

*Письма в ЖЭТФ, том 10, стр. 257 – 260*

*20 сентября 1969 г.*

## ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ВИСМУТЕ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

*Г.И.Левиев, Э.Г.Яцин*

В ряде работ (см., например, [1]) исследовался вопрос об отражении света от поверхности металлов с излучением второй гармоники, возбуждаемой током  $\mathbf{j}$  нелинейно (квадратично) связанным с полями  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  (для изотропных сред с центром инверсии)

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \alpha [\mathbf{E} \mathbf{H}] + \beta \mathbf{E} \operatorname{div} \mathbf{E} . \quad (1)$$

В работе [1] показывается, что в оптическом диапазоне вклад в нелинейные константы  $\alpha$  и  $\beta$  дают как электроны проводимости, так и связанные электроны. С другой стороны, нелинейные свойства металлов традиционно исследуются в гальваномагнитных экспериментах. Нелинейная связь тока с достаточно слабыми полями обычно записывается в виде [2]

$$E_i = \rho_{ij} j_j + \epsilon_{ijk} i_j R_{km} H_m + \rho_{ijmn} i_j H_m H_n \quad (2)$$

(здесь  $\epsilon_{ijk}$  — единичный антисимметричный тензор). Второй член (2) описывает эффект Холла. В случае переменных полей с этим членом связана генерация второй гармоники и эффект детектирования. С последним членом связано магнетосопротивление. Представляет интерес исследовать нелинейные свойства металла в СВЧ диапазоне. В отличие от оптического диапазона, здесь основную роль играют свободные носители, и кроме того, последний член в (1) несуществен. В отличие от статики здесь могут играть роль явления временной и пространственной дисперсии.

В настоящей работе экспериментально исследуется генерация второй гармоники в СВЧ диапазоне на висмуте. Висмут выбран потому, что в нем концентрация носителей мала; это приводит к большей константе Холла по сравнению с другими металлами и к лучшему проникновению поля в металл.

Эксперимент проводился при комнатной температуре. Образец из монокристалла висмута, выращенного по методу, изложенному в работе [3], помещался на дне двухмодового резонатора из меди. Резонатор на моде  $E_{010}$  возбуждался от мощного импульсного СВЧ генератора (10 кВ) на частоте 9200 МГц. Использование импульсного режима с коротким импульсом ( $10^{-6}$  сек) позволяет избежать нагрева образца. Размеры резонатора были подобраны так, что мода  $H_{111}$  имела частоту второй гармоники, т.е. 18400 МГц. Кристалл висмута, имеющий форму диска (диаметр 17,8 мм) с зеркальными плоскими поверхностями, крепился в резонаторе проводящим клеем.

Рассмотрим нелинейный ток, взятый из (2):

$$j = [E \hat{a} N]. \quad (3)$$

Для висмута, если ось  $X_1$  — бинарная,  $X_3$  — тригональная:

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = -R_{11}/\rho_{22}\rho_{33} \gg \alpha_{33} = -R_{33}/\rho_{11}^2$$

$E, H$  поля СВЧ в металле основной частоты. Ток с частотой  $2\omega$  является сторонним током, возбуждающим моду  $H_{111}$ . Для эффективного воз-

буждения второй гармоники необходимо, чтобы сторонний ток имел тангенциальную составляющую, определенную тангенциальными компонентами полей частоты  $\omega$ . Это возможно из-за анизотропии  $\hat{a}$ . Образец имел следующую ориентацию. Бинарная ось была расположена в плоскости образца, а тригональная составляла угол  $45^\circ$  с нормалью к поверхности.

