

Современная электроника в лазерной технике. Новейшие разработки, эксперименты, перспективы. Обзор

Андрей Кашкаров (ak35@yandex.ru)

Мощным твердотельным оптическим квантовым генератором недавно научились «направлять» молнию, на бытовом уровне в сравнении со светодиодным излучением лазерная технология показала себя перспективной не только как источник разноцветного видимого спектра, но особенно в производственной и медицинской области, где, соответственно, с его помощью изменяют свойства металлов и удаляют новообразования. Учёные на пути к условно недорогому (рентабельному), экологичному и почти «бесконечному» источнику энергии; речь идёт о создании электростанций на основе безопасных минигенераторов с термоядерной реакцией. В статье показаны новейшие достижения и перспективы инженерной мысли разработчиков РЭА, представленные в течение 2022 года.

Лазерный генератор, управляющий энергией молний

В 1782 году Бенджамин Франклин на свои деньги оснастил металлическими штырями крыши 400 общественных зданий в Филадельфии. И сегодня многие согласятся, что изобретённый громоотвод является простой, а потому доступной многим (хотя и не единственной) формой защиты от «небесного электричества», природа которого достойна рассмотрения в отдельной статье. И всё же вертикально расположенные стержни не всегда обеспечивают оптимальную защиту высотных конструкций и зданий. Даже в наши дни от ударов молний продолжают гибнуть люди. Поэтому наблюдения и исследования в этой области ведутся постоянно, и есть практические и перспективные результаты. Один из недавних примеров таков. На вершине горы Сентис в

Аппенцелле (Швейцария) установили мощный лазерный генератор LLR (Laser Lightning Rod); это разработка Европейского консорциума – Женевского университета (UNIGE), École Polytechnique (Париж), EPFL, Школы инженерии и менеджмента HEIG-VD и научных лазеров TRUMPF (Мюнхен). В продолжающихся исследованиях специалисты Лаборатории электромагнитной совместимости (EMC) изучили типизацию восходящих грозовых разрядов и развернули экспериментальные установки для наблюдения за молниями в сотрудничестве с HEIG-VD/HES-SO. Согласно результатам практических исследований 2021–2022 года луч мощного квантового генератора отклонил молниевый разряд на несколько десятков метров, причём в условно плохую погоду (в зоне ограниченной видимости с обильными осадками). Результаты исследования опубликованы в январе 2023 года

в [1], [8]. На рис. 1 и рис. 2 представлена моделированная иллюстрация работы лазерной установки для отклонения молниевых разрядов.

Мощность LLR, установленного на вершине горного массива Сентис (высота 2502 м над уровнем моря) рядом с телекоммуникационной вышкой Swisscom (124 м), составила около 1 ТВт (тераватт). Результаты эксперимента признаны валидными и верифицируемыми, так как их зафиксировали несколько измерительных станций, расположенных в гористой местности, с обязательной синхронизацией времени, мониторинга и возможностей управления, а также приборы разного назначения – от измерения тока молнии на мачте, антенны электромагнитного поля, рентгеновских датчиков, видеокамеры и интерферометрической системы для отображения грозового разряда до устройств абстрактного измерения напряжённости поля. Результаты одновременных наблюдений подтвердили эффект направления молнии с помощью мощного лазера. Вышка Swisscom широко известна за пределами региона, является одним из высоких и «популярных» (для молний) громоотводом в Европе, и в неё «небесное электричество» ударяет сотню раз в год (по несколько раз за одну энергетическую «атаку»). Фактические результаты фотофиксации отклонения молниевых разрядов представлены на рис. 3 и 4.

Используя интенсивные лазерные импульсы для создания ионизиру-

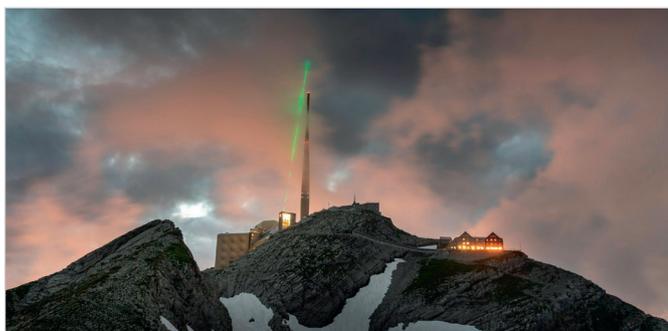


Рис. 1. Моделированная схема работы лазерной установки для отклонения молниевых разрядов



Рис. 2. Иллюстрация отклонения молниевых разрядов лучом мощного квантового генератора

ванного воздуха, являющегося электропроводным, LLR применили для направления молнии по её лучу. По результатам эксперимента констатировали, что «лазерный луч», направленный вертикально и много выше от верхней точки традиционного громоотвода, является громоотводом, позволяет управлять молнией и повышает площадь защищаемой области. Проект LLR предусматривал разработку квантового генератора со средней мощностью 1 кВт, силой 1 Дж в импульсе и длительностью импульса в 1 пс (пикосекунду). Устройство квантового генератора TRUMPF имеет ширину 1,5 м, длину 8 м и весит более 3 т. Схематично вид устройства представлен на рис. 5.

Обязательный и важнейший элемент лазерной установки любой мощности – эрбиевый волоконно-оптический усилитель EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) на основе оптического волокна, легированного ионами. Этот «лазер накачки» (ЛН) является источником энергии, за счёт которой многократно усиливается оптический сигнал. Энергия ЛН так распределяется в усилителе EDFA между оптическими каналами, что чем их больше, тем бóльшая мощность накачки востребована; чтобы обеспечить это условие, разработчики применяют несколько ЛН. В упрощённом виде структура квантового лазера с ламповой накачкой представлена на рис. 6.

