

ИНДУЦИРОВАННОЕ МИЛЛИМЕТРОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ДЫРОК ГЕРМАНИЯ В $E \parallel H$ ПОЛЯХ (NEMAG НА ЦР)

*А.А.Андронов, А.М.Белянцев, В.И.Гавриленко, Е.П.Додин,
З.Ф.Красильник, В.В.Никоноров, С.А.Павлов*

Обнаружено стимулированное электромагнитное излучение в коротковолновой части миллиметрового диапазона ($\lambda \approx 1,5 \div 2,2$ мм) из охлажденного до температуры жидкого гелия p -Ge в $E \parallel H \parallel [100]$ полях.

Идея NEMAG'a (Negative Effective Mass Amplifier and Generator)^{1, 2} широко обсуждалась более двадцати лет назад, но так и осталась не реализованной. Развитие представлений об анизотропии и инверсии функции распределения горячих носителей в полупроводниках (см., например,

³) возродило интерес к NEMAG'у, и в работах ⁴ был проведен расчет NEMAG'a на циклотронном резонансе (ЦР), показывающий его осуществимость в *p*-Ge при низких температурах в $E \parallel H \parallel [100]$ полях для длин волн $0,2 \text{ мм} < \lambda < 4,0 \text{ мм}$. Постоянное электрическое поле в условиях преимущественного неупругого рассеяния тяжелых дырок на оптических фононах приводит к вытягиванию функции распределения (стримингу) в *p*-пространстве. В случае стриминга вдоль оси конуса отрицательных циклотронных масс (ОЦМ) возникает инверсия в распределении дырок с ОЦМ в поперечном к *E* направлении (инверсия по уровням Ландау при $H \parallel E$). В такой ситуации возможно усиление излучения круговой поляризации, резонансного с дырками с ОЦМ ⁴. Поглощение дырок с положительными циклотронными массами, функция распределения которых не инвертирована, будет нерезонансно (ср. ¹). Максимальная инверсия и усиление достигаются при небольшой анизотропии функции распределения, которая в *p*-Ge при гелиевых температурах возникает при $E \sim 100 \div 200 \text{ В/см}^2$, причем максимум усиления соответствует значению ОЦМ $m_c \sim 0,5m_0$ ⁴ (m_0 — масса свободного электрона).

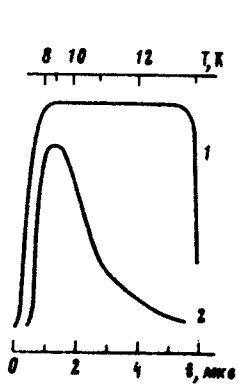


Рис. 1

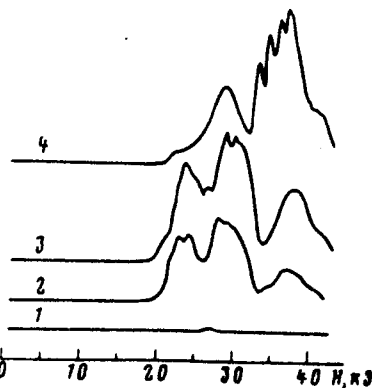


Рис. 2

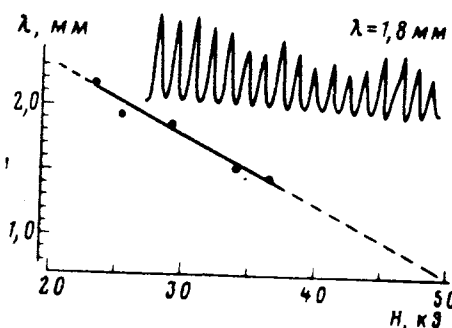


Рис. 3

Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения на образце 1 и импульса излучения 2. На верхней шкале указана температура образца во время действия импульса напряжения, оцененная по адиабатическому разогреву

Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения *p*-Ge от магнитного поля в полосе приемника *n*-InSb: 1 — $E = 90 \text{ В/см}$; 2 — $E = 120 \text{ В/см}$; 3 — $E = 140 \text{ В/см}$; 4 — $E = 195 \text{ В/см}$. Кривые приподняты друг относительно друга

