

РАДИОЧАСТОТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА С НЕОДНОРОДНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

В.Д.Курносов, Г.А.Лапицкая, А.А.Плешков,
Л.А.Ривлин, В.Г.Трухан

Неоднородно инжектируемый полупроводниковый квантовый генератор (ПКГ), составленный из участков с отрицательным и положительным поглощением света, обладает сильной оптической нелинейностью, проявляющейся в сложной динамике излучения ПКГ (автомодуляция, синхронизация и другие явления – см., например, обзор [1]). Как отмечено в [2], ПКГ с такой оптической нелинейностью способен вызвать возбуждение стимулированных релаксационных колебаний в присоединенном к нему контуре.

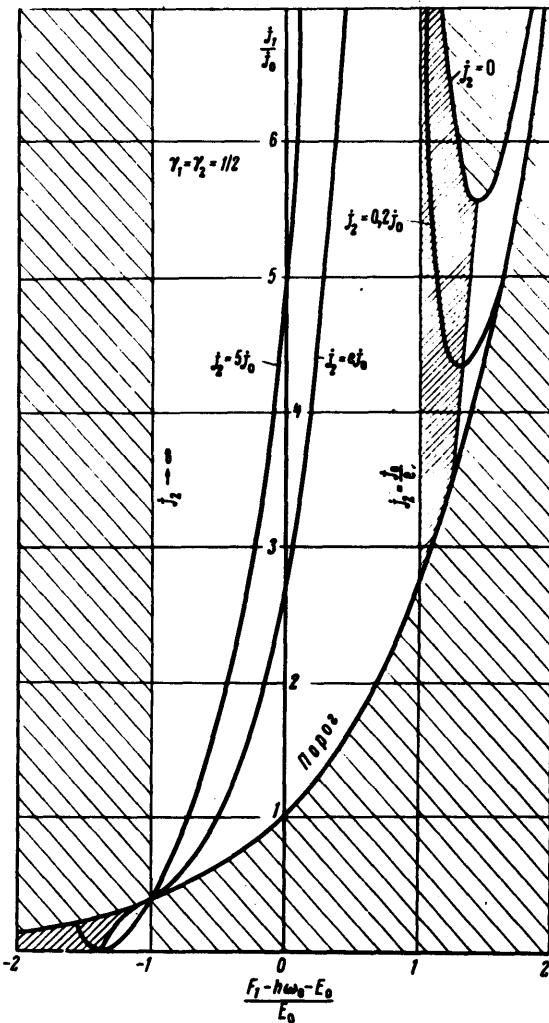


Рис. 1

Существо явления состоит в том, что пульсации оптического излучения ПКГ с неоднородной инжекцией сопровождается соответствующим движением электронных квазиуровней Ферми F , а следовательно и возникновением переменной ЭДС, которая при достаточной положительной обратной связи вызы-

вает раскачку радиочастотного контура. Если период колебаний значительно превышает времена электронных и оптических переходных процессов в ПКГ, то можно, используя стационарные решения скоростных уравнений ПКГ с неоднородной инжекцией (формула (9) из [3]), отыскать падающие участки вольт-амперных характеристик ПКГ из выражения

$$i_1 = -\frac{\gamma_2(F_1 - \hbar\omega_0)}{\gamma_1(F_1 - \hbar\omega_0) - E_0} \left[i_0 \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0}\right) - i_2 \right] + i_0 \exp\left(\frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0}\right) \quad (1)$$

связывающего плотности токов инжекции i_1 и i_2 на участках ПКГ с относительными протяженностями γ_1 и γ_2 ($\gamma_1 + \gamma_2 = 1$) и квазиуровень Ферми F_1 на одном из участков (здесь $\hbar\omega_0$ — энергия фотонов, излучаемых ПКГ, E_0 — параметр легирования,

$$i_0 = \frac{2e}{\pi^2} \frac{\epsilon d E_0 \alpha}{c^2 \hbar^3 \eta} (\alpha \beta) (\hbar\omega_0)^2 = \text{const}$$

ϵ — заряд электрона, $e = 2,73$, d — диффузионная длина, α — коэффициент потерь ПКГ, $(\alpha \beta)$ — температурный фактор, c — скорость света в полупроводнике, η — квантовая эффективность инжекции). Стационарные решения (1) получены в [3] в однодиффузионном приближении применительно к арсениду галлия для излучательных переходов между узким акцепторным уровнем и экспоненциальным "хвостом" у дна зоны проводимости.

