

## ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ В $n$ -Ge В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А. П. Чеботарев, В. Н. Мурзин

Обнаружено излучение горячих электронов, возникающее в сильных электрических полях при определенном соотношении величин  $E$  и  $H$ , соответствующем замыканию главной траектории движения электронов в импульсном пространстве. Излучение объясняется образованием инверсного распределения носителей по уровням Ландау.

Согласно теоретическим расчетам функция распределения носителей в сильных электрическом и магнитном полях может претерпевать значительные изменения, вплоть до образования инверсии в распределении носителей по состояниям  $1^{-4}$ . В условиях "стриминга", т.е. преимущественного рассеяния носителей на оптических фононах, в полях  $E \perp H$  эффект перераспределения носителей обусловлен возникновением в  $p$ -пространстве областей с существенно различной эффективной частотой столкновения носителей. Помимо области "стриминговых" носителей, которые характеризуются частотой столкновений

$$\nu_{\text{опт}} = \nu_0 \sqrt{\epsilon / \hbar \omega_0 - 1} \quad (1)$$

в интервале условий  $p_{\text{др}} < p_0$  образуется область замкнутых траекторий ("ловушка"), в которой носители обладают гораздо более низкой частотой столкновений  $\nu_{\text{пас}}$ , определяемой рассеянием на акустических фононах, примесях и т.д. Здесь  $\epsilon$  — энергия носителя,  $\hbar \omega_0$  — энергия оптического фонона,  $\nu_0 \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$  в случае Ge,  $p_0 = \sqrt{2m\hbar\omega_0}$ , а  $p_{\text{др}} = m c (E/H)$  — импульс дрейфа носителей в направлении перпендикулярном  $E$  и  $H$ . Характер эффектов накопления зависит от величины источника, т.е. области  $p$ -пространства, в которую возвращаются носители после испускания оптического фонона,  $\Delta p = \sqrt{2m(\epsilon - \hbar\omega_0)}$ . В большинстве проводившихся до сих пор исследований, в том числе выполненных в  $p$ -Ge по наблюдению инверсии и лазерного излучения на оптических переходах между подзонами легких и тяжелых дырок, размеры источника были достаточно большими ( $\Delta p \approx p_0$ )<sup>4</sup>.

Настоящая работа посвящена проблеме инвертированных состояний в системе горячих носителей в условиях создания источника достаточно малых размеров ( $\Delta p \ll p_0$ ). Наиболее интересная ситуация в этом отношении возникает в полях  $E \perp H$  в условиях, когда  $p_{\text{др}} \cong 1/2 p_0$ , т.е. происходит замыкание главной орбиты (орбиты, проходящей через точку  $p = 0$ )<sup>1-3</sup>. Выполнение условия  $\nu_{\text{опт}} \gg \nu_{\text{пас}}$  в этой ситуации означает, что носители должны сосредоточиться вблизи главной траектории, т.е. заполнить верхние уровни Ландау  $n \approx \hbar \omega_0 / 4 \hbar \omega_c$ . Известно, что в обычных условиях получить индуцированное излучение на циклотронных переходах крайне трудно из-за эквивалентности переходов в нижние и в верхние состояния. Описанная ситуация в сильных  $E \perp H$  полях в значительной мере снимает эти ограничения, так как плотность состояний для переходов на верхние уровни с энергией  $\epsilon > \hbar \omega_0$  оказывается меньше, чем в нижние  $\epsilon < \hbar \omega_0$ , из-за взаимодействия с оптическими фононами. Достижение такого типа распределения носителей, однако, крайне затруднительно, главным образом потому, что при малых размерах источника (что соответствует  $\epsilon - \hbar \omega_0 \ll \hbar \omega_0$ ) сложно обеспечить выполнение главного условия  $\nu_{\text{опт}} \gg \nu_{\text{пас}}$ , необходимого для накопления носителей на главной траектории. Это непосредственно видно из соотношения (1). Для получения достаточно большой частоты столкновений  $\nu_{\text{опт}} \cong \nu_0$  необходимо, чтобы энергия носителей  $\epsilon$ , заметно превышала  $\hbar \omega_0$  (нужно чтобы  $\epsilon - \hbar \omega_0$  была порядка  $\hbar \omega_0$ ).

