

*Письма в ЖЭТФ, том 11, стр. 284 – 287*

*20 марта 1970 г.*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ  
ВОЗБУЖДАЕМОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ  
В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ**

*Е.А.Корнилов, С.А.Некрашевич, Я.Б.Файнберг, Н.А.Шоховцов*

Коллективные взаимодействия пучков заряженных частиц с газоразрядной плазмой в настоящее время хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Что же касается вопросов взаимодействия пучков заряженных частиц с плазмой твердых тел, в частности, с полупроводниковой плазмой, то, несмотря на значительное число теоретических исследований, экспериментальные исследования в этой области только начаты. В работе [1] был обнаружен экспериментально эффект возбуждения геликонов электронным пучком в полупроводниковой плазме. Возбуждение геликонов с помощью внешних полей наблюдалось в работе [2]. Экспериментальное обнаружение и исследование резистивной высокочастотной неустойчивости, которая должна иметь место при взаимодей-

ствии пучков заряженных частиц с твердотельной плазмой, является целью настоящей работы. Такие исследования кроме чисто физического интереса необходимы для выяснения возможностей использования плазменно-пучкового взаимодействия для возбуждения сверхвысокочастотных колебаний. Переход к полупроводникам позволяет получить "спокойную" плотную плазму (до  $10^{14}$ – $10^{18}$  см $^{-3}$ ), при этом очень просто может быть достигнуто плавное изменение плотности. Дисперсионное уравнение, описывающее высокочастотную ветвь колебаний, возбуждаемых при взаимодействии пучка с плазмой [3], имеет вид:

$$1 - \frac{\omega_0^2}{2\omega(\omega + i\nu)} - \frac{\omega_b^2}{(\omega - kV_b)^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\omega_b$ ,  $V_b$  – электронноплазменная частота и скорость электронов пучка. Для большинства полупроводников частота соударений  $\nu$  значительно больше ленгмюровской частоты колебаний плазмы  $\omega_0$  и

$$\omega = (kV_b + \omega_b R) + i\omega_b; \quad R = \operatorname{Re} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2}{2\nu\omega} i}}; \quad I = \operatorname{Im} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2}{2\nu\omega} i}}. \quad (2)$$

Инкремент нарастания колебания равен:

$$\gamma = \operatorname{Im} \omega = I \omega_b. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1 в данном случае резко выраженного резонанса от  $\omega$  для инкремента нарастания не существует.

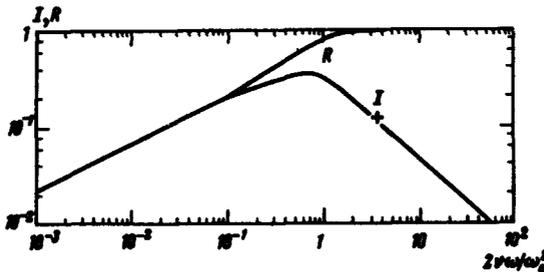


Рис. 1. Зависимость коэффициентов  $I$  и  $R$  от параметра  $2\nu\omega/\omega_0^2$  ( $\omega$  – частота колебаний)

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 2. Электронный пучок с энергией 1–5 кэВ и током 20–150 мА в импульсе длительностью 200–300 нс пропускался через канал диаметром 3 мм, вырезанный вдоль оси [111] в монокристалле Ge, имеющем следующие параметры:

$\rho$  (удельное сопротивление) = 47 ом·см, концентрация примесей  $n = 2 + 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , число дислокаций  $K = 10 \text{ см}^{-3}$ , длина — 3,5 см, диаметр — 3,5 см. Кристалл в специальном контейнере помещался в сосуд Дюара, заливаемый жидким азотом. Вся система пучок-канал кристалла жестко юстировалась и помещалась на оси слабого однородного магнитного поля напряженностью 300–400 э. В качестве съемника колебаний в пучке применялась периодическая структура типа "гребенка", согласованная с волноводным трактом.

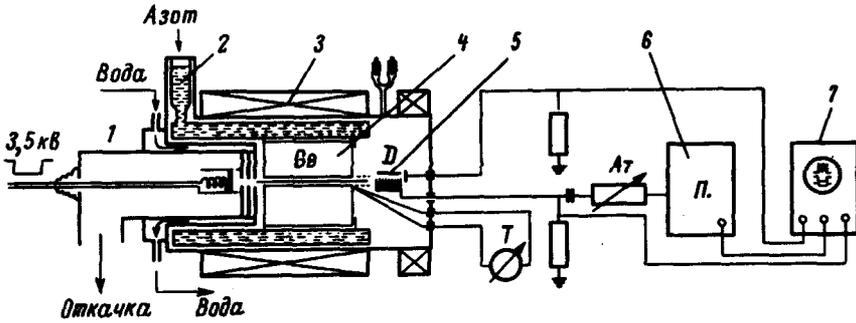


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — электронная пушка; 2 — дюар; 3 — соленоид магнитного поля; 4 — кристалл; 5 — съемник колебаний, "гребенка"; 6 — супергетеродинный приемник; 7 — осциллограф; Ат — аттенуатор; Т — термопара; Д — диафрагма