Рис. 3. Зависимость длины волны излучения от магнитного поля. Точки — измеренные значения длин волн (на вставке — одна из интерферограмм), пунктир — аппроксимация в области магнитных полей, где наблюдалось излучение

Экспериментально исследовалось излучение из образцов, вырезанных в направлении $[100]$ с токовыми контактами на противоположных гранях. Образцы были изготовлены из слабокомпенсированного Ge (Ga). Они располагались в гелиевом криостате в центре сверхпроводящего соленоида, так что направления векторов *E* и *H* в образцах совпадали. Излучение регистрировалось охлаждаемым приемником *n*-InSb внутри криостата и диодом с барьером Шоттки вне криостата в момент действия импульса электрического поля ($\tau_{\text{имп}} \sim 5 \text{ мкс}$, $f_{\text{повт}} = 3 \div 30 \text{ Гц}$) — рис. 1. Использовалась методика измерений, аналогичная ¹). Сигнал на приемнике *n*-InSb на пять порядков превосходил спонтанное излучение из *p*-Ge, зарегистрированное ранее в больших полях $E \sim 1 \text{ кВ/см}$ ⁵. Наиболее интенсивное излучение (величина сигнала на диоде Шоттки достигала значения 20 мВ) наблюдалось в начале импульса, а затем спадало, по-видимому, из-за разогрева образца — рис. 1.

¹) См. работу Бермана Л.В., Гавриленко В.И., Красильника З.Ф., Никонова В.В., Павлова С.А., Чеботарева А.П. в ФТП (в печати).

Как видно из рис. 2, излучение пороговым образом возникало с ростом E и H . В электрических полях $E > 250$ В/см излучение наблюдалось лишь на переднем фронте импульса электрического поля из-за свипирования E через значения $E \sim 100 \div 200$ В/см. Излучение наблюдалось вплоть до полей $H \cong 50$ кЭ.

С ростом магнитного поля наблюдалась перестройка частоты излучения — рис. 3. Длина волны в диапазоне $2,2 \text{ мм} > \lambda > 1,5 \text{ мм}$ измерялась с помощью интерферометра Майкельсона с использованием диода Шоттки. Экстраполяция данных рис. 3 в область предельных магнитных полей, где еще регистрировалось излучение, указывает на возможную перестройку длины волны в диапазоне $0,8 \text{ мм} < \lambda < 2,3 \text{ мм}$.

Все приведенные данные — наличие излучения в полях $E \cong 100 \div 200$ В/см, перестройка длины волны в магнитном поле, соответствующая циклотронным массам $m_c \cong (0,45 \div 0,49)m_0$, подавление излучения разогревом кристалла и падение его интенсивности в сильных магнитных полях (что естественно объяснить уменьшением отрицательной проводимости с ростом H ⁴) — позволяют сделать вывод, что в настоящей работе впервые реализован NEMAG на ЦР в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Результаты работы ⁴ указывают на принципиальную возможность продвижения в субмиллиметровый диапазон длин волн.

Авторы благодарны К.А.Горониной, Ю.А.Дрягину, В.В.Паршину за помощь при проведении эксперимента, В.А.Перевозчикову за подготовку образцов.

Литература

1. *Dousmanis G. C. Phys. Rev. Lett.*, 1958, 1, 55, 168.
2. *Kromer H. Phys. Rev.*, 1958, 109, 1856; *Proc. IRE*, 1959, 47, 397; *Prog. in Semicond.*, 1960, 4, 3.
3. *Kurosawa T. J. Phys. Soc. Japan*, 1971, 31, 668.
4. *Андронов А.А., Додин Е.П., Красильник З.Ф.* Окончательно ли закрыт немаг? (к расчету немага на ЦР). Сб.: Плазма и неустойчивости в полупроводниках: Тез. докл. IV симпозиум. Вильнюс, 1980, с. 105; ФТП, 1982, 16, 212.
5. *Гавриленко В.И., Додин Е.П., Красильник З.Ф., Никонов В.В., Павлов С.А., Федоренко Е.Ф.* Люминесцентная спектроскопия горячих дырок Ge. Сб.: Плазма и неустойчивости в полупроводниках: Тез. докл. V симпозиум. Вильнюс, 1983, с. 88.