ИНФРАКРАСНЫЕ ИСТОЧНИКИ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

В. И. Лазаренко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Средний инфракрасный диапазон – область длин волн от 3,5 до 5,0 мкм, совпадающая с одним из т.н. «окон» относительной прозрачности приземного слоя атмосферы, ослабляющей инфракрасное излучение за счет процессов молекулярного поглощения и рассеяния на аэрозолях. Зависимость пропускания атмосферы от длины волны излучения представлена на рис. 1 [1].



Рис. 1. Зависимость пропускания приземного слоя атмосферы от длины волны излучения

Поскольку природа не слишком щедра на среды, генерирующие в среднем ИК диапазоне: практически всегда можно найти более эффективный и технологичный источник, излучающий в иной области спектра, то именно оптические свойства приземного слоя атмосферы определяют прикладное, выходящее за рамки сугубо академических интересов, значение лазеров, генерирующих в области от 3,5 до 5,0 мкм.

1. Мощные лазеры среднего ИК диапазона

1.1. DF-лазер. В 1971 году успехи в разработке газодинамического CO₂-лазера, мощность излучения которого достигла к тому времени величины 100 кВт, позволили Конгрессу США открыть финансирование проекта лазерной защиты судов ВМФ от противокорабельных ракет. Однако уже в 1973 году ВМФ отказался от CO₂-лазера в пользу развития продемонстрированной компанией TRW технологии химического DF-лазера, мощность которого на тот момент не превосходила 10 кВт [2].

Схематическое изображение непрерывного DF-лазера компании TRW представлено на рис. 2 [3].

Топливо (этилен C_2H_2) и ядовито-коррозийный окислитель (трифторид азота NF₃) смешиваются в камере сгорания, образуя помимо прочих продуктов реакции атомарный фтор F. Сверхзвуковое смешение продуктов горения с дейтерием D_2 приводит к образованию молекул DF (изотопа плавиковой кислоты) в возбужденных (колебания и вращения) состояниях, релаксация которых

в лазерном резонаторе позволяет получать генерацию на примерно 10 лазерных переходах с длинами волн от 3,6 до 4,0 мкм. Отработанная смесь разбавляется «до безопасной концентрации» водяным паром и выбрасывается в атмосферу.



Рис. 2. Схематическое изображение непрерывного DF-лазера компании TRW

В чем была причина замены более мощного и технологичного источника (инверсия населенности газодинамического CO₂-лазера достигается за счет сверхзвукового расширения разогретой смеси углекислого газа, азота и водяного пара) на использующую опасные реагенты «сырую» технологию, предусматривавшую помимо прочих издержек переработку практически готовой системы наведения под иную апертуру лазерного пучка? Дело в том, что поглощение приземным слоем атмосферы излучения CO₂-лазера, генерирующего в области 10,6 мкм, является серьезным препятствие для транспортировки мощного лазерного излучения на практически значимые расстояния, в то время как на порядок меньший уровень поглощения излучения DF-лазера (несколько процентов на километр) позволяет, как считалось, решать поставленные перед лазерным источником задачи [4].

Так оптические свойства атмосферы открыли дорогу развитию технологии непрерывных химических лазеров, достигшей к 1980 году своего апогея, материальным воплощением, которого стала установка MIRACL (передовой химический лазер среднего ИК диапазона), генерирующая излучения средней мощностью 2,2 МВт. Изображения составных частей установки: активной зоны резонатора и системы выброса отработанных реагентов приведены на рис. 3 [5].



Рис. 3. Изображение составных частей установки MIRACL

В 1989 году излучение установки MIRACL успешно поразило летящий со скоростью 2,2 Маха эмулятор противокорабельный ракеты Vandal, созданный на основе зенитной ракеты корабельного базирования Thalos [4]. Изображения подрыва эмулятора Vandal в результате воздействия излучения установки MIRACL представлено на рис. 4 [3].



Рис. 4. Поражение эмулятора противокорабельной ракеты Vandal излучением установки MIRACL

К 1990 году была завершена инженерная проработка размещения системы лазерной защиты на носителе: предполагалось, что 90 тонный химический лазер и 100 тонн реагентов будут размещены на четырех палубах на месте демонтированного корабельного орудия. Однако в 1991 году Конгресс США закрыл финансирования программы и отнюдь не по одной лишь причине окончания Холодной войны [4].

Оказалось, что излучение MIRACL может поражать лишь сверхзвуковые цели, движущиеся перпендикулярно направлению лазерного луча, т. е. ракеты, пролетающие мимо носителя [2]. В этом случае лазерный луч, сопровождающий цель, движется со скоростью звука относительно воздушной среды, практически не нагревая ее. Если же ракета атакует корабль (реалистичный сценарий), то в перемещающейся относительно луча со скоростью ветра (~5 м/с) воздушной среде образуется тепловая линза, величина которой при характерном для среднего ИК диапазона коэффициенте поглощения в атмосфере, необходимой мощности излучения и дальности воздействия не позволяет сфокусировать излучение на цели даже при использовании методов адаптивной оптики. Ибо хорошо известно, что компенсация фазовых искажений за счет деформируемого зеркала, изображенного на рис. 2 в качестве составной части системы наведения MIRACL, способна нивелировать действие тепловой линзы лишь на ограниченных расстояниях и при ограниченных величинах последней [6].

