

## КОГЕРЕНТНОЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ АНТИМОНИДА ИНДИЯ *n*-ТИПА

*В. Н. Кобызев, А. С. Тагер*

В многочисленных работах, посвященных изучению СВЧ излучения антимоноида индия (см., например, [ 1, 2 ]), наблюдаемое излучение, как правило, имело непрерывный спектр шумового характера. В электрических полях  $E > 50$  в/см излучение, близкое к когерентному, смогли получить до сих пор, по-видимому, только Робинзон и Шварц, использовавшие специальные кристаллы  $p$ -InSb с нарезанными на боковой грани поперечными канавками шириной  $10 + 25$  мкм и глубиной  $10 + 15$  мкм [ 3, 4]. Механизм этого излучения авторы [ 3, 4] связывают с неустойчивостью тонких слоев двухкомпонентной столкновительной плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях.

В настоящей работе сообщается о наблюдении когерентного СВЧ излучения кристаллов  $n$ -InSb, на свободной боковой поверхности которых отсутствовали заметные неоднородности. Исследование проводилось в интервале температур  $77 + 100$  °К.

СВЧ излучение индицировалось в диапазоне частот  $1,5 + 5$  ГГц с помощью широкополосного приемника прямого усиления на лампах бегущей волны. Для анализа спектра излучения использовались перестраиваемый резонансный фильтр с полосой  $10 + 15$  МГц и супергетеродинный приемник типа П5-7 с полосой УПЧ 5 МГц.

Образец устанавливался в разрыв внутреннего проводника коаксиала с волновым сопротивлением 50 ом, который помещался между полюсами электромагнита так, что ток через образец всегда был перпендикулярен магнитному полю.

Импульсы напряжения  $U$  (тока  $I$ ) длительностью  $0,2 + 10$  мксек подавались на кристалл от источника с внутренним сопротивлением  $2,2$  ком.

Ток через кристалл с сопротивлением  $0,8 + 4 \text{ ком}$  определялся по падению напряжения на последовательно включенном омическом сопротивлении  $100 \text{ ом}$ .

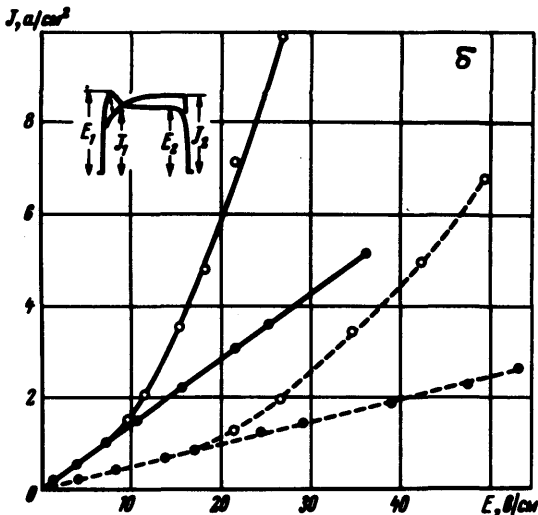
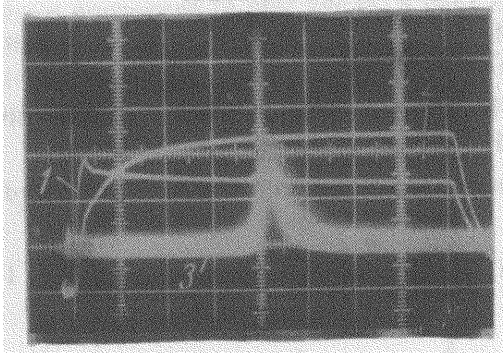


Рис. 1. *a* — осциллограммы тока, напряжения и огибающей СВЧ импульса: 1 — импульс напряжения, 2 — импульс тока, 3 — СВЧ импульс; *б* — вольт-амперная характеристика образца №8:

$$\begin{aligned}
 H = 0 & - J_1(E_1) \text{ — } \bullet \text{ — } \\
 & J_2(E_2) \text{ — } \circ \text{ — } \\
 H = 2,3 \text{ кэ} & - J_1(E_1) \text{ - - } \bullet \text{ - - } \\
 & J_2(E_2) \text{ - - } \circ \text{ - - }
 \end{aligned}$$

Когерентное СВЧ излучение наблюдалось на компенсированных кристаллах InSb со сравнительно низкой концентрацией ( $n = 0,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и подвижностью ( $\mu = 1,17 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$  при  $T = 77^\circ\text{K}$ ) электронов. Длина кристаллов  $L$  составляла около  $4 \text{ мм}$ , поперечное сечение варьировалось в пределах от  $0,69 \times 1,08$  до  $0,85 \times 0,34 \text{ мм}^2$ . Все грани кристаллов полировались. Специально контролировалось отсутствие поверхностных шероховатостей и трисок глубиной больше  $0,5 \text{ мкм}$ . Контакты на торцевых гранях создавались индием с нейтральным флюсом.

