Квантово-каскадные лазеры инфракрасного и терагерцового диапазона

Соколовский Г.С.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

DOI 10.34077/Semicond2019-420

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ), с момента публикации идеи в 1971 [1] и первой практической реализации в 1994 году [2], привлекают огромное внимание научного сообщества: по этой тематике было опубликовано более 7 тыс. работ, на которые, по данным Web of Science, сделано более 100 тыс. ссылок. Созданные к настоящему времени ККЛ излучают в среднем инфракрасном и терагерцовом спектральном диапазоне. Основной характеристикой, которая отличает их от «лазерных диодов», является то, что ККЛ униполярны, т.е. используют только один тип носителей – с излучением фотона при переходе электрона в зоне проводимости с одного квантоворазмерного уровня на другой. К сожалению, структуры ККЛ чрезвычайно сложны для практической реализации, что объясняется как количеством слоев, на два порядка превышающим этот показатель в «обычном» полупроводниковом лазере, так и необходимостью поддержания однородности слоев в течение длительного эпитаксиального роста. Объясняемое этим значительное отставание отечественных ученых в создании ККЛ удалось заметно сократить в течение последних лет. В докладе обсуждаются результаты исследования ККЛ, все технологические операции по созданию которых выполнены в нашей стране. Помимо демонстрации лазерной генерации в четырехсклотовой [3] и полосковой геометрии [4] при комнатной температуре, будет обсуждаться демонстрация генерации при повышенных температурах (до +650С) [5], а также еще не опубликованные результаты по достижению оптической мощности более 0.5 Вт и одночастотной генерации с подавлением боковых мод более 25 дБ.

Помимо достигнутых успехов, перспектив развития и применения ККЛ среднего ИК диапазона, в докладе обсуждаются два метода создания компактных источников ТГц-излучения: квантово-каскадный лазер (ККЛ) с прямой генерацией терагерцового излучения и нелинейное преобразование излучения на разностной частоте в двухчастотном ККЛ среднего ИК диапазона. Принцип действия ТГц-ККЛ прямой генерации аналогичен ККЛ среднего ИК диапазона в связи с чем они имеют принципиальный недостаток, связанный с тем, что энергия ТГц фотона мала по сравнению с тепловым уширением энергетических уровней при комнатной температуре, что делает невозможным создание инверсной заселенности уровней при повышенных температурах. Наибольшая сообщенная на сегодня рабочая температура ТГц-ККЛ этого типа не достигает 200 К [6]. Этому недостатка лишены ТГц-ККЛ разностной генерации, поскольку их компонентами являются ККЛ, работающие в среднем ИК-диапазоне, где энергия оптического перехода на порядок превосходит тепловую энергию, что позволяет создавать лазерные источники ТГц-излучения при комнатной температуре [7]. К сожалению, из-за несоблюдения фазового синхронизма в ТГц-ККЛ разностной генерации используют так называемую Черенковскую схему фазового согласования, реализация которой требует создания скошенной выходной грани, что существенно усложняет технологию изготовления таких лазеров.

[1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, *ФТП* **5**, 797 (1971).

[2] J. Faist, et al., *Science* **264**, 553 (1994).

[3] В.В. Дюделев и др., *Оптика и спектроскопия* **125**(3), 387 (2018).

[4] В.В. Дюделев и др., *ЖТФ* **88**(11), 1708 (2018).

[5] В.В. Дюделев и др., *ФТТ* **60**(11), 2251 (2018).

[6] S. Fatholouloumi et al, *Opt. Exp.* **20**, 3866 (2012).

[7] M.A. Belkin, et al., *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.* **15**, 952 (2009).