

Оптические потери в ККЛ ТГц диапазона с ДМВ на основе Ti/Au, Ta/Au и Ta/Cu

Д. В. Ушаков¹⁾, А. А. Афоненко¹⁾, Р. А. Хабибуллин²⁾,
А. А. Дубинов³⁾, В. И. Гавриленко³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: ushakovdv@bsu.by

²⁾Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова,
Москва, Россия

³⁾Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

Для GaAs/AlGaAs квантово-каскадного лазера (ККЛ) с двойным волноводом (ДМВ) на основе металлических обкладок Au и Cu и слоев адгезии Ti и Ta проведен расчет параметров затухания и ТГц спектров модовых потерь. Показано, что для минимизации потерь в высокотемпературных дизайнах ДМВ ККЛ в качестве слоев адгезии для Au целесообразно использовать Ti толщиной <5 нм или Ta толщиной <10 нм.

Ключевые слова: двойной металлический волновод; слои адгезии; коэффициент потерь; квантово-каскадный лазер; терагерцевый диапазон.

Optical losses in THz QCLs with DMWG based on Ti/Au, Ta/Au and Ta/Cu

D. V. Ushakov¹⁾, A. A. Afonenko¹⁾, R. A. Khabibullin²⁾,
A. A. Dubinov³⁾, V. I. Gavrilenko³⁾

¹⁾Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: ushakovdv@bsu.by

²⁾Mokerov Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics, Moscow, Russia

³⁾Institute for Physics of Microstructures, Nizhny Novgorod, Russia

For a GaAs/AlGaAs quantum cascade laser (QCL) with a double waveguide (DMWG) based on Au and Cu metal plates and Ti and Ta adhesion layers, the Drude damping parameters and THz mode loss spectra were calculated. It has been shown that to minimize losses in high-temperature DMWG QCL designs, it is advisable to use Ti less than 5 nm thick or Ta less than 10 nm thick as adhesion layers for Au.

Keywords: double metal waveguide; adhesion layers; loss coefficient; quantum cascade laser; terahertz range.

Введение

Для квантово-каскадных лазеров (ККЛ) ТГц области спектра эффективно показала себя конструкция с двойным металлическим волноводом (ДМВ), в которой активная область помещена между двумя металлическими слоями [1]. Фактор оптического ограничения в таких волноводах $\Gamma \sim 1$, что значительно выше, чем в плазмонных волноводах ($\Gamma \sim 0.3$), эффективно работающих для ККЛ среднего ИК диапазона. Обычно в качестве металлических контактов используют золото (Au), медь (Cu) и более редко серебро (Ag) [2–4]. Для разработки более эффективных рабочих схем ККЛ и оптимизированного дизайна волновода ТГц излучения, необходима информация о потерях в ТГц ККЛ в широком диапазоне температур и частот [3–6]. К примеру, использование Cu в качестве обкладок ДМВ позволило снизить потери и увеличить максимальную рабочую температуру ТГц ККЛ в импуль-

сном режиме до ~200 К [2, 3]. Однако благородные металлы нельзя наносить непосредственно на поверхности полупроводников из-за плохой адгезии и возможности твердотельной диффузии между полупроводником и благородным металлом во время высокотемпературных процессов. Поэтому наносят промежуточный металл, который выполняет функции прочно прикрепленного адгезионного слоя и диффузионного барьера. Типичным адгезионным слоем для Au является титан (Ti), а для Cu – тантал (Ta). В настоящей работе рассмотрено влияние толщины и материала слоев адгезии на спектры модовых потерь ККЛ ТГц диапазона.

1. Удельное сопротивление и параметр затухания металлических слоев

Диэлектрическая проницаемость металла в ТГц области спектра обычно описывается в модели Друде:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_d)}, \quad \omega_p = \left(\frac{ne^2}{m\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где ω_p – плазменная частота, n – концентрация свободных электронов, e – заряд электрона, m – эффективная масса электрона и ε_0 – диэлектрическая постоянная в вакууме. Параметр затухания γ_d определяет потери в металлических слоях и прямо пропорционален удельному сопротивлению $\gamma_d = ne\rho/m$. Температурные зависимости удельного сопротивления металлических слоев Au, Cu, Ti и Ta представлены на рис. 1, а. Удельное сопротивление слоев Ti растет от 30 до 54 мкОм·см при изменении температуры от 80 до 200 К, что практически на порядок больше, чем у слоев Ta (2.7–8.4 мкОм·см для диапазона температур 80–200 К). При расчете параметра затухания материальные параметры для металлических слоев брались из работ [5, 7, 8]. Как видно из рис. 1, б, энергия затухания растет с увеличением температуры и для диапазона 80–200 К составляет: 12.3–25.2 мэВ (Au), 9.5–19.8 мэВ (Cu), 324.2–563.3 мэВ (Ti), 27.6–88.4 мэВ (Ta).