Исследования проводились на кристаллах  $n$ -Ge с примесью сурьмы ( $3 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Образцы размерами  $5 \times 3 \times 0,5 \text{ мм}^3$  помещались в жидком гелии внутри сверхпроводящего соленоида в световоде, на конце которого находился приемник из  $n$ -InSb. Измерения

велись при  $H = 0 - 17$  кЭ. К торцам образца подводилось электрическое поле напряженностью до 2 кВ/см в виде импульсов длительностью 2 - 4 мкс, которые создавали в полупроводнике горячую электронную плазму в результате ионизации донорной примеси. Главная задача сводилась к регистрации циклотронного излучения, по интенсивности которого можно было бы судить об изменениях в распределении носителей в сильных  $E \perp H$  полях. Вероятность спонтанных переходов между уровнями Ландау, как известно, пропорциональна номеру уровня, т.е. интенсивность

$$P \sim \dot{r}^2 \sim (\omega_c v)^2 \sim \omega_c^2 \hbar \omega_c (n + \frac{1}{2}). \quad (2)$$

Перераспределение носителей в верхние состояния должно сопровождаться ростом интенсивности ЦР излучения. Схема установки описана в <sup>4</sup> стр. 102 и позволяет при подключении к ЛОВ-спектрометру производить одновременно измерение спектров ЦР-поглощения электронов.

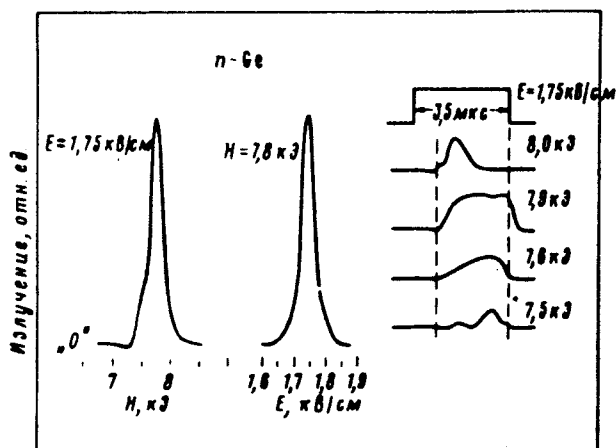


Рис. 1

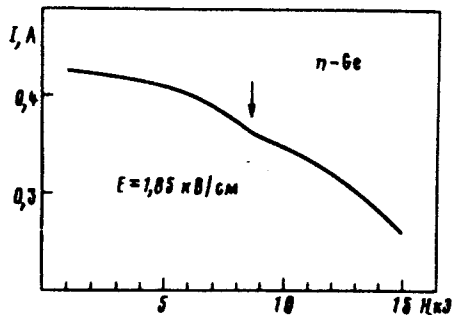


Рис. 3

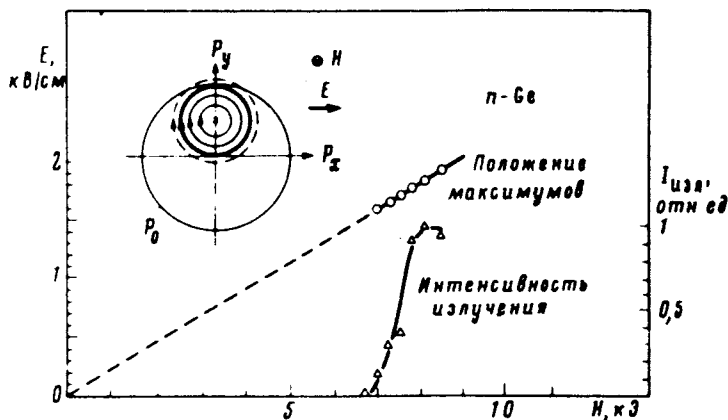


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения от величин  $E$  и  $H$ . Справа - изменение интенсивности излучения во времени

