

06;09

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА С ПОДЛОЖКОЙ ЧЕРЕЗ РАСПРЕДЕЛЕННУЮ ГРАНИЦУ

© О.Т.Гаврилов, И.И.Квяткевич, И.А.Обузов,
Ю.А.Матвеев

При исследовании резонансно-туннельного диода (РТД), помещенного в 50-омный микрополосковый тракт, была обнаружена генерация белого шума. Аналогичное явление описано, например, в работе [1]. Однако там белый шум наблюдался на фоне обычной одномодовой генерации РТД в резонаторе. У нас в полосе от 10 МГц до 25 ГГц наблюдался только белый шум. Рабочая точка выбиралась на участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) РТД с отрицательной дифференциальной проводимостью. При смещении рабочей точки с этого участка генерация прекращалась. Измерялись мощность генерации и спектр излучаемых частот. Оказалось, что спектр является непрерывным и равномерным. Колебаний, превышающих шумовой уровень, ни на какой из частот обнаружено не было. Суммарная излучаемая мощность составила 20 мкВт, а спектральная плотность мощности шума оказалась равной $2.91 \cdot 10^5$.

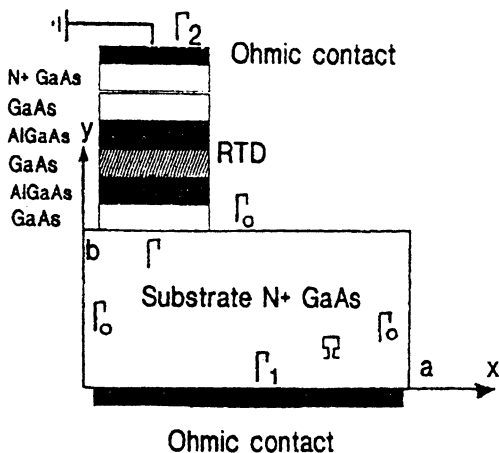
Предпринятое далее теоретическое исследование показало, что полученный результат не может быть объяснен в рамках обычной теории РТД в резонаторе [2], когда генерация возникает лишь на одной выделенной частоте. Генерация белого шума, как выяснилось, связана с нетривиальным эффектом взаимодействия РТД с подложкой через распределенную границу. На рисунке показан один из вариантов расположения РТД на подложке. Границы Γ_1 и Γ_2 соответствуют омическим контактам, на которых электрохимический потенциал электронов равен приложенному напряжению:

$$\phi(\Gamma_2) = 0, \quad \phi(\Gamma_1) = V. \quad (1)$$

Через границу Γ_0 отсутствует ток проводимости, поэтому

$$\partial\phi(\Gamma_0)/\partial\nu = 0. \quad (2)$$

Граница Γ , отделяющая РТД от подложки, является условной. Перенос заряда в РТД может быть описан только в рамках квантовой теории. Подложка же является классическим объектом. Возникает задача сшивания решений



Резонансно-туннельный диод на подложке.

уравнений переноса в этих двух областях [3]. Такое сшивание может быть осуществлено на некоторой границе Γ , находящейся в области электронейтральности и вдали от потенциальных барьеров. Потребуем на Γ :

$$-\sigma(\partial\phi/\partial\nu)|_{\Gamma} = J(\phi_{\Gamma}), \quad (3)$$

где σ — проводимость подложки; $J(\phi_{\Gamma})$ — статическая плотность тока РТД, рассчитанная в одномерном приближении. Физически условие (3) означает, что локальная плотность тока проводимости на границе Γ является чисто дрейфово-диффузионной, т. е. обусловлена классическими процессами.

Область подложки легируют донорами, как правило, не менее чем до концентраций 10^{16} см^{-3} . Максвелловское время релаксации τ_m оказывается при этом порядка 10^{-13} с . Если ограничиться рассмотрением частот

$$\omega \ll \omega_m = \tau_m^{-1}, \quad (4)$$

то можно считать подложку электронейтральной и положить в ней

$$\phi = \varphi + \text{const}, \quad (5)$$

где φ — электростатический потенциал. При условиях (4) и (5) из уравнений Максвелла и непрерывности для ϕ получим

$$(\epsilon\mu/c^2)\partial^2\phi/\partial t^2 - \Delta\phi = 0. \quad (6)$$

В случае подложки произвольной топологии и нелинейной $J(\phi_r)$ решить задачу (6), (1)–(3) удастся только численно. Однако для прояснения содержания эффекта достаточно решить аналитически упрощенную задачу. Положим, что граница Γ занимает весь отрезок $[(0, b), (a, b)]$, а для $J(\phi_r)$ справедлива линейная аппроксимация вблизи некоторой рабочей точки V_0 :