Твердотельный оптический квантовый генератор (рис. 5) активировался каждый раз, когда прогнозировалась штормовая активность. Всё это для того, чтобы убедиться – будет ли разница в характеристиках разрядов молний при «подсветке» неба лазерной установкой и без неё. Район экспериментов был закрыт для воздушного движения заранее. Затем сравнили полученные данные, когда применялся лазерный луч, направленный в небо рядом с громоотводом – вышкой, и когда в громоотвод естественным образом ударяла молния (при выключенном квантовом генераторе). Разряд может следовать за лучом почти на 60 метров (отклонение в сторону), прежде чем достигнет верхней точки, что означает увеличение радиуса защитной поверхности со 120 до 180 м. Это первый подтверждённый случай на местности с лазерным генератором высокой мощности. Более ранние результаты наблюдали только в лабораторных условиях. В перспективе работа над увеличением дальности воздействия на молнию, то есть условной

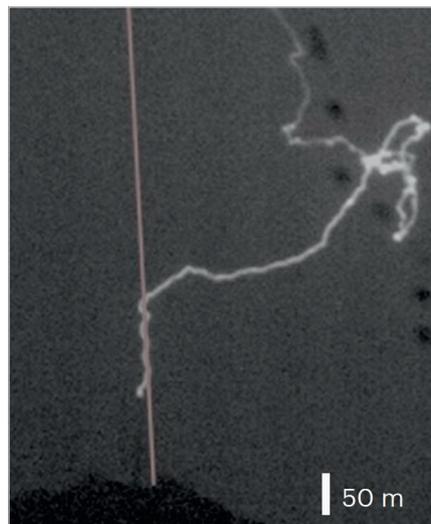


Рис. 3. Фотофакт молниевое разряда и его отклонение к лучу квантового генератора



Рис. 4. Воздействие молниевое разряда на верхнюю точку вышки и последующего «заземления»

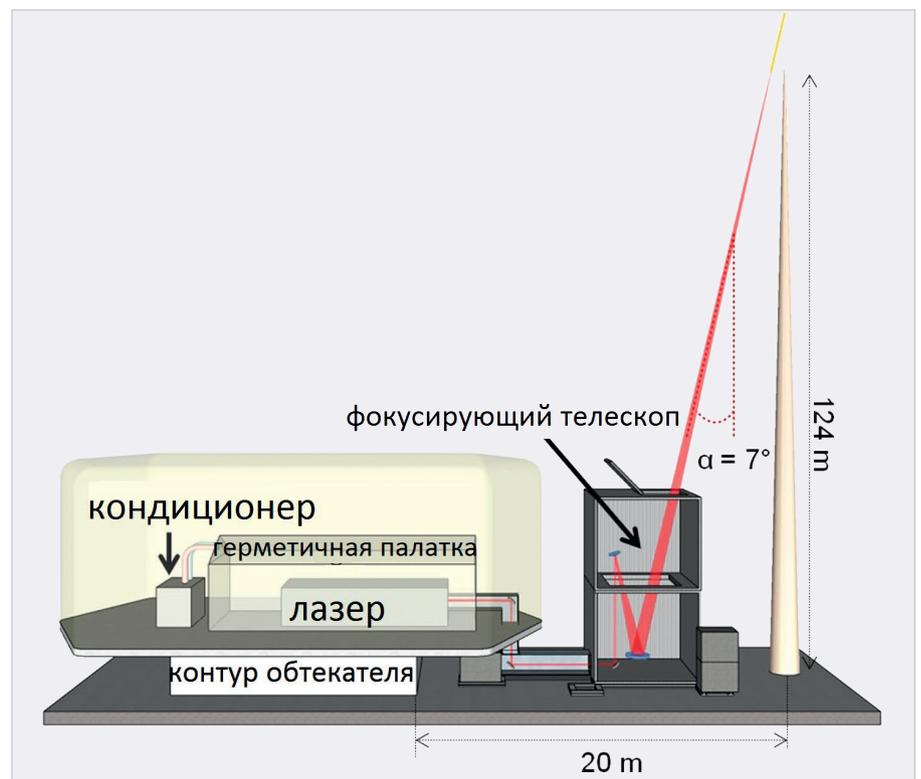


Рис. 5. Схематичный вид квантового генератора, применённого для отклонения молниевое разряда

высоты «лазерной пушки». Пока промежуточная цель соотносится с действием LLR на расстоянии 500 метров, при длине излучающей поверхности лазерной пушки всего в 10 метров (между высшей точкой и основанием). На рис. 7 представлена зависимость электрических сигналов, замеренных для положительных восходящих импульсов.

Шкала электрического поля дана по левой оси ординат в значениях $\text{кВ}\cdot\text{м}^{-1}$. При этом импульсный ток фиксировался от 0 до 4 кА.

На рис. 8 представлена осциллограмма сигнала, где каждый пик соответствует интегральной энергии рентгеновского излучения в периоде 50 нс.

