

## ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ $p$ -Ge В ПОЛЯХ $E_0 \parallel B_0 \parallel \langle 100 \rangle$

Бразис Р. С., Кунигелис А. А.

Получено вынужденное излучение в диапазоне 104—156 ГГц из кристаллов Ge с остаточной примесью Al в полях  $E_0 \parallel B_0 \parallel \langle 100 \rangle$ . Проведены исследования влияния поперечных размеров образца на спектр излучаемых частот. Показано, что с уменьшением толщины образца зона генерации сужается и реализуется одночастотный режим излучения. Экспериментально установленные значения абсолютных отрицательных эффективных масс (ОЭМ) дырок  $|m_c| = (0.26 + 0.35) m_0$  близки к теоретическим значениям масс на оси конуса ОЭМ.

Значительным событием последних лет в физике твердого тела было открытие вынужденного излучения миллиметровых волн из кристаллов дырочного германия [1]. Генерация наблюдалась в образцах, легированных галлием до уровня не менее  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  под действием постоянных электрического  $E_0$  и магнитного  $B_0$  полей, параллельных оси  $\langle 100 \rangle$ . Однако интенсивность излучения и частотный состав генерации изменялись в течение импульса электрического поля  $E_0$ , что связывалось с джоулевым разогревом образца [1, 2].

Цель настоящей работы — получить экспериментальные доказательства реализуемости стабильного одночастотного режима генерации, что необходимо для более глубокого познания этого явления и оценки его практической перспективности.

Эксперименты проводились на образцах Ge с остаточной примесью Al на уровне  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Ожидалось, что использование кристаллов с низким уровнем легирования устранил нагрев образца как возможную причину нестабильности излучения.

Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда с ориентацией кристаллографического направления  $\langle 100 \rangle$  либо  $\langle 110 \rangle$  вдоль длины образца (см. вставку на рис. 1). На торцах, непараллельность которых не превышала 6 угловых минут, формировались омические контакты путем напыления алюминия. Для вывода излучения в одном из контактов было выполнено отверстие диаметром 0.5 мм. Импульсное электрическое поле ( $E_0 \leq 200 \text{ В/см}$ ) длительностью 0.5—10 мкс и частотой повторения 0.5—300 Гц создавалось параллельно магнитному полю сверхпроводящего соленоида ( $B_0 \leq 5 \text{ Т}$ ).

В случае ориентации  $E_0 \parallel B_0 \parallel \langle 100 \rangle$  наблюдается излучение в частотной полосе 104—156 ГГц. Характерна задержка излучения по отношению к моменту включения электрического поля (рис. 1, а). Время задержки  $\tau \approx 0.9 \text{ мкс}$  не зависит ни от  $E_0$ , ни от  $B_0$ . По-видимому, столь длительное время  $\tau$  необходимо для раскачки СВЧ колебаний при малых значениях коэффициента усиления в образце.

Характерные частоты излучения зависели от длины и поперечных размеров образца, а также индукции магнитного поля  $B_0$  (рис. 1, б), но при прочих неизменных условиях не зависели от  $E_0$ . В резонансных максимумах, достигаемых при некоторых значениях  $B_0$ , интенсивность отличалась высокой стабильностью. Между максимумами наблюдалась нестабильность амплитуды. По-видимому, это результат конкуренции различных электромагнитных мод в образце. Частота излучения оставалась неизменной с точностью до 1 % при значительном (0.35 Т) изменении  $B_0$ , а затем изменялась скачком (рис. 1, б);

$d=2.75$  мм). Затягивание частоты свидетельствует о довольно жесткой ее связи с размерами образца-резонатора и о широкополосном характере механизма генерации. Подбором размеров образца можно добиться одной весьма стабильной линии излучения (рис. 1, б;  $d=1.8$  мм).

Зависимость зарегистрированных частот  $f$  от магнитного поля (рис. 2, а) смещена по отношению к результатам предшествующих экспериментов.

Зона генерации (рис. 2, б) имеет тенденцию к сужению при уменьшении размеров образца. Такая же тенденция наблюдалась и в предшествую-

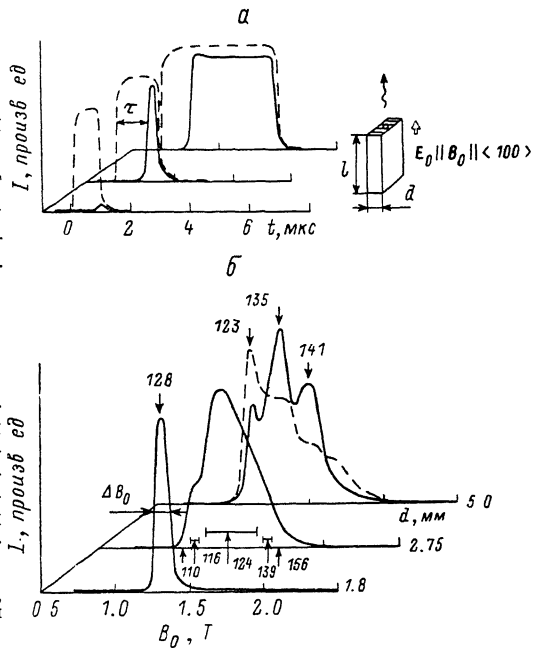


Рис. 1. Временные зависимости интенсивности излучения (сплошные линии) при различных длительностях импульса электрического поля (штриховые) (а) и полевые зависимости интенсивности излучения образца длиной  $l=20$  (штриховая кривая) и 13.5 мм (сплошная) при различных толщинах  $d$  (б).