Рис. 2. Положение максимумов излучения в координатах  $E$  и  $H$  (кружочки). Внизу зависимость интенсивности излучения в максимумах от  $H$

Рис. 3. Зависимость тока от магнитного поля. Стрелкой показано значение  $H$ , при котором наблюдается излучение

На рис. 1 - 3 приведены результаты исследований. В электрических полях, выше некоторого критического  $E_{кр} \gg 1,5$  кВ/см, обнаружено резкое увеличение интенсивности излучения, примерно, на два порядка, по сравнению со спонтанным излучением, которое регистрировалось приемником в диапазоне  $\lambda > 0,3$  мм в полях  $E$  вблизи  $E_{кр}$ . Измерения с введением различных фильтров между образцом и приемником показали, что обнаруженное излучение характеризуется длиной волны порядка  $1 \div 3$  мм. Это соответствует энергетическому расстоянию между уровнями Ландау в исследованных магнитных полях.

Возгорание излучения наблюдается в полях  $E > 1,5$  кВ/см в очень узком интервале условий вблизи

$$E / H = 0,22 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{кЭ}^{-1}, \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, излучение наблюдается при фиксированном  $E$  в полях  $H$ , отклоняющихся от указанного соотношения (3) не более, чем на 0,5 кЭ, а при фиксированном  $H$  в полях  $E$ , отличающихся от (3) не более, чем на 0,1 кВ/см. То, что область значений  $E$  и  $H$ , при которых регистрируется излучение хорошо укладывается на прямую (3), иллюстрирует рис. 2. На том же рисунке показан рост интенсивности излучения с  $E$  и  $H$  по данным измерений в точках максимума. Видно, что эффект возгорания имеет ярко выраженный пороговый характер. На рис. 1 приведены также данные о кинетике формирования излучения в течение импульса  $E$  при разных значениях  $H$ .

Тот факт, что субмиллиметровое излучение, отвечающее переходам между уровнями Ландау, наблюдается вблизи условий, соответствующих замыканию главной траектории, подтверждается расчетом ( $E/H = 0,2$  согласно <sup>1</sup>) и заставляет предположить, что в данных экспериментах реализовано тороидальное распределение носителей, инверсное по отношению к нижним уровням Ландау. Согласно <sup>1</sup> в этих условиях должна появляться особенность на гауссамперных зависимостях. Как видно из рис. 3, такого типа особенность зарегистрирована нами на кривых  $I(H)$  при возникновении излучения. Увеличение интенсивности излучения в подобных условиях, в принципе, должно иметь место и в случае спонтанных переходов. Однако, согласно оценкам, это увеличение существенно меньше наблюдаемого. Учитывая пороговый характер возникновения излучения и другие особенности явления, более вероятным представляется, что обнаруженное излучение является вынужденным.

Авторы благодарны А.А.Андронову за полезные обсуждения и Ю.А.Ефимову за помощь в работе.

#### Литература

1. *Восиллюс И.И., Левинсон И.Б.* ЖЭТФ, 1966, 50, 1660; ЖЭТФ, 1967, 52, 1013; ФТТ, 1968, 10, 1462.
2. *Альбер Я.И., Андронов А.А., Валов В.А., Козлов В.А., Лернер А.М., Рязанцева И.П.* ЖЭТФ, 1977, 72, 1030.
3. *Kurasawa T.* Solid. State Comm., 1977, 24, 357.
4. Сборник "Инвертированные распределения горячих электронов в полупроводниках". Горький: ИПФ АН СССР, 1983.