

СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕЛЛУРА

В.Н.Кобызев, А.С.Тагер, В.И.Шепшелей

Исследовалось СВЧ излучение монокристаллов теллура в сильных импульсных электрических полях. Первоначально эффект был обнаружен в диапазоне $7,5 + 10$ Гц при температуре $T = 77^\circ\text{K}$ на кристалле размером 5×2 мм² с малой концентрацией ($p \approx 2 \times 10^{14}$ см⁻³) и высокой подвижностью ($\mu_p \approx 8000$ см²/в.сек) дырок, к которому параллельно оси z (C_3) прикладывалось электрическое поле, напряженностью $E \geq 200$ в/см. В дальнейшем были исследованы различные образцы кристаллов теллура, ориентированные как по оси z , так и по оси y , с концентрацией дырок $10^{14} + 1,3 \times 10^{15}$ см⁻³ и подвижностью $\mu_p \approx 2000 + 8700$ см²/в.сек (при $T = 77^\circ\text{K}$). Длина образцов составляла $2 + 4$ мм; боковые грани получались либо скалыванием, либо шлифовкой; на полированных торцах кристалла висмутом с нейтральным флюсом создавались омические контакты.

Образец помещался либо в разрыв внутреннего проводника коаксиала с волновым сопротивлением 50 ом, либо между широкими стенками волновода сечением 10×23 мм. Для индикации СВЧ излучения использовались широкополосные приемники прямого усиления на лампах бегущей волны, перекрывающие диапазоны $1 + 10,5$ Гц, при чувствительности $10^{-10} + 10^{-11}$ в. Спектральное распределение интенсивности излучения определялось с помощью включенных в тракт усилителя перестраиваемых резонансных фильтров с полосой $10 + 15$ Мц. На кристалл подавались импульсы напряжения (тока) длительностью $0,2 + 10$ мксек с амплитудой до 500 в от источника с внутренним сопротивлением 15 ом. Ток кристалла определялся по падению напряжения на последовательно включенном омическом сопротивлении ~ 1 ом. Огибающая СВЧ импульса индицировалась на осциллографе.

СВЧ излучение шумового характера наблюдалось во всем указанном диапазоне частот для большинства исследованных образцов как при $T = 77^\circ\text{K}$, так и при более высоких температурах, включая комнатную. Спектральная плотность излучения составляла $10^{-18} + 10^{-15}$ в.м/Гц (эквивалентная шумовая температура $T_{\text{экв}} = 10^5 + 10^8$ °K). На данной частоте ω возникновение излучения индицируется, когда электрическое поле в образце превышает некоторое пороговое значение $E_{\text{п}}(\omega)$,

которому соответствует плотность тока $J_{\Pi}(\omega)$; при дальнейшем увеличении E и J интенсивность излучения монотонно возрастает (рис.1). Измеренные значения $E_{\Pi}(\omega)$ и $J_{\Pi}(\omega)$ при $T = 77^{\circ}\text{K}$ составляли соответственно $80 \pm 500 \text{ в/см}$ и $(0,5 \pm 10) \cdot 10^2 \text{ а/см}^2$.

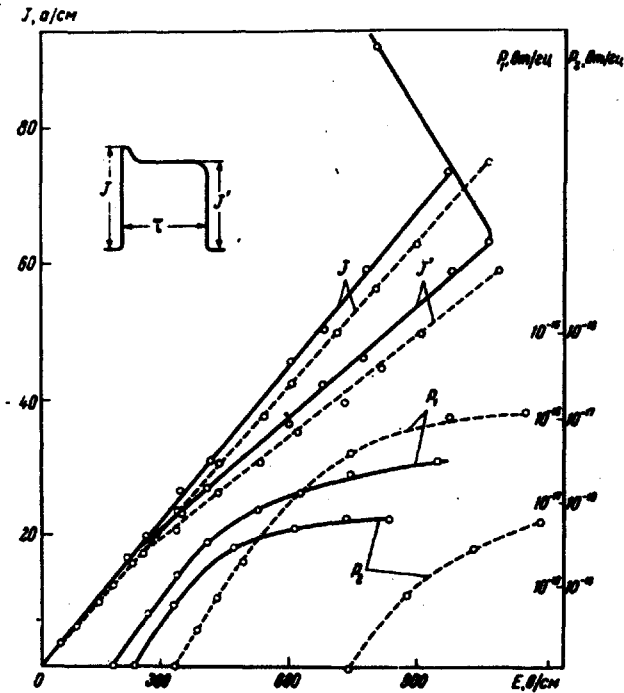


Рис.1. Вольт-амперные характеристики кристалла теллура размером $4 \times 4 \text{ мм}^2$ при $T = 77^{\circ}\text{K}$ (кривые J, J') и средняя спектральная плотность СВЧ излучения в диапазонах $1 \pm 1,5 \text{ ГГц}$ (P_1) и $3,5 \pm 5,5 \text{ ГГц}$ (P_2).
 ————— $\tau = 2 \text{ мксек}$;
 - - - - - $\tau = 0,4 \text{ мксек}$

При неизменных длительности питающего импульса τ и температуре образца T пороговое значение E_{Π} быстро растет с частотой, средняя интенсивность излучения падает. При этом спектральная плотность излучения изменяется не монотонно, а проходит через ряд более или менее сильно выраженных нерегулярных максимумов, отстоящих друг от друга на $100 \pm 300 \text{ МГц}$. Внешнее магнитное поле напряженностью до 6 кэ любой ориентации практически не влияет ни на значение $E_{\Pi}(\omega)$, ни на спектр излучения.