Цифры — измеренная частота излучения (в ГГц), отрезки прямых — пределы генерации постоянной частоты.

щих работах [2]. Порог генерации по магнитному полю ( $B_0=0.95$  Т) несколько ниже значения  $B_0=1.2$  Т, полученного в [2]. Однако порог излучения по электрическому полю один и тот же:  $E_0 \geq 40$  В/см. В таких полях дырки за время  $\tau_E = \sqrt{2\hbar\omega_0 m^*/eE_0}$ , необходимое для ускорения до энергии оптических фоно-

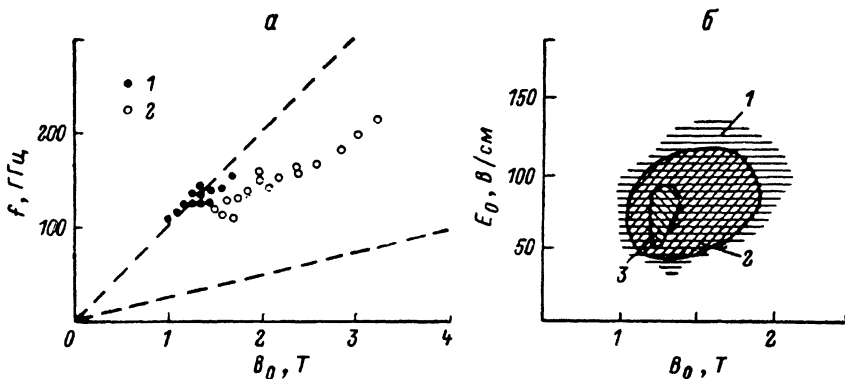


Рис. 2. Полевые зависимости частоты излучения (а) и зоны генерации образцов Ge<Al> различных размеров (б).

а) 1 — Ge<Al> ( $p=4 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ ), 2 — Ge<Ga> (данные [2]) и расчетная частотная полоса ОДП (область между прямыми [3]); б) размеры образцов, мм: 1 —  $20 \times 5 \times 5$ , 2 —  $13.5 \times 5 \times 2$ , 3 —  $13.5 \times 5 \times 1.8$ .

нов  $\hbar\omega_0$ , не успевают рассеяться на акустических фононах. Это соответствует известному условию стриминга. Частотно-полевой интервал, в котором зарегистрировано излучение, определяется в настоящем эксперименте как  $4.9 \leq f\tau_E \leq 15$ .

Излучения из тех же кристаллов при ориентации  $E_0 \parallel B_0 \parallel \langle 110 \rangle$  не обнаружено.

Существующая модель вынужденного излучения основывается на отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) дырок с отрицательной эф-

эффективной массой (ОЭМ) [1]. Наблюдаемые в настоящей работе частоты находятся на границе области существования ОДП (рис. 2, а), рассчитанной методом Монте-Карло в рамках модели дырок с ОЭМ [3]. Следуя этой модели, можно рассматривать максимумы излучения как проявление циклотронного резонанса (ЦР) дырок с ОЭМ и по резонансным значениям  $f$  и  $B_0$  оценить абсолютные значения циклотронных эффективных масс. Полученные значения  $|m_c^-| = (0.26 \div 0.35) m_0$  ниже известных  $|m_c^-| = (0.36 \div 0.5) m_0$  [1, 2]. Нижнее значение  $|m_c^-| = (0.26 \pm 0.02) m_0$  близко к пределу  $|m_c^-| = (0.22 \pm 0.06) m_0$  [4], к которому стремится циклотронная эффективная масса дырок при сжатии их функции распределения к оси  $\langle 100 \rangle \parallel E_0$ , являющейся осью конуса ОЭМ в импульсном пространстве.

Итак, вынужденное излучение миллиметровых волн из дырочного германия в конфигурации  $E_0 \parallel B_0 \parallel \langle 100 \rangle$  сохраняется при существенном уменьшении концентрации примеси и изменении ее вида. Уровень мощности излучения порядка 1 мВт при мощности питания не выше 80 Вт. При этом температура образца к концу действия импульса длительностью 10 мкс оценивается в 8 К без учета теплопередачи в резервуар. Достигнутая высокая стабильность интенсивности излучения в одночастотном режиме позволяет считать реальной перспективу создания на кристаллах  $p$ -Ge криогенных источников когерентного электромагнитного излучения непрерывного действия.

Авторы благодарны В. И. Гавриленко и Э. Ф. Красильнику за оказание помощи при техническом решении эксперимента и полезные дискуссии.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Андронов А. А., Белянцев А. М., Гавриленко В. И., Додин Е. П., Красильник Э. Ф., Никоноров В. В., Павлов С. А. — Письма ЖЭТФ, 1984, т. 40, в. 6, с. 221—223.
- [2] Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе / Под ред. А. А. Андропова. Горький, 1986. 175 с.
- [3] Стариков Е. В., Шикторов П. Н. — ФТП, 1986, т. 20, в. 6, с. 1076—1082.
- [4] Dousmanis G. C. — In: Quant. Electron. Columbia, 1960, p. 458—467.

Институт физики полупроводников  
АН ЛитССР  
Вильнюс

Получена 10.03.1988  
Принята к печати 22.03.1988