

# РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ В ТГц КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРАХ НА ОСНОВЕ GaAs/AlGaAs

Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники

РАН, Москва, Россия

Email: [ushakovDV@bsu.by](mailto:ushakovDV@bsu.by)

Источники излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот востребованы для различных применений как гражданского, так и специального назначения, включая спектроскопические задачи определения следов различных веществ в атмосфере, создание систем формирования изображений объектов, скрытых для обычных оптических систем, широкополосные системы связи и т.д. В настоящее время наиболее перспективными компактными источниками ТГц-излучения являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ) [1]. В терагерцовой области частот наибольшие достигнутые рабочие температуры составляют 117 К в непрерывном режиме [1] и 199.5 К при импульсной накачке [2]. К настоящему времени в мире достигнуты значительные успехи как в инженерии уровней энергии и волновых функций для различных каскадов из квантовых ям с целью создания эффективных схем инверсной населенности, так и в изготовлении волноводов. Наиболее эффективно в ТГц области спектра показала себя конструкция с двойным металлическим волноводом [3] (ДМВ), в котором активная область помещена между двумя металлическими слоями (рис. 1, *a*).

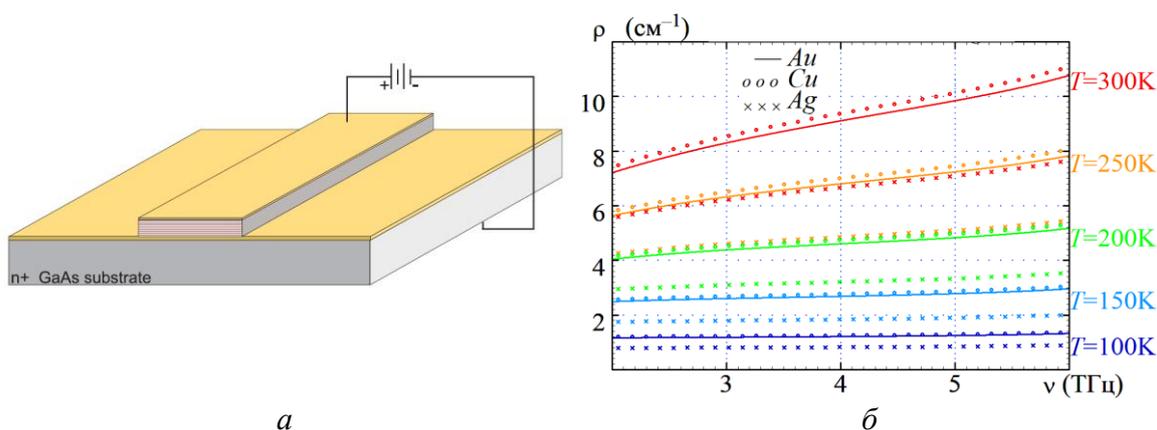


Рис. 1. *a* – Схема с двойным металлическим волноводом и  
*б* – ТГц спектры коэффициента потерь металлов при различных температурах

Фактор оптического ограничения в таких волноводах  $\sim 1$ , что значительно выше, чем в плазмонных волноводах ( $\sim 0.3$ ), эффективно работающих для ККЛ среднего ИК диапазона. Однако ККЛ с ДМВ сложны в изготовлении и требуют предварительных теоретических и экспериментальных исследований поведения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь, как металлов, так и полупроводников в ТГц области спектра.

Диэлектрическая проницаемость рассчитывалась в модели Друде на основе уравнения (1). Резонансная энергия  $\hbar\omega_p$  и энергия затухания  $kT_\tau$ , приведенные в таблице 1 находились на основе численной обработке и интерполяции экспериментальных кривых диэлектрической проницаемости металлов [4].

$$\varepsilon = 1 - \frac{\hbar\omega_p^2}{\hbar\omega(\hbar\omega + i\hbar\omega_\tau)}; \quad \hbar\omega_\tau = \frac{(kT)^2}{kT_\tau}. \quad (1)$$

Таблица 1

Параметры металлов для расчета диэлектрической проницаемости

	Au	Cu	Ag
$\hbar\omega_p$ , эВ	9.024	8.806	8.997
$kT_\tau$ , эВ	0.025	0.025	0.037

Результаты расчета коэффициента потерь металлов представлены на рис. 1, б. Как видно из рисунка, значения коэффициента потерь не превышают  $5 \text{ см}^{-1}$  для  $T < 200 \text{ К}$ , при этом наименьшие потери наблюдаются в волноводе на основе серебра.

Для создания активной области ККЛ ТГц диапазона преимущественно используется GaAs. Выражение для диэлектрической проницаемости полупроводника, содержащую фононную составляющую и слагаемое, обусловленное поглощением света свободными носителями, можно представить в виде [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{UV} + \frac{(\varepsilon_\infty - \varepsilon_{UV})\hbar\omega_{VIS}^2}{\hbar\omega(\hbar\omega + i\hbar\omega_{\tau VIS}) - \hbar\omega_{VIS}^2} + \frac{(\varepsilon_{low} - \varepsilon_\infty)\hbar\omega_{TO}^2}{\hbar\omega(\hbar\omega + i\hbar\omega_{\tau TO}) - \hbar\omega_{TO}^2} - \frac{\hbar\omega_{pGaAs}^2}{\hbar\omega(\hbar\omega + i\hbar\omega_{\tau GaAs})}. \quad (2)$$

Для проведения численных расчетов значения статической  $\varepsilon_{low}$ , ИК  $\varepsilon_\infty$ , и ультрафиолетовой  $\varepsilon_{UV}$  части диэлектрической проницаемости, а также соответствующих энергий затухания взяты из работ [5–6].