1.2. Лазер на свободных электронах. Закрытие проекта MIRACL не означало отказа ВМФ США от идеи лазерного поражения противокорабельных ракет противника. Развитие технологии лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), позволившее создать источник с мощностью излучения 10 кВт в диапазоне длин волн от 1 до 14 мкм, породили новую волну надежд на создание корабельного лазера [7]. Изображение ЛСЭ с мощностью излучения 10 кВт представлено на рис. 5 [7].



Рис. 5. Изображение лазера на свободных электронах

В основе работы ЛСЭ, схематическое изображение которого представлено на рис. 6, лежат пространственные колебания электронов в периодическом магнитном поле [7].



Рис. 6. Схематическое изображение лазера на свободных электронах

Если проходящий через магнитное поле электрон колеблется с оптической частотой, то создаются условия для когерентного усиления электрического поля соответствующей частоты, т. е. излучения. Поскольку частота колебания электрона и, соответственно, длина волны излучения ЛСЭ зависит в первом приближении лишь от скорости электрона и периода изменения направления вектора магнитного поля, то ЛСЭ может генерировать излучения в любом, в том числе и в среднем ИК диапазоне длин волн.

Однако, гипотетическое применение ЛСЭ в качестве мощного источника корабельного базирования предполагает генерацию излучения лишь в трех «паровых окнах» прозрачности атмосферы, а именно в областях длин волн 1,045, 1,625 и 2,141 мкм, где коэффициент поглощения водяного пара не превосходит величин 0,003 %, 0,2 % и 0,3 % на километр, т. е. как минимум на порядок меньше соответствующих значений для среднего ИК диапазоне [8]. Если при мощности излучения менее 1,5 МВт предпочтительнее генерация на длинах волн 1,625 и 2,141 мкм, коэффициент аэрозольного рассеянья для которых примерно вдвое ниже, чем для короткой волны, то сверхмощный корабельный ЛСЭ, во избежание проблем с тепловой линзой, должен безальтернативно излучать в окне 1,045 мкм [8]. Таким образом, поглощающие свойства приземного слоя атмосферы, открывшие в свое время дорогу мощным лазерам среднего ИК диапазона, немедленно перекрыли ее, едва заказчики лазеров чуть лучше в этих свойствах разобрались.

2. Компактные лазеры среднего ИК диапазона

Средний ИК-диапазон, оказавшийся малопригодным для распространения мощного лазерного излучения в приземном слое атмосферы, тем не менее, весьма «востребован» приемными системами. Изображение пассажирского самолета, зафиксированное приемной системой среднего ИК диапазона, представлено на рис. 7 [9].



Рис. 7. Изображение пассажирского самолета в среднем ИК диапазоне

А коль скоро есть приемники, то есть и потребность в компактных источниках [10], излучение которых, в силу малой средней мощности излучения (~10 Вт), не подвержено влиянию таких атмосферных эффектов, как тепловая линза.

2.1. DF-лазер. Компактный лазера среднего ИК диапазона может быть построен на основе уже известной нам реакции атомарного фтора с дейтерием, в том случае если в качестве источника атомарного фтора выступает нетоксичный элегаз SF₆ [11]. Схематическое изображение DF-лазера замкнутого цикла представлено на рис. 8.

Генератор импульсных напряжений (ГИН) формирует импульсно-периодический объемный разряд в среде $SF_6 + D_2$. Оторванный под действием разряда от молекулы элегаза атом фтора вступает в реакцию дейтерием, образую молекулы DF в колебательно возбужденно состоянии. Циклическая рециркуляция рабочей среды обновляет смесь в резонаторе к следующему импульсу излучения. Продукты реакции (DF) поглощаются фильтром.

Простой в технологическом отношении химический лазер обладает рядом недостатков. Во-первых, следует отметить ограниченность спектра генерации: DF-лазер, как мы уже знаем, генерирует излучение в области от 3,6 до 4,0 мкм, в то время как средний ИК диапазон включает и область длин волн от 4,5 до 5,0 мкм. Во-вторых, эксплуатация DF-лазера предполагает периодическую замену фильтра и рабочей смеси, что не слишком удобно при его использовании вне стен лаборатории.



Рис. 8. Схематическое изображение DF-лазера замкнутого цикла

2.2. Квантово-каскадные лазеры. Свое рода технологическим антиподами химическому лазеру являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ) среднего ИК диапазона. В основе работы ККЛ лежит фундаментальное положение квантовой механики – образование дискретных энергетических состояний электрона в потенциальной яме, а именно в периодической структуре квантовых ям, сформированных за счет чередования примесных слоев в теле полупроводника [12]. Схематическое изображение энергетических уровней ККЛ представлено на рис. 9.