Внизу осциллограммы – время в мс, слева – по оси ординат – ускоряющее напряжение, измеряемое в КэВ (keV). При означенных условиях ионизированный поток филаментации может достигать сотен метров при начальной мощности импульса около 1 кВт с продолжительностью импульса в единицы пс. Среди выводов [1] весьма много интерес-

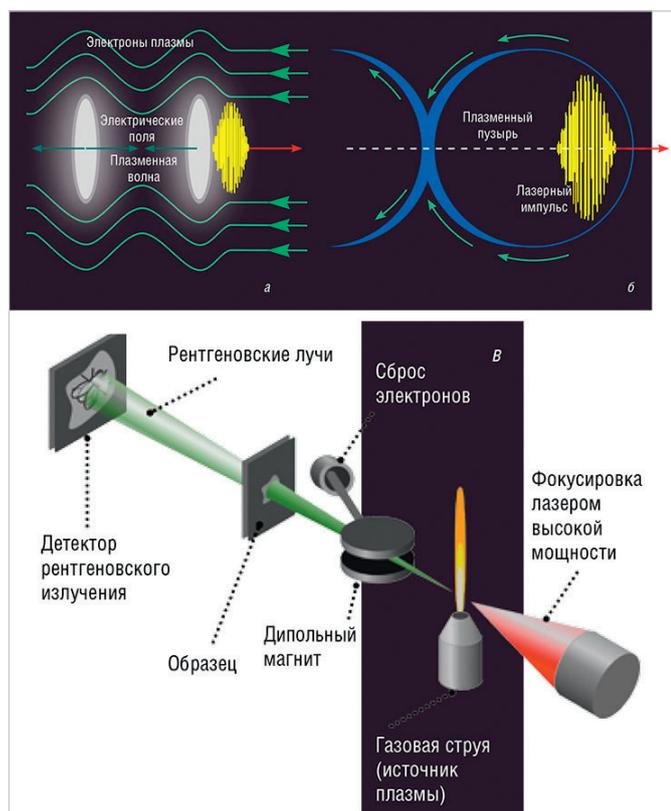


Рис. 6. Структура квантового лазера с ламповой накачкой

ного, в частности, то, что молнией можно «управлять» на расстоянии до километра от продемонстрированной лазерной установки, а если её совершенствовать с повышением мощности, то и более того. Разряды квантового генератора, направленные с земли, могут не только отклонять (на себя) молниевый потенциал, но и вызывать его по необходимости при соответствующих погодных условиях. Надо полагать, примерно такой же эффект (при соответствующих условиях обеспечения энергоносителя) можно получить с подвижной лазерной установки не только на земле, но и в атмосфере. Теперь идея управляемого воздействия в формате «звёздных войн», увлекавшая общество в 80–90-х гг. XX века, отчасти разъяснена. Апробированный в Швейцарии комплекс LLR, в отличие от ранее известных мощных лазеров, функционирует в сложных погодных условиях, мощный луч квантового генератора пронзает даже туман и облака. Это не снилось даже инженеру Гарину из фантастического романа Алексея Толстого, написанного в 1927 году.

Квантовый генератор для реакции термоядерного синтеза

В Ливерморской лаборатории (США) в декабре 2022 года в результате очередного эксперимента с участием мощно-

го квантового генератора констатировали, что впервые потратили на запуск термоядерной реакции меньше энергии, чем получили в результате. Ранее, в 2021 году, удалось получить выходную энергию в размере 70% от затраченной, заменив дейтериево-третиевую мишень алмазной. С новым экспериментом 2022 года в результате термоядерного синтеза получено 3,15 МДж (мегаджоуля) энергии против затраченных 2,05 МДж [6]. Выводы пока делают очень осторожно. Тем не менее, чтобы решить основную проблему реакции термоядерного синтеза, необходимо удержать разогретую плазму в течение времени, достаточного для того, чтобы ядра начали «сливаться». Поскольку вещество разогревается до огромных температур (порядка $10^8 \dots 10^9$ °C), ни один материал не может выдержать такой температуры. Очень важно для реакции не только мгновенно разогреть «мишень», но и удерживать её некоторое время, порядка 10^{-9} с, в состоянии плавления.

Удержание плазмы в электромагнитном поле посредством реакторов типа токамак и стелларатора, различных по технологии создания магнитного поля, – известный альтернативный способ решения задачи. При этом токамак лучше поддерживает высокую температуру плазмы, а стеллараторы – обеспечивают относительно большее время

удержания. Давление могут создавать и другие виды излучения, к примеру, рентгеновское. Такие эксперименты считают менее безопасными по определению, но также проводят, используя в качестве мишени ядра гелия. Другим условно отрицательным фактором является сила тока огромных значений – порядка 20 млн ампер, что необходимо для генерации мощной рентгеновской установки в течение хотя бы 100 нс. Экспериментальные камеры заполнены трансформаторным маслом и деионизированной водой, и даже в таких условиях в момент генерации эм-импульса расположенные рядом металлические предметы начинают светиться [6].

Декабрьский эксперимент 2022 года в Ливерморской лаборатории реализовали по принципу инерционно-управляемого синтеза. Для исследования технологии инерционного термоядерного синтеза с 2009 года собрано 192 мощные лазерные установки с каскадами оптоэлектронных усилителей. На рис. 9 представлена иллюстрация механизма, удерживающего топливную мишень.

Для удержания плазмы задействованы силы инерции «топливного» вещества, мгновенно разогретого в импульсном режиме до состояния плазмы с помощью мощного квантового генератора ультракоротких импульсов излучения за 10^{-15} фемтосекунд (фс). Воздействие лазе-