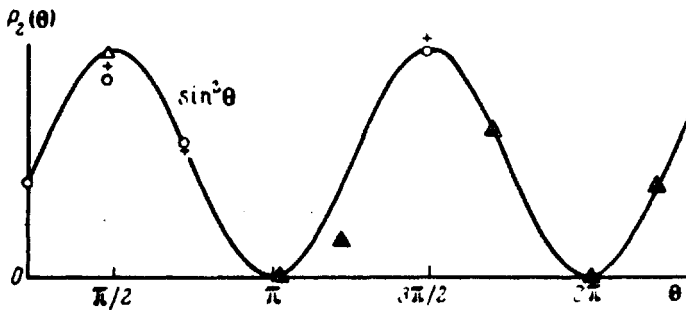


Рис. 1

Для вычисления поля второй гармоники в резонаторе использовались формулы возбуждения резонатора сторонним током (см., например, [4]), собственные моды резонатора с учетом поля в металле определялись приближенно с помощью граничных условий М.А. Леонтовича. Мощность второй гармоники, выходящая из резонатора, записывается в следующем виде:

$$P_2 = A Q_1^2 Q_2 P_1^2 R_{11}^2 \sigma \sin^2 \theta .$$

Здесь  $P_1, P_2$  — мощности на частотах  $\omega$  и  $2\omega$ ;  $Q_i$  — нагруженные добротности обеих мод,  $\sigma$  — проводимость висмута.  $A = 1,1 \cdot 10^5$  абс. ед. — фактор, учитывающий геометрию резонатора,  $\theta$  — угол между проекцией тригональной оси на плоскость образца и магнитным полем моды  $H_{111}$  в центре образца. Формула (4) получена для случая резонанса, согласования на обеих модах, и в пренебрежении анизотропией поверхностного импеданса образца. Поворот образца в резонаторе показывает хорошее совпадение угловой зависимости мощности второй гармоники с законом  $\sin^2\theta$  (рис. 1). Квадратичная зависимость мощности второй гармоники от мощности на основной частоте также хорошо выполняется (рис. 2). Была проведена оценка константы  $R_{11}$  по формуле [4]. При  $P_1 = 6,3$  квт,  $Q_1 \sim Q_2 \sim 1400$ ,  $P_2 = 7,5 \cdot 10^{-5}$  вт,  $\sigma \sim 10^{16}$  абс. ед. получаем, что  $R_{11} = (2,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-20}$  абс. ед.

Известно, что при комнатной температуре длина свободного пробега электронов в висмуте  $\ell$  сравнима с глубиной скин-слоя  $\delta$  на частоте

те  $10^{10}$   $\Omega$  ( $\ell \sim 3 \mu\text{к}$  [5]). Однако на величине поверхностного импеданса висмута это не проявляется. Измеренная нами величина  $R_{11}$  также не отличается от статической. Тем не менее, авторы работ по магнетосопротивлению [6, 7] отмечают наличие сильной дисперсии в СВЧ диапазоне.

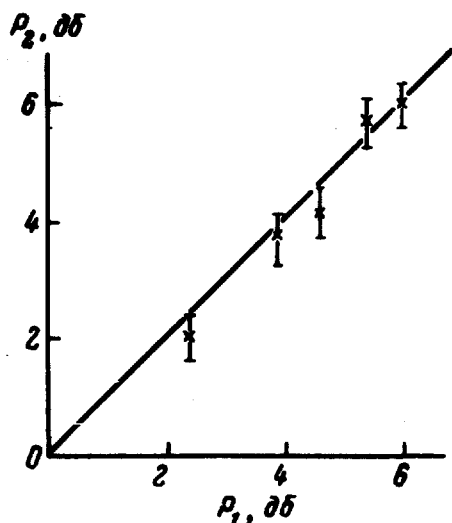


Рис. 2

Авторы благодарят В.Ф.Гантмахера за предоставление образцов висмута и интерес к работе, В.М.Файна за обсуждения, В.И.Тальянского за сотрудничество в проведении эксперимента.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
28 июля 1969 г.

### Литература

- [1] N.Bloembergen, R.K.Chang, S.S.Jha, C.H.Lee. Phys. Rev., 174, 813, 1968.
- [2] T.Okada. J. Phys. Soc. Japan, 12, 1327, 1957.
- [3] В.Ф.Гантмахер, Ю.В.Шарвин, ПТЭ №6, 115, 1963.
- [4] Л.А.Вайнштейн. Электромагнитные волны. М., 1957.
- [5] A.V.Pippard, R.G.Chambers. Proc. Phys. Soc., A, 65, 955, 1952.
- [6] C.W.Heaps. Phys. Rev., 80, 892, 1950.
- [7] D.E.Clark, J.G.Assenheim. British Journ. Appl. Phys., 11, 35, 1960.