Характерной особенностью описываемых образцов являются сравнительно высокие значения контактных сопротивлений для одного или обоих контактов, превышающие в 1,5 + 3 раза объемное сопротивление кристалла. По мере увеличения амплитуды питающего импульса полное сопротивление образца более или менее резко (в зависимости от состояния контактов и полярности импульса) уменьшается, причем, когерентное излучение возникает тем раньше, чем это уменьшение резче. Процесс установления нового значения сопротивления длится  $\tau \approx 0,3 + 1,5$  мксек, ускоряясь при увеличении приложенного напряжения. Этому соответствуют характерные формы импульсов напряжения и тока, а также суперлинейные вольт-амперные характеристики образцов (рис. 1 а, б).

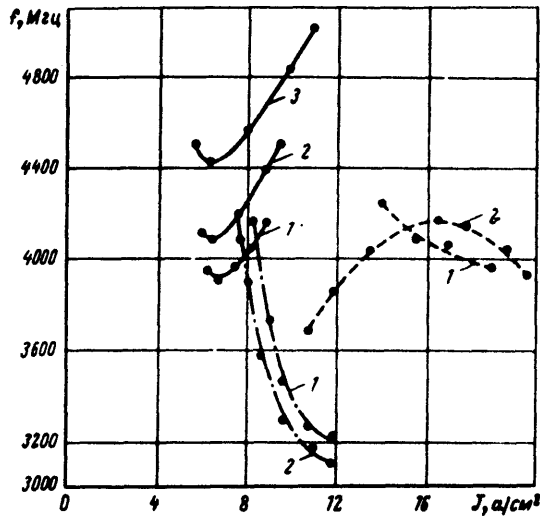


Рис. 2. Зависимость частоты излучения  $f$  от плотности тока  $J$  для образцов:  
 №6 ( $4,0 \cdot 0,65 \cdot 0,46$  мм<sup>3</sup>) - - - - ,  
 [ 1] -  $H = 4200$  э, [ 2] -  $H = 4900$  э;  
 №8 ( $4,2 \cdot 0,75 \cdot 0,43$  мм<sup>3</sup>) — — — ,  
 [ 1] -  $\Delta t = 1$  мксек, [ 2] -  $\Delta t = 2$  мксек;  
 №5 ( $4,2 \cdot 1,02 \cdot 0,69$  мм<sup>3</sup>) — — — ,  
 [ 1] -  $H = 1525$  э, [ 2] -  $H = 1925$  э,  
 [ 3] -  $H = 2100$  э

Излучение возникает на одной или нескольких частотах указанного диапазона, начиная с некоторых (пороговых) значений напряженности магнитного поля  $H = H_{II}$  и плотности тока  $J = J_{II}(H)$  или средней напряженности электрического поля  $E = U/L$ , которые для исследованных образцов лежат в пределах  $H_{II} \approx 1100 + 5000$  э,  $J_{II} = 3 + 10$  а/см<sup>2</sup>,  $E_{II} \approx 50 + 150$  в/см. По мере увеличения тока спектр излучения постепенно расширяется и оно принимает обычный шумовой характер.

Изучение спектра когерентного излучения вдоль импульса в зависимости от амплитуды последнего показало, что значение частоты излучения  $f(\Delta t)$  в момент, отстоящий на время  $\Delta t$  от начала импульса, определяется в основном значениями  $H$ ,  $J$  и  $\Delta t$  и не связано непосредственно со средней величиной электрического поля в образце  $E = U/L$ .