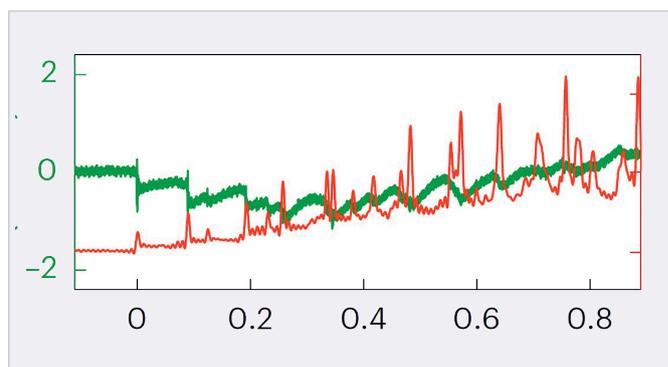


Рис. 7. Электрические сигналы, измеренные для направленных вверх вспышек

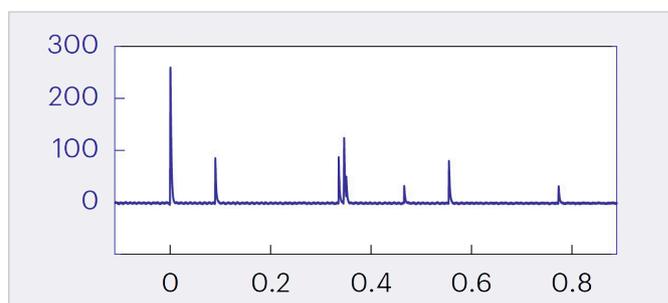


Рис. 8. Осциллограмма сигналов, где пик соответствует интегральной энергии рентгеновского излучения



Рис. 9. Внешний вид механизма, удерживающего топливную мишень. Фото: Lawrence Livermore National Laboratory



Рис. 10. Топливная мишень из дейтериево-тритиевой смеси в золотой оболочке (Lawrence Livermore National Laboratory)

ром на золотую мишень цилиндрической формы диаметром 2 мм серий ударных волн показало действенный результат для поддержки реакции синтеза частиц.

Ультрафиолетовая лазерная установка 2022 года с длиной волны 351 нм генерирует мощность, сопоставимую с 500 ТВт (тераватт). Под её воздействием «мишень» сжимается до плотности 1000 г/см³, давление эквивалентно 300 млрд атмосфер; таковы условия запуска реакции термоядерного синтеза. По 2 ядра дейтерия и трития – тяжёлого и сверхтяжёлого изотопов водорода сливаются в ядро гелия. Импульс такой лазерной установки моментально испаряет золотую оболочку цилиндра и разогревает дейтериево-тритиевую смесь. При этом фиксируется выделение энергии, эквивалентной энергии, выделяемой при сжигании 1 барреля нефти. На рис. 10 представлена «топливная мишень» из дейтериево-тритиевой смеси в золотой оболочке.

Результативность экспериментов в области ядерного синтеза условно оценивают в сравнении с полученной и затраченной на термоядерную реакцию энергией. К примеру, в 2018 году зафиксирован выход энергии, на 3,6% превышающий затраченную. И лазерная установка в эксперименте 8 декабря 2022 года показала свою перспективу. Идея термоядерной электростанции в принципе осуществима – это направление будущего, но пока опытного образца мы не имеем. Проблемные вопросы «лазерной технологии» определяются огромными затратами энергии на работу твердотельного квантового генератора в импульсном режиме. Элементы установки из-за огромных перегрузок работают в одноразовом режиме. Стоимость эксперимента соотносят с 3 млн USD [6].

Отсюда ясно, что пока о серийном или коммерческом производстве мощной лазерной установки речь не идёт. Но в современных разработках она становится практически осязаемой и доступной.

Популярные области применения маломощного квантового генератора и его необычные возможности

Оптический квантовый генератор – источник мощного узконаправленного монохроматического когерентного излучения, преобразующего возможные виды энергии накачки – световую, электрическую, тепловую, химическую (и др.) в энергию когерентного, поляризованного и узконаправленного потока. Принцип действия оптического квантового генератора известен из физики, иллюстрация представлена на рис. 11.

Число фотонов, движущихся вдоль оптической оси, лавинообразно возрастает. Достигнув полупрозрачного зеркала, излучение частично выйдет наружу, частично отразится и вновь используется для генерации импульсов. Усиленный и вышедший сквозь полупрозрачное кольцо поток фотонов создаёт направленный световой пучок большой интенсивности. Важность лазеров накачки (ЛН) рассмотрена в первых абзацах статьи. И нужно добавить, что при хорошей концентрации пучка и юстировке оптики в активный элемент возвращается до 75% энергии излучения источника. На рис. 12 представлена условная схема лазерного канала с усилителями – элементами ЛН.

На рис. 13 представлен лабораторный образец – иллюстрация работы лазерного канала с усилителями сигнала.

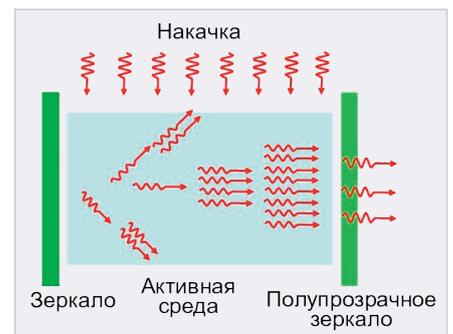


Рис. 11. Принцип действия квантового генератора (лазера)

Сфера применения простых квантовых генераторов широка – лазерное упрочнение стали, лазерная депиляция в медицинских учреждениях и способ борьбы с онкологией на примере удаления папиллом и других образований на коже человека, запатентованный способ нанесения цветного изображения лазерной гравировкой [10]. И даже осваивается лазерное облучение семян и развитие проростков [3]. В быту это можно применить как подсветка лазером невидимых в типичном спектре глаза человека и кратковременных явлений. Самое популярное среди сказанного – обнаружение пыли. Это иллюстрирует рис. 14.

