном кристалле создан бесконечный плоский слой толщиной a , равномерно заполненный неравновесными носителями с плотностью n . Одновременно в этом слое выделяется некоторое число (пропорциональное n) баллистических фононов, эффективно взаимодействующих с носителями и ЭДК. Поместим начало координат в центре слоя и направим ось x перпендикулярно ограничивающим его поверхностям. С учетом запаздывания плотность потока фононной энергии в точке r в момент времени t :

$$w(r, t) = \frac{\Delta E}{4\pi} \int n \delta(t - \frac{|r-r'|}{s}) \frac{r-r'}{|r-r'|^3} dr', \quad (1)$$

где ΔE — энергия, преобразующаяся в баллистические фононы, на каждую созданную электронно-дырочную пару и s — скорость звука. При поглощении фононов носителями на последние действует сила $f = \sigma w/s$ и они приобретают скорость $v = \mu f$, где σ — среднее сечение поглощения фононов и μ — подвижность носителей (формулы для вычисления f приведены в ⁵⁻⁷). В безразмерных единицах ($V = v/s$, $X = 2x/a$, $\tau = 2st/a$) уравнение движения носителей имеет вид (для $X > 0$)

$$\frac{dX}{d\tau} = \min \{ 1, V(X, \tau) \}, \quad (2)$$

где

$$V(X, \tau) = \begin{cases} 0, & \tau < |X-1|, & \text{область I} \\ V_0 [1 - \frac{(X-1)^2}{\tau^2}], & |X-1| < \tau < X+1, & \text{область II} \\ 4V_0 X/\tau^2, & \tau > X+1, & \text{область III} \end{cases} \quad (3)$$

и $V_0 = \mu \sigma \Delta E n / 4s$ — параметр, характеризующий величину эффекта увлечения носителей фононным ветром. Он увеличивается с ростом уровня накачки (увеличивается n) и при по-

нижении температуры (увеличивается μ). При выводе (2) учтено, что фоновый ветер не может разогнать носители до сверхзвуковой скорости.

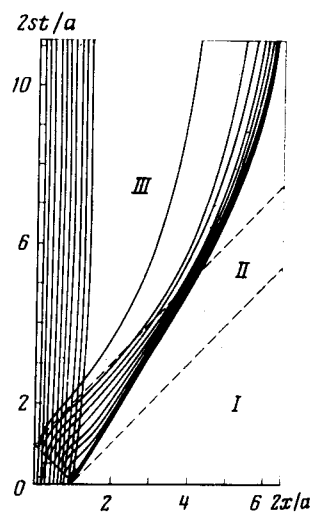


Рис.2

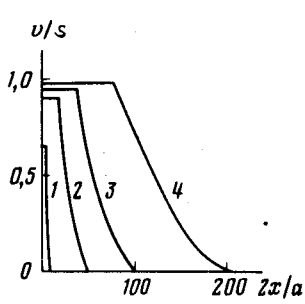


Рис.3

Рис.2. Семейства траекторий носителей для $V_0 = 0,1$ (почти вертикальные линии) и $V_0 = 1$. Пунктир – границы областей I, II и III (формула (3))

Рис.3. Зависимости скорости переднего фронта плоского облака неравновесных носителей от расстояния до центра облака (расчет). Участок $v/s = \text{const}$ – решение в области II, спад – в области III, $V_0 = 1$ (1), 5 (2), 10 (3) и 20 (4)

Уравнение (2) решается аналитически. Мы не будем выписывать решение, а приведем результаты в графической форме ²⁾. Типичные семейства траекторий движения носителей показаны на рис.2. При больших V_0 траектории сгущаются вблизи переднего фронта облака, т.е. на переднем фронте плотность носителей возрастает. Можно показать, что вблизи переднего фронта облака плотность расходится как

$$\frac{n(X, \tau)}{n} \propto \frac{\tau^2}{[X_f(\tau) - X(\tau)] (1 - 1/\sqrt{1 + 4V_0^2})}, \quad (4)$$

где $X_f(\tau)$ – координата фронта. Образование плотного слоя носителей вызвано тем, что носители за фронтом движутся под действием большей силы (см. (3)) и догоняют фронт облака. Причем, при $V_0 > 1$ за фронтом имеются области полного увлечения ($V = 1$). Отметим, что без учета запаздывания скорость носителей возрастает от середины облака к его границам. Учет диффузии носителей должен, конечно, привести к размытию фронта и устранить расходимость в (4).

Зависимости скорости переднего фронта от его координаты изображены на рис.3. При $V_0 \ll 1$, $V_f \propto V_0$, а при $V_0 \gg 1$, $V_f \propto (1 - 1/2 V_0)$. Сопоставление рис.3 и рис.1 показывает, что рассмотренная модель хорошо согласуется с экспериментом.

Учет запаздывания позволяет объяснить не только образование слоя, но и наблюдавшееся в ⁴ сверхлинейное увеличение полного числа неравновесных носителей в объеме образца с ростом уровня поверхностной накачки, что непосредственно видно на рис.2, а также некоторые другие экспериментальные данные, приведенные в ³.

Мы глубоко благодарны Л.В.Келдышу и И.Б.Левинсону за внимание и полезные обсуждения и Н.В.Замковец за помощь при проведении экспериментов.

²⁾ Результаты подробных вычислений будут опубликованы отдельно С.Г.Тиходеевым.

Литература

1. *Damen T.C., Worlock J.M.* Proc. Third Int. Conf. on Light Scattering in Solids, Campinas, Brazil, 1975, (Flammarion, Paris, 1976) p. 183.
2. *Дурандин А.Д., Сибельдин Н.Н., Стопачинский В.Б., Цветков В.А.* Письма в ЖЭТФ, 1977, **26**, 395.
3. *Кавецкая И.В., Сибельдин Н.Н., Стопачинский В.Б., Цветков В.А., ФТТ*, 1978, **20**, 3608.
4. *Замковец Н.В., Сибельдин Н.Н., Стопачинский В.Б., Цветков В.А.* ЖЭТФ, 1978, **74**, 1147.
5. *Багаев В.С., Келдыш Л.В., Сибельдин Н.Н., Цветков В.А., ЖЭТФ*, 1976, **70**, 702.
6. *Келдыш Л.В.* Письма в ЖЭТФ, 1976, **23**, 100.
7. *Bagaev V.S., Galkina T.I., Sibeldin N.N.* Ch. 4 in: Electron-hole droplets in semiconductors, eds. C.D.Jeffries and L.V.Keldysh (North-Holland, 1983).
8. *Markiewicz R.S.* Phys. Rev. B., 1980, **21**, 4674.
9. *Ашкинадзе Б.М.*, Автореферат докт. диссерт. ЛФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР, Ленинград, 1981.
10. *Hensel J.C., Dynes R.C.* Phys. Rev. Lett., 1977, **39**, 969.
11. *Казаковцев Д.В., Левинсон И.Б.* Письма в ЖЭТФ, 1978, **27**, 194.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в реакцию
29 июня 1983 г.