

Новые материал и конструкция для волноводов терагерцовых квантово-каскадных лазеров

А. А. Дубинов^{1*}, А. А. Афоненко², Д. В. Ушаков²

¹Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087, Россия

²Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

*sanya@ipmras.ru

Одними из перспективных компактных источников когерентного излучения являются терагерцовые квантово-каскадные лазеры (ТГц-ККЛ) на основе полупроводниковых структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs [1]. Они находят применение в спектроскопии и анализе сложных соединений, мониторинге окружающей среды, для фундаментальных исследований и пр. [2]. Однако обычно толщина активной области ТГц-ККЛ составляет около 10 мкм и включает в себя порядка тысячи нанометровых полупроводниковых слоев точно контролируемой толщины и состава, что препятствует широкому применению ТГц-ККЛ. С другой стороны, использование двойного металлического волновода (ДМВ) в ТГц-ККЛ позволяет существенно уменьшить необходимое для генерации число каскадов. Например, для лазера с частотой 3,5 ТГц ранее удалось уменьшить число каскадов до 37, каждый толщиной 43,7 нм [3]. Это позволило сделать лазер с толщиной волновода всего 1,75 мкм, что в 50 раз меньше длины волны излучения лазера в вакууме. К сожалению, уменьшение ширины активной области приводит к резкому увеличению потерь, которые связаны с поглощением в металлических обкладках волновода. Альтернативным вариантом металлических обкладок ТГц ККЛ могут служить слои, выполненные из сверхпроводящих материалов.

Были проведены расчеты потерь ТГц-ККЛ с ДМВ с обкладками из традиционных Au и Ag со слоем адгезии из Ti и со сверхпроводящими обкладками из YBCO (новый материал для ТГц-ККЛ). Было показано, что потери в волноводе толщиной 11,5 мкм для частоты 1,2 ТГц с обкладками из Au значительно больше, чем с обкладками из Ag и YBCO. Кроме того, было показано, что использование обкладок из YBCO может позволить значительно (более чем в 4 раза) уменьшить число каскадов (до 20) и уменьшить толщину активной области до 2,8 мкм, необходимых для работы ТГц-ККЛ [4].

Традиционно, кроме ДМВ, для ТГц-ККЛ используется волновод на основе поверхностного плазмона (ВПП), когда электромагнитная мода ограничена с одной стороны слоем металла, а с другой – тонким (~1 мкм) слоем сильнолегированного донорами GaAs [1]. В результате значительная доля моды находится в полуизолирующей (для уменьшения потерь на свободных носителях) подложке GaAs, что снижает фактор оптического ограничения в таком ТГц-ККЛ. Кроме того, для случая ТГц-ККЛ с волноводами, как с ДМВ, так и с ВПП, необходимо помещать контакты с одной стороны (в отличие от традиционных диодных межзонных лазеров, где один из контактов располагается на легированной подложке, а другой – на эпитаксиальной стороне), что затрудняет их изготовление.

В данной работе предложена новая конструкция волновода ТГц-ККЛ. Предлагается использовать вместо полуизолирующей легированную подложку GaAs. Тогда существует диапазон частот, толщин и концентраций сильнолегированного слоя GaAs, в котором пороговое усиление (коэффициент общих потерь волновода, деленный на фактор оптического ограничения) предложенного волновода сравнимо с пороговым усилением обычного ВПП, но при этом контакты могут быть сделаны, как и для обычного диодного лазера.

Предсказанные результаты значительно упростят изготовление ТГц-ККЛ для различных применений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-19-00436.

1. B. Wen, D. Ban // Prog. Quant. Electron. 2021. Vol. 80. P. 100363.

2. A. Leitenstorfer, et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. Vol. 56. P. 223001.

3. E. Strupiechonski, et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 101101.

4. А.А. Дубинов, Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко // ФТП. 2023. Т. 57. С. 706–709.