Так, если нажать кнопку смыва унитаза при открытой крышке, крошечные капли воды разбрызгиваются в помещении на высоту до 2 метров. Исследование опубликовано в [4] и [7]. Частицы воды под давлением, согласно форм-фактору оборудования, взлетают вверх с начальной скоростью примерно 2 м/с, достигая высоты в 1,5 метра и последующего спада в течение 8 секунд. Крупные капли оседали на поверхностях в течение 2–3 секунд, но частицы размером менее 5 мкм оставались в услов-

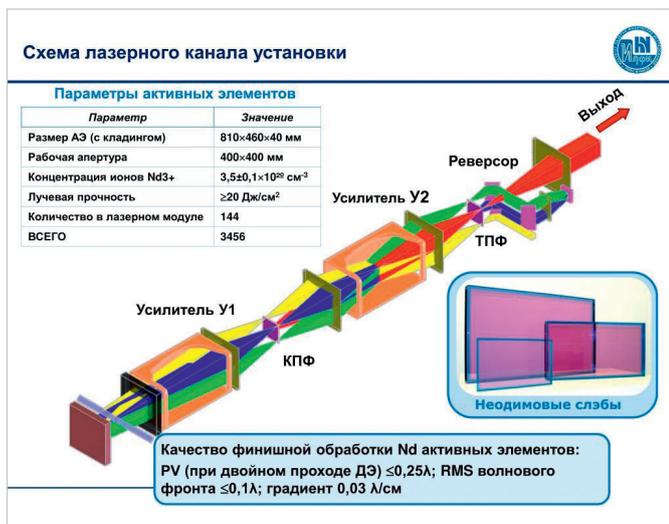


Рис. 12. Условная схема лазерного канала с усилителями – элементами ЛН

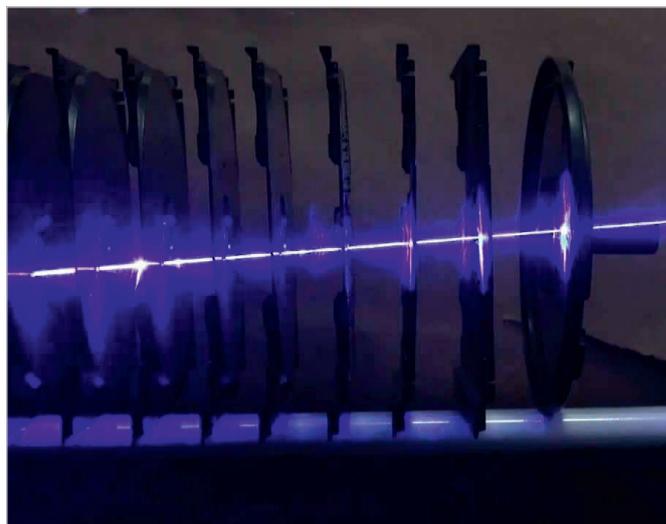


Рис. 13. Иллюстрация работы лабораторного образца лазерного устройства с усилителями сигнала



Рис. 14. Вариант использования бытового условно безопасного квартового генератора для контроля чистоты и прозрачности воздуха

но взвешенном состоянии в воздухе в течение нескольких (!) минут. При этом шлейф частиц отходов, включая и «твёрдые консистенции», насыщает воздух, увлажняя его, поднимается вверх к потолку и может проникать в соседнее помещение. Понимание траекторий и скоростей этих частиц, которые могут переносить патогены, такие как E. coli, C. difficile, норовирусы и аденовирусы, важно для снижения риска заражения в помещениях, где живут и работают люди [7]. От этого как никогда важна рекомендация – прикрывать двери в соответствующий кабинет, ибо болезнетворные микроорганизмы могут сохраняться на поверхности в том числе сантехнического оборудования даже после десятков смывов, а это увеличивает потенциальный риск заражения.

«Указатели» и другие

Кроме того, новые технологии позволяют генерировать тысячи люменов светового потока из фокусного пятна размерами в несколько мкм. С помощью лазеров, оснащённых качественной оптикой даже с небольшим диаметром, можно вывести световой луч с конусом менее 1° . А такая концентрация светового потока может широко использоваться не только для «подсветки Луны» или низколетящих воздушных целей, чем иногда балуются подростки, и что, несомненно, опасно, до более прагматических устройств, к примеру, автомобильных фар дальнего света. В современных электронных устройствах небольшой мощности применяют лазерные фотоприёмники 2,4; 2,5; 3,8; 4,8 мкм и лазерные диоды с излучением в диапазоне 2...3,8 мкм. Однако в разнообразии лазерных устройств и установок необходимо разбираться. Устройства с лазерным диодом и батареей-аккумулятором, которые можно купить в магазине, именуют не иначе как «лазерные указки», большинство из которых годно в качестве световых указателей в небольшом помещении, к примеру, в классной комнате, или для игры «в догонялки» с домашними питомцами (кошки и собаки любят побегать за перемещающейся яркой точкой). Относительно хорошая бытовая указка имеет не только мощный лазерный диод и аккумулятор, но и систему зеркал и линз для фокусировки, концентрации луча (рис. 15).

Такое устройство OMEGA LASERS SUPREME BLUE 450SX5000, несмотря на его небольшую мощность и схожесть с «изобретением инженера Гарина», можно назвать бытовым, притом

что внешний вид и действие представлены на рис. 16 и 17.