Собственное усиление гребенки 3 дб. Колебания регистрировались с помощью супергетеродинного приемника чувствительностью  $\sim 10^{-13} \text{ вт}$ , работающего на фиксированной частоте  $36,74 \cdot 10^9 \text{ иц}$  с полосой пропускания 5 Миц. В экспериментах ток в канале кристалла менялся в пределах 20–150 ма, ток над гребенкой при этом поддерживался постоянным, равным 0,33 ма (в 10 раз меньше тока самовозбуждения системы пучок-"гребенка"). Измерения показали (рис. 3) что при прохождении пучка электронов через канал кристалла возбуждаются высокочастотные колебания на частоте  $36,74 \cdot 10^9 \text{ иц}$ . В области температур 350–300°К (плотностей —  $2,6 \cdot 10^{14} - 2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) эти колебания по частоте совпадают с частотой резистивных колебаний, определяемых уравнениями (1) — (3). Ход зависимости инкремента нарастания колебаний от температуры хорошо укладывается в рамки резистивного механизма возбуждения колебаний. Зависимость логарифма мощности возбуждаемых колебаний в этой области от корня квадратного из тока пучка носит линейный характер (как и следует ожидать из (3)). Инкременты нарастания, определенные с помощью этой зависимости, хорошо совпадают с теоретическими. На рис. 1 крестиком отмечено значение  $l$ , определенное экспериментально при температуре образца 310°К (параметр  $2\nu\omega/\omega_0^2$  в этом случае равен 3,5). Помимо указанной выше области колебаний существует вторая область (300–240°К по Т,  $n = 2,3 \cdot 10^{13} + 2 - 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), в которой зависимость интенсивности возбуждаемых колебаний от Т носит резонансный характер. Частота возбуждаемых колебаний в резонансе совпадает с ленгмюровской. Можно было бы предположить, что в этой области наблюдается возбуждение ленгмюровских колебаний за счет пучковой неустойчивости (нерезистивного характера), однако в наших экспериментах частота соударений в несколько раз больше ленгмюровской частоты. В этих

условиях возможно возбуждение колебаний, если они обусловлены эффектами индуцированного излучения. Сужение резонанса по  $T$  при увеличении мощности пучка и уровня возбуждаемых колебаний, наблюдаемое в эксперименте, является подтверждением этому. Однако для выяснения вопроса о возможности возбуждения в нашем эксперименте нерезистивных неустойчивостей требуется дополнительная проверка.

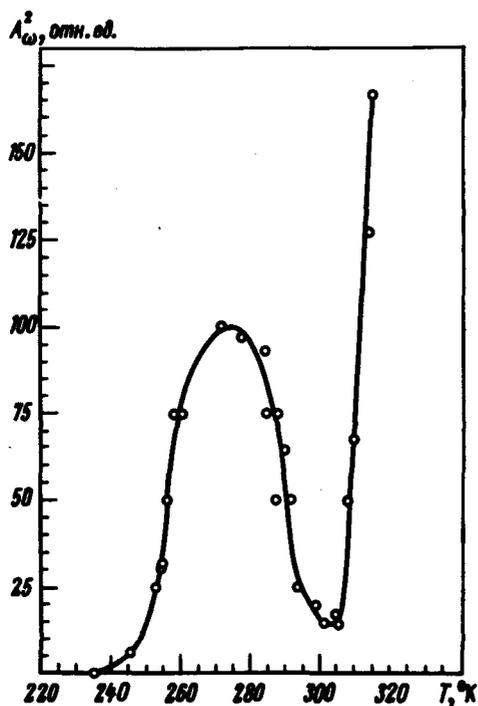


Рис. 3. Мощность возбуждаемых колебаний на частоте  $f = 36,74 \cdot 10^9$   $\mu$  в зависимости от температуры кристалла Ge

Авторы благодарны И.Ю.Адамову за разработку и представления для проведения эксперимента супергетеродинного приемника большой чувствительности, Л.И.Болотину за постоянный интерес и помощь в работе В.И.Курилко, В.Д.Шапиро и В.И.Шевченко за обсуждение результатов эксперимента, С.С.Пушкарева за помощь в проведении измерений.

Поступила в редакцию  
2 февраля 1970 г.

### Литература

- [1] J.R.Bayless, W.M.Hooke, R.N.Sudan. *Phys. Rev.Lett.*, 22, 640, 1969.
- [2] А.А.Иванов, Е.З.Мейлихов, В.В.Параил, Д.А.Франк-Каменецкий. *ДАН СССР*, 187, 68, 1969.
- [3] С.И.Ханкина, В.М. Яковенко. *ФТТ*, 9, 578, 1967.