При прочих равных условиях порог излучения, как правило, ниже в образцах с ббльшей подвижностью дырок, ббльшей длиной в направле-

нии электрического поля и ббльшей электропроводностью. Уменьшение длительности питающего импульса ведет к росту $E_{\Pi}(\omega)$, особенно резко при $\tau < 2 \text{ мксек}$ (рис.1). Разогрев образца также сопровождается повышением $E_{\Pi}(\omega)$, одновременно снижается интенсивность излучения. При $T = 300^{\circ}\text{K}$ значение E_{Π} примерно в $2 \div 3$ раза больше, чем при $T = 77^{\circ}\text{K}$. Минимальное значение $E_{\Pi} \approx 80 \text{ в/см}$ было получено при $T = 77^{\circ}\text{K}$, $\omega/2\pi = 1 \div 1,5 \text{ ГГц}$, $\tau = 6 \text{ мксек}$ на образце длиной 4 мм с $\rho \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_n \approx 8300 \text{ см}^2/\text{в.сек}$ ориентированном вдоль оси z .

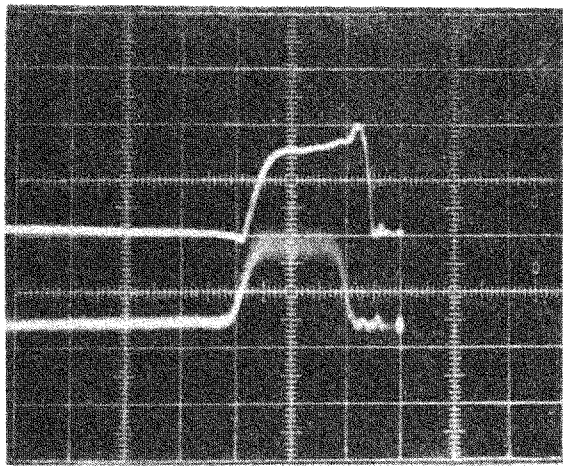


Рис.2 Оциллограммы импульса тока (нижняя) и огибающей СВЧ импульса (верхняя). Горизонтальная шкала 1 мксек/дел , вертикальная шкала 10 в/дел

Начало СВЧ импульса, как правило, отстает от начала питающего импульса на $\Delta\tau \approx 0,1 \div 0,3 \text{ мксек}$, с увеличением мощности и длительности последнего $\Delta\tau$ уменьшается. Наблюдается также "послесвечение" кристалла — СВЧ излучение индицируется в течение $0,1 \div 0,2 \text{ мксек}$ после окончания питающего импульса (рис.2).

Вольт-амперные характеристики большинства исследованных кристаллов в полях $E < 10^3 \text{ в/см}$, при которых наблюдалось СВЧ излучение, близки к линейным. На некоторых сравнительно длинных ($l \approx 4 \text{ см}$) образцах в полях $E \geq 150 \div 300 \text{ в/см}$, близких к пороговым значениям, отмечалось плавное отклонение от закона Ома, наступающее через $0,2 \div 0,4 \text{ мксек}$ после начала питающего импульса и соответствующее небольшому (на $20 \div 40\%$) увеличению дифференциального сопротивления образца. При этом на начальном участке импульса тока имелся характерный выброс, длительностью около $0,5 \text{ мксек}$ (рис.2).

В области сильных полей ($E \geq E_{кр} \approx 10^3$ в/см) на вольт-амперных характеристиках регистрируется легко воспроизводимый S-образный участок (рис.1), наблюдавшийся ранее при более коротких импульсах ($\tau \approx 15 + 36$ нсек) и в более сильных полях ($E \approx 3$ кв/см) и приписываемый разогревшему возбуждению легких дырок [1]. Интенсивность СВЧ излучения на этом участке обычно резко падает. Значение $E_{кр}$ уменьшается по мере увеличения среднего тока, протекающего через кристалл.

Из возможных механизмов возникновения СВЧ излучения в теллуре наиболее вероятным нам представляется преобразование СВЧ акустических колебаний, возбуждаемых в кристаллах теллура дрейфующими носителями тока, в электромагнитные. Такое предположение согласуется с данными о сильно выраженных пьезоэлектрических свойствах теллура, достаточных для усиления ультразвука [2], и позволяет правдоподобно объяснить основные особенности наблюдаемого эффекта – пороговый характер излучения, его зависимость от частоты, длительности импульса, параметров кристалла и температуры. Такие характерные детали, как изменение тока в начале импульса и задержка СВЧ излучения (рис.2), можно связать с временами развития и затухания акустической неустойчивости в кристалле; увеличение порогового поля при коротких импульсах – с уменьшением времени протекания тока по сравнению с временем прохождения акустических волн через образец; падение интенсивности излучения с частотой – с ростом акустических потерь и т.д. Однако для окончательного суждения о природе СВЧ излучения в теллуре необходимы более детальные экспериментальные исследования.

Авторы благодарны С.С.Шалыту и И.И.Фарбштейну, любезно предоставившим кристаллы теллура.

Поступила в редакцию
18 июля 1969 г.

Литература

- [1] G.Nimtz, K.H.Seeger. Appl. Phys. Lett., 14, 19, 1969.
- [2] T.Ishiguro, T.Tanaka. J. Phys. Soc. of Jap., 21, Supplement, p.489, 1966.