На рис. 17 хорошо виден луч, в котором просматриваются пылинки в воздухе. Пожалуй, для таких показательных задач и может пригодиться подобное устройство – чтобы видеть пыль в помещении. Технические характеристики устройства впечатляют: выходная длина волны $520 \pm 5 \text{ нм}$, мощность $> 5000 \text{ мВт}$, в устройство встроен металлический радиатор, регулируемая фокусировка. Время разогрева лазерного диода $< 30 \text{ с}$. Дивергенция $< 8 \text{ мрад}$, диаметр точки в апертуре $< 2,5 \text{ мм}$, спектральная длина волны $< 0,1 \text{ нм}$. Срок работы лазера $> 8000 \text{ ч}$. Рекомендуемый режим: 30 секунд работы, затем 5-секундный перерыв. «Лазерные указатели», дальномеры и др. стоят до десятка тысяч рублей. Они неопасны, если не направлять их на лицо человека. Впрочем, устройство может быть задействовано как лазерный прицел (при условии доработки крепления). Луч, конечно, бьёт не на 1000 метров, как указано в сопроводительной документации, а едва ли на 500 – и то при условии хорошей погоды, отсутствии преград и пыли. Такими игрушками пользовались и авиаулиганы, подсвечивая низколетящие цели с земли и мешая управлению воздушным судном. С совершенствованием соответствующей правоприменительной практики эти явления, кажется, канули в Лету. В то же время мощный лазерный указатель, апробированный автором, – действенный вариант отпугивания агрессивных собак и диких животных. Некоторые автомобильные компании применяют лазерные диоды для

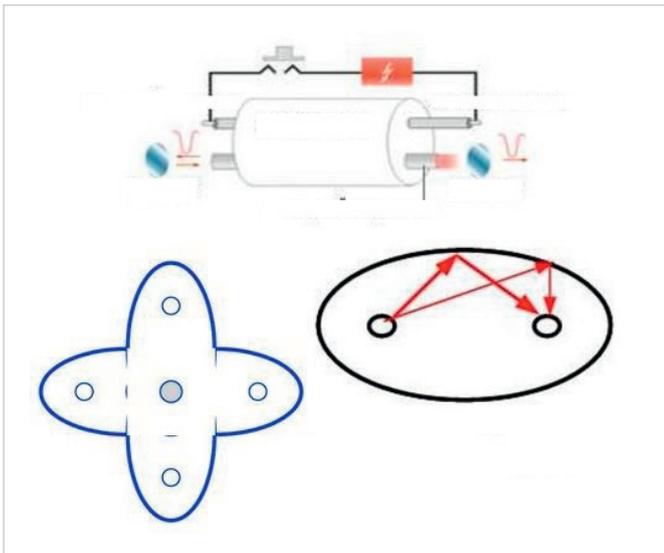


Рис. 15. Иллюстрация концентрации луча в лазерном устройстве



Рис. 16. Вид на полупрофессиональное лазерное устройство



Рис. 17. Иллюстрация действия устройства в помещении

совершенствования световых приборов «дальнего света», когда луч может освещать до 1 км пространства по ходу движения. На рис. 18 представлена полупроводниковая структура лазерного диода с понятными пояснениями.

Лазерный диод, как разновидность излучающего полупроводникового «светодиода» (LED – Light Emitting Diodes), был изобретён в XX веке и наиболее популярен для световых эффектов, когда луч, особенно в темноте, хорошо виден. А благодаря высокой концентрации виден на большом расстоянии, что даёт возможности точечной подсветки. Понятно, что обычный LED с его относительно рассеянным свечением производит иной эффект, нежели лазерный диод, изображение которого представлено на рис. 19.

Именно такие используют в «лазерных указателях» с мощностью 1–5 мВт, несмотря на то, что лазерные диоды оснащены двумя зеркалами на противоположных концах полупроводника. Одно из зеркал имеет частичную прозрачность, подобно двухстороннему зеркалу. Поэтому технически лазерный диод от светодиода LED отличается по конструкции исполнения. Исходящий лазерный луч формирует конус излучения всего лишь в 1–2° по сравнению с конусом светового излучения светодиода в 90°. Увеличение тока сверх определённого значения через LED резко снижает его эффективность. А эффективность лазерных диодов с увеличением тока почти не меняется. Эти особенности указывают на ценность лазеров для отдельных случаев применения, где светодиоды значительно уступают. Внутри диода лазер можно сфоку-

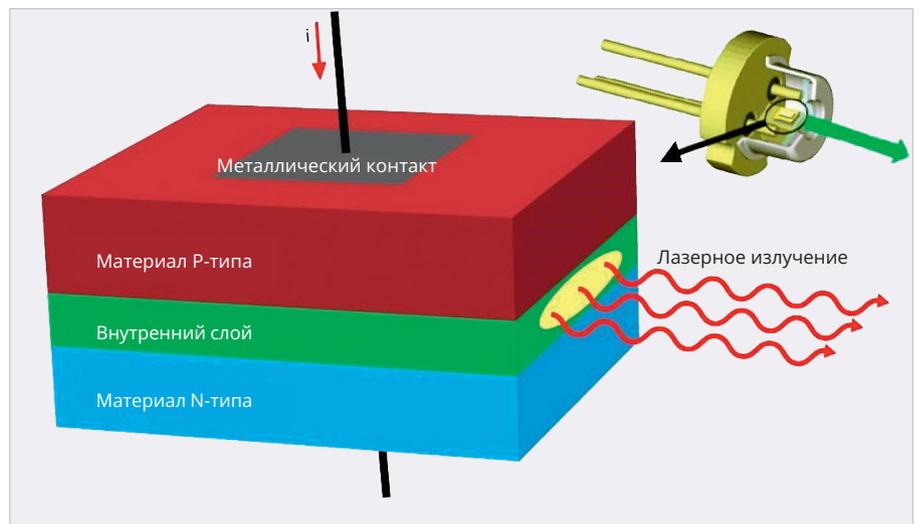


Рис. 18. Полупроводниковая структура лазерного диода



Рис. 19. Маломощный лазерный диод, длина волны 850 нм

сировать на крошечной точке люминофора для создания узкого интенсивного луча яркостью, в 20–50 раз превышающей яркость светодиода. При малом приложенном напряжении лазерный диод может заменить обычный светодиод; эффекта «лазера», как сконцентрированного пучка света, не будет заметно, но при увеличении электри-