Рис. 9. Схематическое изображение энергетических уровней ККЛ

Генерация излучения происходит в активных слоях по принципу соответствующему четырех уровневой схеме обычных лазерных источников. Электроны из предшествующего активному слою инжектора (можно считать его уровнем 4) переходят за счет туннельного эффекта на долгоживущий уровень 3 активного слоя (верхний лазерный уровень), переходят вместе излучением фотона на уровень 2 (нижний лазерный уровень), очень быстро релаксируют на уровень 1 и уходят в следующий за активным слоем инжектор – последовательность потенциальных ям, выполняющую роль барьера для электронов, расположенных на верхнем лазерном уровне. Последовательные, повторяющиеся каскады активных слоев и инжекторов образуют структуру ККЛ.

Подобно обычным диодным лазерам не нуждающиеся в обслуживании ККЛ весьма удобны в эксплуатации, однако представляют собой чрезвычайно сложные в технологическом отношении устройства, предполагающие выращивание сотен полупроводниковых нанослоев. На рис. 10 представлены толщины слоев одного каскада ККЛ, излучающего на длине волны 5 мкм. Указанная последовательность слоев позволяет получить структуру энергетических уровней, изображенную на рис. 9.



Рис. 10. Толщина слоев каскада ККЛ

Также следует отметить, что область эффективной генерации ККЛ совпадает с длинноволновой областью среднего ИК диапазона от 4,5 до 5,0 мкм. При уменьшении длины волны генерации, особенно в области менее 4 мкм, эффективность ККЛ существенно падает.

2.3. Параметрические генераторы света. Параметрические генераторы света (ПГС), генерирующие излучения за счет когерентного «расщепления» кванта накачки на два кванта генерации, лишены присущих двум вышеописанным подходам недостатков. ПГС представляет собой нелинейный кристалл, например ZnGeP₂, помещенный между зеркалами резонатора. Поэтому, с одной стороны, источник на основе ПГС не нуждается, в отличие от DF-лазера, в обслуживание и, как следствие, удобен в эксплуатации. С другой стороны, создание ПГС не обременено существенными технологическими трудностями, характерными для производства ККЛ. И, наконец, что немаловажно, при накачке ПГС на основе кристалла ZnGeP₂ гольмиевым лазером с длиной волны 2,1 мкм, излучение генерации перекрывает существенную часть как длинноволновой, так и коротковолновой области среднего ИК диапазона [13]. Зависимость пропускания атмосферы и относительной мощности ПГС на основе кристалла ZnGeP₂ от длины волны излучения представлена на рис. 11.



Рис. 11. Зависимость пропускания атмосферы (черный) и относительной мощности ПГС на основе кристалла ZnGeP₂ (красный) от длины волны излучения

Заключение

За более чем сорокалетнюю историю своего развития лазерные источники среднего ИК диапазона прошли немалый путь от так и не нашедших практического применения огромных излучателей мегаватного уровня, до маломощных компактных, востребованных на практике систем. Если сфера применения указанных источников в обозримом будущем достаточно определена, то конкретные методы генерации излучения в среднем ИК диапазоне могут изменяться в зависимости от развития текущих технологий и появления новых подходов. Так несколько новых направлений активно развивается в наши дни, однако их рассмотрение выходит за рамки настоящей работы.

Список литературы

1. Lillesand Th. et al. Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley, 2014.

2. Cook J. High-energy laser weapons since the early 1960s. Optical Engineering. Vol. 52(2), 2013.

3. Ferreira D. et al. Navy High Energy Laser Weapon System. Naval Engineers Journal, May 1993.

4. Albertine J. R. et al. History of Navy HEL Technology Development and Systems Testing. Laser and Beam Control Technologies, 2002.

5. http://www.smdc.army.mil/smdcphoto gallery/Facilities/HELSTF/

6. Gebhardt F. G. Twenty-Five Years of Thermal Blooming: An Overview. Propagation of High-Energy Laser Beams through the Earth's Atmosphere, 1990.

7. O'Rourke R. Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress, 2015.

8. Sprangle Ph. et al. A Compact, Optically Guided, Megawatt Free-Electron Laser Amplifier for Maritime Propagation, Naval Research Laboratory, 2005.

9. Overton G. IR countermeasures aim for safer flights. Laser Focus World, 2011.

10. Steinvall Ov. Potential of preemptive DIRCM systems, Technologies for Optical Countermeasures XII, 2015.

11. Великанов С. Д., Запольский А. Ф., Фролов Ю. Н. Физические аспекты работы HF- и DFлазеров с замкнутым циклом рабочей среды. Квантовая электроника, № 1, 1997.

12. Mann Ch. at al. Quantum Cascade Lasers for the Mid-infrared Spectral Range: Devices and Applications. Springer, 2003.

13. Илькаев Р. А., Гаранини С. Г., Лазаренко В. И. и др. Параметрический генератор света среднего ИК-диапазона на основе кристалла ZnGeP₂ с накачкой лазерным пучком на длине волны 2, 1 мкм. Mid-Infrared Coherent Sources, 2005.