$$J(\phi) \cong J(V_0) + \lambda(\phi - V_0), \quad (7)$$

где $\lambda = (\partial J / \partial \phi)$ при $\phi = V_0$ — дифференциальная проводимость РТД. Положим, кроме того, что в z -направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, прибор не ограничен. Тогда решение уравнения (6), удовлетворяющее условиям (1) и (2), можно записать в виде

$$\phi(t, x, y, z) = V_0 + (V - V_0)y/b + \phi_1(t, x, y, z),$$

$$\begin{aligned} \phi(t, x, y, z) = \int dk_z \sum_{n=1} C_n(k_z) \cos(\pi n x / a) \operatorname{sh}(\chi(b - y)) \times \\ \times \cos(k_z z) \cos(\omega_n(k_z, \chi)t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $C_n(k_z)$ — некоторые постоянные. Для $\omega_n(k_z, \chi)$ справедливо соотношение

$$\omega_n^2(k_z, \chi) = (c^2 / \epsilon \mu) ((\pi n / a)^2 + k_z^2 - \chi^2). \quad (9)$$

Подставляя (8) в (3), с учетом (7) получим

$$(V - V_0)/b - J(V_0) = 0, \quad (10)$$

$$\sigma \chi \operatorname{ch}(\chi b) + \lambda \operatorname{sh}(\chi b) = 0. \quad (11)$$

Выражение (10) соответствует стандартной схеме РТД с нагрузочным резистором [2,3]. Соотношение же (11) есть условие существования нетривиального решения ϕ_1 . Очевидно, что при $\lambda > 0$ условие (11) не может быть выполнено при действительных χ . Легко убедиться, что уравнение (11) будет иметь корни в области действительных χ при условиях

$$\lambda = -\lambda_s < 0, \quad \sigma / \lambda_s < b. \quad (12)$$

В частности, при $\chi b \gg 1$ получим

$$\chi \cong \lambda_s / \sigma.$$

Величина χ определяется проводимостями РТД и подложки, а также геометрией последней. Варьируя указанные параметры, можно, согласно (9), изменять нижнюю граничную частоту генерации $\omega_1(k_z = 0, \chi)$. Таким образом,

появляется возможность создавать генераторы как белого шума (при непрерывном k_z), так и монохроматических колебаний (при дискретном k_z) на частотах от 0 Гц до ω_m .

Необычность полученных результатов состоит в том, что подложка может оказаться резонатором для колебаний, частоты которых не определяются только ее размерами и топологией. Появление величины χ^2 со знаком минус в выражении (9) вносит дополнительный фактор, регулирующий частоту. Благодаря наличию распределенной границы между РТД и подложкой в ней, если справедливы условия (12), возникают собственные моды нового типа. В статическом пределе $\omega \rightarrow 0$ этим модам соответствуют нетривиальные собственные решения уравнения Лапласа в области подложки с

$$\chi_n^2 = (\pi n/a)^2 + k_z^2.$$

Легко видеть, что в случае точечной границы Γ (т. е. в одномерном приближении), также при $\lambda > 0$ эффект исчезает.

В описанном выше эксперименте случайно оказалось, что $\chi \cong \pi/a$ ($\lambda_s = 1.88 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, $\sigma = 1.21 \times 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $a = 200 \text{ мкм}$). Это привело к близкой к нулю нижней граничной частоте и генерации белого шума во всей полосе пропускания микрополосковой линии.

Заметим, что при конструировании приборов условия (12) можно использовать как для получения генерации шума, так и для подавления шума как паразитного явления [1]. Для структур с более сложной геометрией, чем рассмотренная здесь, аналоги условий (12) получаются при численном моделировании.

В заключение необходимо отметить, что основные результаты, изложенные в этой заметке, получены О.Т. Гавриловым. Другие авторы лишь закончили его работу.

Список литературы

- [1] Reddy M., Yu R.Y., Kroemer H. et al. // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1995. V. 5. N 7. P. 219-221.
- [2] Brown E.R., Goodhue W.D., Solner T.C.L.G. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64 (3). P. 1519-1525.
- [3] Gavrilov O.T., Obukhov I.A. et al. // Nanostructures: Physics and Technology. Abstracts. St. Petersburg, 1993. P.56. Proceedings of NANO II. Moscow, 1993. Part C. P. 860-870.

Поступило в Редакцию
26 февраля 1996 г.