ческого тока увеличивается мощность; когда превышает порог плотности потока, полупроводник излучает световой импульс с определённой его свойствами длиной волны; яркий пучок ещё более усиливается внутренними зеркалами. Вид на готовый универсальный модуль полуполярного галлий-нитридного лазера для поверхностного монтажа

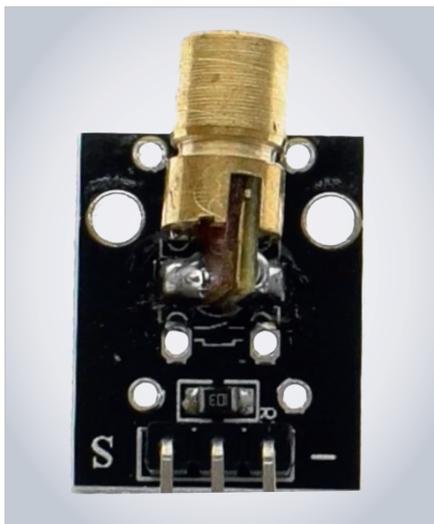


Рис. 20. Вид на готовый универсальный модуль с лазерным диодом-излучателем

жа, создающий световой поток условно «белой» цветовой гаммы – в основе с лазерным диодом-излучателем диаметром 7 мм, представлен на рис. 20.

В составе модуля лазерный диод, излучающий длину волны 450 нм, люминофор квадратной формы (1×1 мм), отражатель и элементы защиты – на плате. Модуль имеет КПД до 70% при плотности потока 3 Вт/см². Световой поток лазерного кристалла, излучаемый с поверхности от 4 до 30 мкм, даёт примерно столько же оптической мощности, сколько дают светодиоды на площади 800 мкм. К слову, в конструкциях Blu-Ray оптических дисков соблюдались технологии 405-нанометровых фиолетовых лазеров. Лазерный луч условно синего цвета с помощью отражателя смешивается с жёлтым люминофором – всё это для получения на выходе «белого» света. Известна разная производительность полупроводниковых лазерных диодов; по убыванию прерогативы они расставлены так: синий (самый мощный), красный (менее мощный), зелёный (относительно слабый). Но какой бы ни был свет от лазерного указателя, луч, длительно направленный в глаза, грозит локальной потерей зрения. Можно ли рекомендовать использовать портативные лазерные приборы как средство личной безопасности, активируемое при нападении, – большой вопрос, который следует разрешить в сравнении степени предотвращённого и причинённого вреда. При использовании лазера рекомендую применять специальные защитные лазерные очки со светофильтрами наподобие маски сварщика.

Функционал устройства, представленного на рис. 15, обеспечивают два



Рис. 21. Иллюстрация работы лазерного уровня и дальномера для строительных работ

аккумулятора Li-Ion типа 16340 с номинальным напряжением 3,7 В каждый, подключаемых последовательно. Заявленная производителем из КНР энергоёмкость аккумулятора 3800 мА/ч, разумеется, действительности не соответствует. Однако условно «мощное» устройство-указатель (рис. 15) истощает аккумуляторы за 10 минут непрерывного применения. Поскольку мощность устройства не регулируется, желательно применять его в кратковременном режиме работы – не более 20 с, затем пауза 10 с. Данное устройство не может зажечь даже на близком расстоянии бумагу, спичечную головку (как анонсирует производитель) или привести к ожогу на коже человека. Впрочем, практическое применение подобного устройства, по мощности превышающего «смешные самоделки» в виде лазерных указателей и дальномеров (см. рис. 21), может иметь место при принудительном «ослепении» камер видеонаблюдения без ик-фильтров или с небольшим их количеством, установленных снаружи и внутри зданий; это проверено авторским экспериментом. Защита оптики светофильтрами, блокирующими излучение определённой частоты, – эффективное средство, однако против одновременного поражения лучами с разной длиной волны светофильтр бессилён; это к вопросу о перспективных разработках.

Есть аналогичные форм-фактору, представленному на рис. 18, дискретные лазерные диоды с разной длиной волны и мощности от 1 мВт до единиц Вт. Кроме популярного форм-фактора в корпусном исполнении ТО-18 распространены корпуса LA, LP, ТО-8 и др., о чём можно прочитать в [2].

Элементная база как пример

Лазерные диоды с дисковым резонатором WGM и простейшей оптикой отличаются от условных аналогов с резонатором

Фабри-Перо по конфигурации: первые снабжены резонатором в форме диска и могут концентрировать луч 2...2,3 мкм. «Луч» циркулирует по краю резонатора и выходит за счёт рассеивания на микронеровностях поверхности. Для сбора лазерного излучения чип монтируется в центре корпуса ТО18 с параболическим отражателем. Лазерные диоды типового ряда WGM-20...WGM-23 разработаны для спектрального диапазона 2...2,3 мкм. Их применяют в драйверах предусилителей для фотодиодов, в электронных устройствах с датчиками – сенсорами газов и жидкостей (H₂O, CH₄, CO₂ ...) и др.

В табл. 1 представлены портативные квантовые генераторы 3,01...3,08 мкм. Полупроводниковые лазерные диоды LD290...LD360, с резонатором Фабри-Перо разработаны для спектрального диапазона 2,9...3,6 мкм.

Для сравнения – основные параметры ИК-лазерного диода с оптической мощностью 1000 мВт представлены в табл. 2.