На рис. 1, а представлена осциллограмма импульсов тока и напряжения, а также огибающей СВЧ излучения, прошедшего через узкополосный фильтр. Увеличение тока при неизменной настройке фильтра (т. е. фиксированной частоте излучения) сопровождается перемещением "пичка" СВЧ излучения вдоль импульса, так что значение тока  $J$  в момент появления "пичка" остается примерно постоянным, тогда как поле  $E$  заметно меняется.

Зависимости частоты излучения  $f$  от указанных параметров вполне регулярны и хорошо воспроизводимы. Частота когерентных колебаний в большинстве случаев уменьшается с ростом интервала  $\Delta t$ , а с увеличением тока может как уменьшаться, так и возрасти. Наклон кривой  $f(J)$  может изменяться с  $H$ , переходя по мере увеличения  $H$  от отрицательного к положительному (рис. 2).

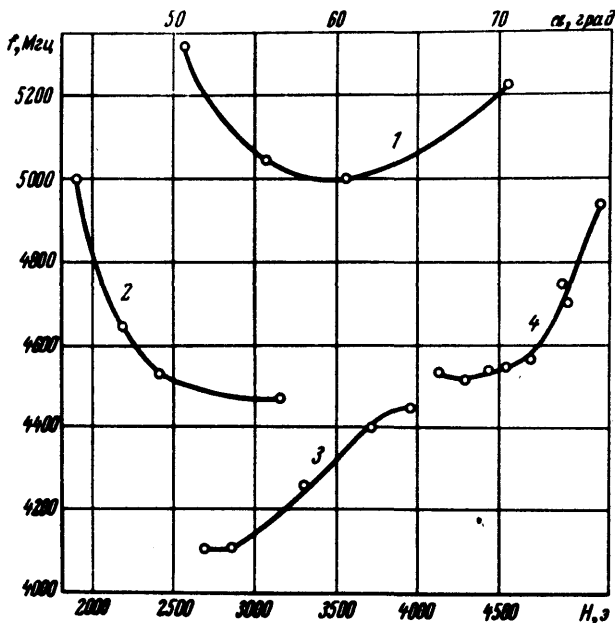


Рис. 3. Зависимость частоты излучения  $f$  от азимутального угла  $\alpha$  [1] и от напряженности поперечного магнитного поля  $H$  [2 - 4], [1] -  $f(\alpha)$ , для образца №8, [2 - 4] -  $f(H)$ , для образцов №8, 5 и 6 соответственно

Зависимость  $f(H)$  также может быть как нарастающей, так и падающей (рис. 3). Крутизна перестройки частоты варьируется в широких пределах, достигая  $700 \text{ МГц/ма}$  и  $1 \text{ МГц/э}$ . Когерентное излучение критично к ориентации образца в поперечном магнитном поле, как правило, оно наблюдается в узких интервалах углов ( $\Delta\alpha \approx 10 + 15^\circ$ ), вблизи наибольших значений магнетосопротивления. Зависимость  $f(\alpha)$  при  $H = \text{const}$  (рис. 3) определяется изменением с  $\alpha$  компоненты  $H$ , нормальной широкой грани образца.

Механизм описываемых явлений пока недостаточно ясен. Можно предполагать, что они связаны с неустойчивостью магнитоактивной электронно-дырочной плазмы, возникающей вблизи одного из контактов в результате инжекции дырок или ударной ионизации. Время установления стационарного значения сопротивления кристалла  $0,3 + 1,5$  мксек (см. рис. 1, а) определяется, по-видимому, скоростью заполнения плазмой приконтактного участка с повышенным удельным сопротивлением. Концентрация плазмы на этом участке может намного превышать концентрацию электронов ( $n_0 = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) в объеме кристалла и достигать значений  $p \approx n \geq 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , достаточных для возникновения двухпоточной неустойчивости в InSb [4]. Однако, теория, развитая для этого случая в [4], не объясняет экспериментальных зависимостей даже качественно. Поэтому вопрос о природе когерентного излучения из InSb требует дальнейшего изучения.

Институт электронной техники

Поступила в редакцию  
15 апреля 1971 г.

### Литература

- [1] B.Ancker-Jonson. J. Appl. Phys., **39**, 3365, 1968.
- [2] M.Glicksman, IBM J. Research. Development, **13**, 626, 1969.
- [3] B.B.Robinson, G.A.Swartz. Appl. Phys. Lett., **9**, 232, 1966.
- [4] B.B.Robinson, G.A.Swartz. J. Appl. Phys., **40**, 4598, 1969.