Как показывают численные расчеты (рис. 2), коэффициент потерь  $\rho$  в зависимости от частоты ведет себя не монотонно. В области низких

частот 1–2 ТГц рост потерь обусловлен поглощением света свободными носителями, а в области >7 ТГц – резонансным поглощением на ТО-фононах  $\hbar\omega_{TO} = 33.5$  мэВ. В области 5 ТГц наблюдается минимум, который растет с ростом температуры и концентрации примесей и при  $T = 300$  К составляет 25–28  $\text{см}^{-1}$  в зависимости от металла.

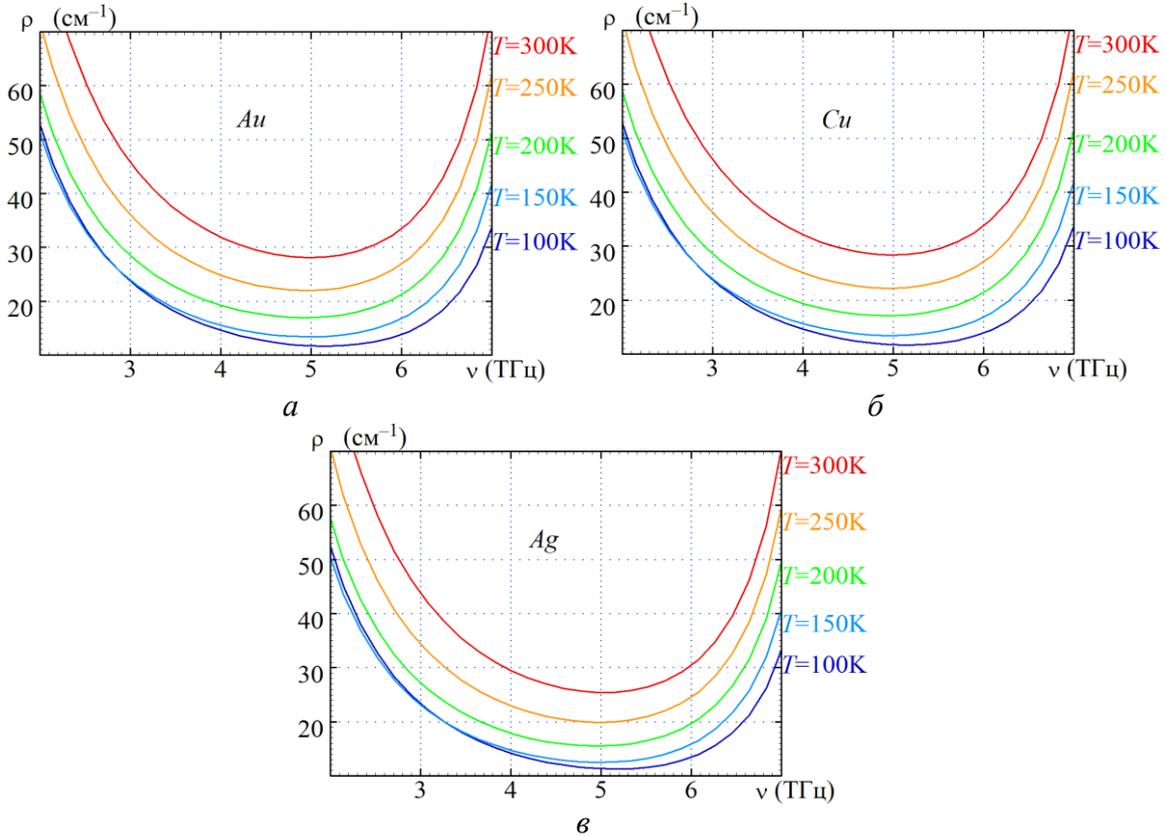


Рис. 2. Результирующие ТГц спектры коэффициента потерь в ККЛ с двойным металлическим волноводом на основе Au (а), Cu (б) и Ag (в) при различных температурах.  $N_d = 6.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\hbar\omega_{\text{TO}} = 0.2$  мэВ, [5]

1. Williams B.S. // Nature Photonics. 2007. V. 1. P. 517–525.
2. Williams B.S., Kumar S., Hu Q., and Reno J.L. // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 3331–3339.
3. Fathololoumi S., Dupont E., Chan C.W.I. et al. // Optics Express. 2012. Vol. 20. P. 3866–3876.
4. Unterrainer K., Colombelli R., Gmachl C., et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 3060–3062.
5. Ordal M.A., Long L.L., Bell R.J. et al. // Appl. Optics. 1983. V. 22. P. 1099–1119.
6. Moore W.J., Holm R.T. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. P. 6939–6942.
7. Blakemore J.S. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. R123–R181.