Зависимости $i_1(F_1)$ с i_2 в качестве параметра, построенные по (1) (рис. 1) и дающие представление о виде соответствующих вольт-амперных характеристик перехода, смещенного в прямом направлении, свидетельствуют о возникновении отрицательного сопротивления в двух областях диаграмм с густой штриховкой. Эти области, где $dj_1/dF_1 < 0$, для $i_1 > i_2$ (положительные значения аргумента) ограничены кривыми

$$i_1 = i_0 \exp \frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0};$$

$$\left. \frac{F_1 - \hbar\omega_0}{E_0} \right|_{i_2 = \frac{i_0}{e}} = \frac{1}{\gamma_1};$$

$$i_1 \Big|_{i_2 = 0} = i_0 \left[1 + \gamma_2 \frac{F_1 - \hbar\omega_0}{\gamma_1 F_1 - \gamma_1 \hbar\omega_0 - E_0} \exp\left(-\frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{\gamma_2 E_0}\right) \right] \exp\left(\frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0}\right)$$

$$\text{и} \quad i_1 = i_0 \left\{ \frac{\gamma_1}{E_0^2} (F_1 - \hbar\omega_0)^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{\gamma_2 E_0}\right) \right] - \frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0} \right\} \exp\left(\frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0}\right),$$

а для $i_1 < i_2$ (отрицательные значения аргумента) — кривыми $i_1 = 0$;
 $i_1 = i_0 \exp\left(\frac{F_1 - \hbar\omega_0 - E_0}{E_0}\right)$ и последней кривой предыдущего случая.

В эксперименте рассматриваемое явление обнаружено в ПКГ из арсенида галлия, изготовленного по диффузионной технологии, с разделительным сопротивлением между областями инжекции около 10 ом , в условиях азотного криостатирования. Колебательный контур, присоединенный к поглощающему участку ПКГ, состоял из нескольких витков провода с индуктивностью L менее 1 мкгн , и собственной емкости ПКГ (рис. 2). На рис. 3, а представлена фотоосциллограмма оптического излучения ПКГ, промодулированного возбужденными им в контуре колебаниями с частотой $f = 12 \text{ МГц}$. Линейная зависимость обратного квадрата частоты $1/f^2$ от индуктивности L (рис. 2 — два образца) свидетельствует о стимулированном характере возбуждающихся в контуре колебаний. Собственная емкость ПКГ по данным этих экспериментов равна приблизительно 2000 пф , что составляет несколько микрофард на квадратный сантиметр перехода.