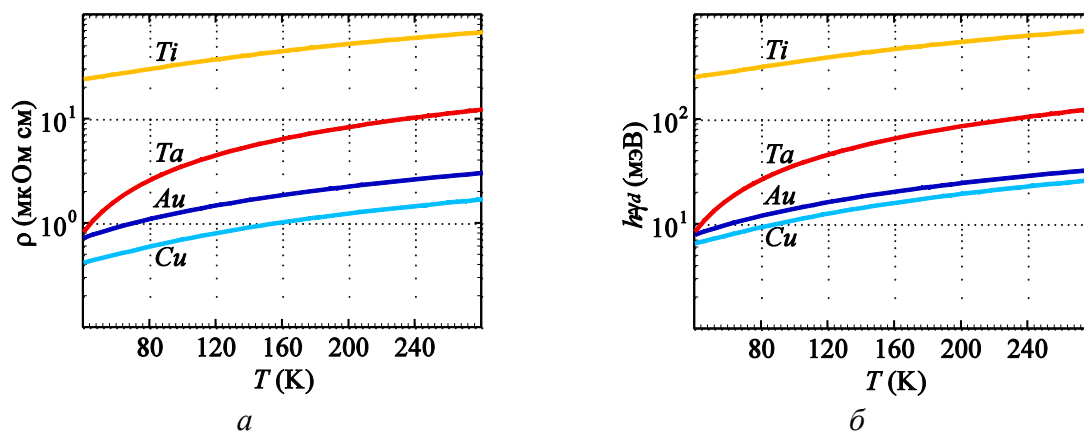


Рис. 1. – Температурные зависимости удельного сопротивления ρ (а) и величины затухания $\hbar\gamma_d$ (б) для различных металлов

2. Результат численных расчетов

Расчеты волноводных характеристик и потерь в металлических слоях проведены для ТМ-моды на основе численного решения волнового уравнения для ненулевой компоненты вектора магнитного поля аналогично [5, 6]. Конфигурация симметричного волновода выбиралась со следующими параметрами: обкладки Au/Cu, слои адгезии Ti/Ta толщиной 5–50 нм, приконтактные n^+ -слои GaAs (50 нм, $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), активная область GaAs/AlGaAs (10 мкм, $4.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$).

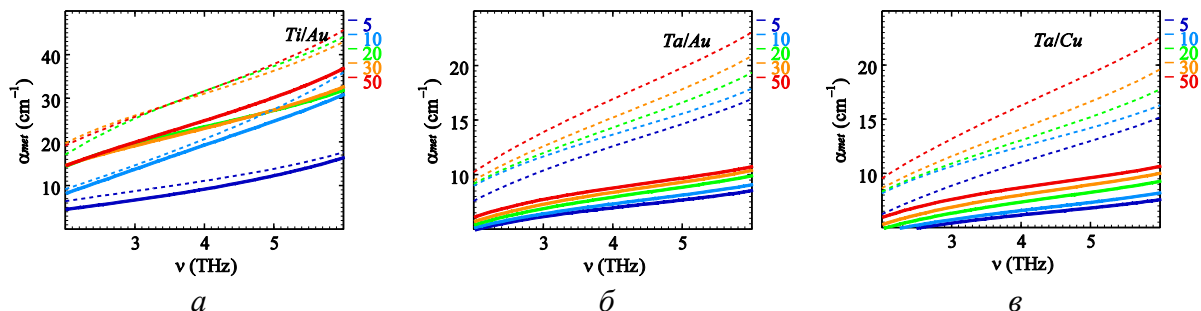


Рис. 2. Спектры потерь в металлических обкладках Ti/Au (а), Ta/Au (б) и Ta/Cu (в) для различных толщин слоев адгезии Ti и Ta (числа в нм справа от кривых) при температурах 80 К (сплошные линии) и 180 К (штриховые кривые).

Результаты расчета спектров коэффициента потерь на металлических обкладках Au и Cu для различных толщин слоев адгезии Ti и Ta представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, значения коэффициента потерь увеличиваются с ростом частоты и температуры. Как показывают расчеты, на частоте 4 ТГц для температуры 180 К для слоев адгезии в диапазоне 5–20 нм потери составили: $10.9\text{--}31.7 \text{ см}^{-1}$ (Ti/Au), $12.6\text{--}14.3 \text{ см}^{-1}$ (Ta/Au), $11\text{--}13 \text{ см}^{-1}$ (Ta/Cu).

Таким образом, для минимизации потерь в высокотемпературных дизайнах ДМВ ККЛ в качестве слоев адгезии для Au целесообразно использовать Ti толщиной $<5 \text{ нм}$ или Ta толщиной $<10 \text{ нм}$, что сравнимо с потерями в Ta/Cu волноводе.

Библиографические ссылки

1. Quantum cascade lasers with double metal-semiconductor waveguide resonators / K. Unterrainer [et al.] // *Appl. Phys. Lett.*, 2002. Vol. 80. P. 3060–3062.
2. Terahertz quantum cascade lasers with copper metal-metal waveguides operating up to 178 K/ M. A. Belkin [et al.] // *Opt. Express*. 2008. Vol. 16. P. 3242–3248.
3. On metal contacts of terahertz quantum cascade lasers with a metal-metal waveguide/ S. Fatholouloumi [et al.] // *Semicond. Sci. Technol.* 2011. Vol. 26. P. 105021.
4. Silver-based surface plasmon waveguide for terahertz quantum cascade lasers/ Y. J. Han [et al.] // *Opt. Express*. 2018. Vol. 26. P. 3814–3827.
5. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag /Д. В. Ушаков [и др.] // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48, № 11. С. 1005–1008.
6. Spectra of mode loss in THz quantum cascade laser with double metal waveguide based on Au, Cu and Ag/ R. Khabibullin [et al.] // *Proc. SPIE*. 2019. Vol. 11066. P. 1106613.
7. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared/ M. A. Ordal [et al.] // *Appl. Opt.* 1983. Vol. 22, No. 7. P. 1099–1119.
8. Babar S., Weaver J. H. Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 477–481.