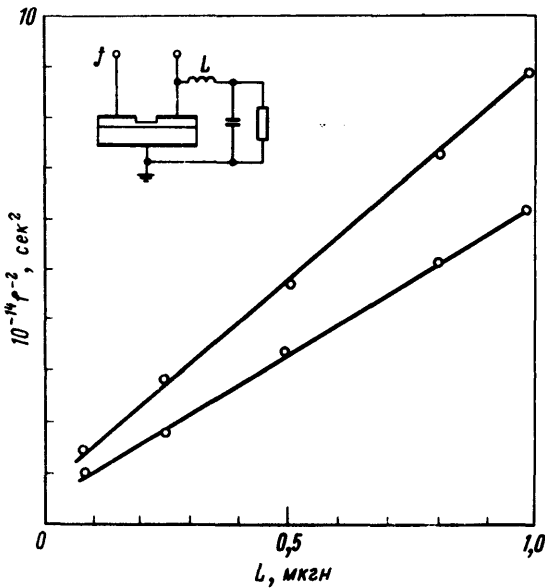


Рис. 2

Фотоосциллограмма электрических колебаний с частотой 250 МГц в контуре, образованном отрезком короткозамкнутого кабеля с волновым сопротивлением 25 ом , и синхронные с ними пульсации излучения ПКГ, зарегистрированные по методике [4], даны на осциллограммах 3, б и 3, в соответственно. Обращает на себя внимание несинусоидальный характер электрических колебаний, свидетельствующий об одновременном возбуждении в контуре с распределенными реактивностями многих сфазированных друг с другом гармонических составляющих, наличие которых отмечено в [2].

Оптические пульсации, вызванные наиболее высокочастотными автоколебаниями, ($f \approx 1000 \text{ МГц}$) в контуре, образованном отрезком кабеля длиной 5 см , зарегистрированы на сканирующем электронно-оптическом преобразователе (фотосинхрограмма на рис. 3, г). Во всех случаях оптические и электрические пульсации возникали только при присоединении к ПКГ радиочастотного контура.

Для дальнейшего повышения частоты f следует использовать волноводные колебательные системы с распределенным взаимодействием, осуществив синхронизм между замедленной электромагнитной волной и электронным возмущением в ПКГ с периодически чередующимися участками инжекции [2], которое также может быть представлено в виде суперпозиции бегущих волн.

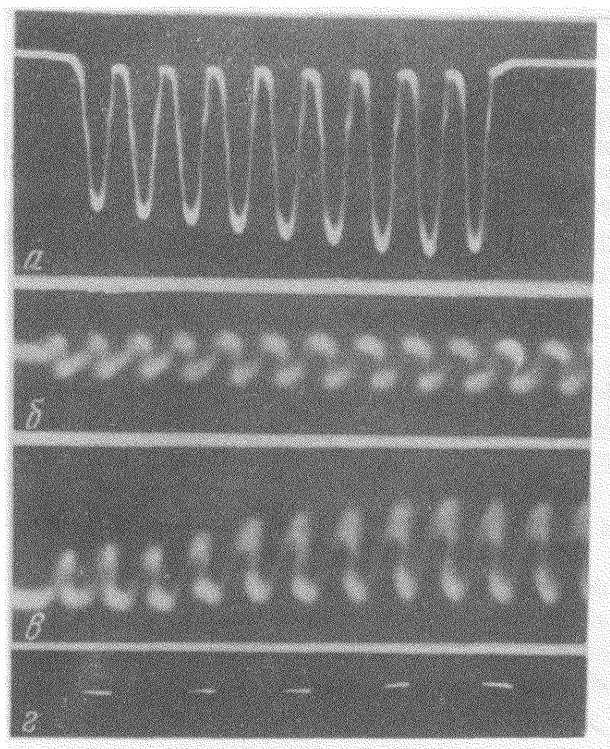


Рис. 3

В подобных ПКГ в режиме самосинхронизации мод были зафиксированы частоты оптических пульсаций до 10^5 Мгц [5] и можно надеяться на повышение частоты еще на порядок. Таким образом, верхняя частотная граница обнаруженного явления лежит, по-видимому, в области далекого инфракрасного излучения.

Поступила в редакцию
13 марта 1970г.

Литература

- [1] Н.Г.Басов, В.В.Никитин, А.С.Семенов. УФН, 97, 561, 1969.
- [2] Л.А.Ривлин. Электронная техника. Электроника СВЧ, вып. 5, 172, 1968.
- [3] Л.А.Ривлин. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 12, 1796, 1969.

- [4] В.Д.Курносков, О.Н.Прозоров, Л.А.Ривлин. ФТП, 3, 1091, 1969.
- [5] V.D.Kurnosov, A.A.Pleshkov, L.A. Rivlin, V.V.Tsvetkov, V.S.Shildyaev.
9 International Conference on the Physics of Semiconductors Proc., 1,
550, 1968.
-