Элементы LD290...LD360 могут использоваться в паре с фотодиодами PD36, PD48 в устройствах приёма-передачи сигналов. Драйвер DLT-37M обеспечивает питание диодов LD200...LD230 в квазистационарном и импульсном режиме QCW – частота повторения импульсов 8 кГц, длительность 62 мкс – и режиме Pulse – частота повторения импульсов 8 кГц, длительность 2 мкс. Квантовый генератор мощностью более 5000 мВт, луч которого может быть виден при «идеальных» условиях на расстоянии нескольких километров, способен прожигать тонкий пластик и воспламенять сухие щепки, но бытовые так называемые «тоже лазеры» являются не более чем игрушками, которые, впрочем, могут нанести локальный вред зрению человека при неправильном использовании. На основе условно мощных лазерных диодов более 10 лет специальными службами (в том числе полицией) в правовом поле используются электронные устройства направленного действия для

Таблица 1. Лазеры с фокусом 2,9...3,6 мкм в корпусе ТО-18

Наименование лазера	Длина волны, мкм	Пороговый ток, мА	Диапазон рабочих температур, °С	Тип резонатора
QCW Pulse	1,98...2,04	1000–2000	20...150	W-300
LD-20	2,22...2,27		20...170	W-100
LD-23	2,23...2,26		20...100	W-200
WGM LP	2,24...2,28		40...150	W-300
LD300	2,94...3,19		30...120	FP LA
LD320	3,20...3,29		77...100	
LD340	3,30...3,39		77...150	
LD330	3,40...3,60			

Таблица 2. Технические характеристики лазерного ИК-диода с оптической мощностью 1000 мВт

Оптическая мощность	1000 мВ
Длина волны	850 нм
Напряжение	1,9...2,2 В
Ток	1200 мА
Ресурс работы	10 000 ч

нейтрализации активности задерживаемых лиц, к примеру, на основе лазерных диодов модельного ряда «Поток» и аналогичных.

Перспективы квантовых генераторов различного назначения

Несколько лет назад реализована технология получения нелинейных кристаллов для параметрических генераторов света и изготовления диэлектрических покрытий; это позволило создавать надёжные и простые в эксплуатации источники лазерных импульсов, перекрывающие спектральный диапазон 200...20 000 нм. Но развитие инженерной мысли не стоит на месте и способствует новым разработкам концентрированного луча в УФ-, видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах, а среди источников перестраиваемого лазерного излучения основными считались лазеры на красителях и на активированных кристаллах (Al₂O₃; Ti₃₊, александрит, форстерит, YAG: Cr⁴⁺) в диапазоне излучения 550...1500 нм, тогда как возможности генерации световых импульсов в спектральной области были шире: 20...300 нм. На рис. 22 представлены схема и структура (с пояснениями) твердотельных лазеров с ламповой и полупроводниковой начинкой (источником) на основе кристаллов иттрий-алюминиевого граната с добавлением ионов неодима Nd: YAG.

Разработчики устройств современной электроники совершенствуют источники излучения на основе ПГС, где удачно сочетаются широкий диапазон непрерывной перестройки и высокий КПД преобразования излучения «накачки лазера», к примеру, ПГС на кристаллах ВВО с накачкой 2-й и 3-й гармониками Nd: YAG-лазеров. ПГС на кристаллах КТР и КТА с накачкой излучением Nd-лазеров позволяют получать перестраиваемое излучение в ИК-диапазоне 1,5...4 мкм. Основными трудностями в

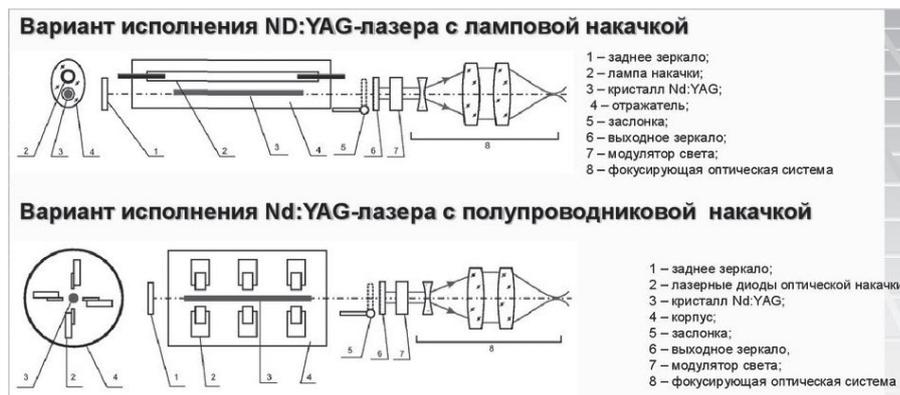


Рис. 22. Схема и структура (с пояснениями) твердотельных лазеров с ламповой и полупроводниковой начинкой (источником) на основе кристаллов иттрий-алюминиевого граната с добавлением ионов неодима

этой области спектра являются невысокий коэффициент параметрического усиления в нелинейных кристаллах, поглощение сигналов в ИК-области, внешние факторы паров и влажности в атмосфере. Для надёжной работы лазерной системы необходимо, чтобы длина волны генерации коррелировалась с прозрачностью атмосферы. К примеру, в ПГС, накачиваемых излучением 1064 нм, длины волн излучения сигнальной (λ_s) и холостой (λ_i) волн связаны между собой соотношением $1/\lambda_i + 1/\lambda_s = 1/1,0642$ [мкм]. Учитывая свойства нелинейных кристаллов и наличие их собственного краевого поглощения в ИК-области, выделяют спектральные диапазоны, для которых можно создать надёжно работающие ПГС в «окнах» прозрачности атмосферы: 1,45...1,67; 1,98...2,3 и 2,93...4,10 мкм. Это перспективно, поскольку именно перестраиваемые лазеры, являясь основной частью современных оптоэлектронных приборов, позволяют решать задачи спектроскопии, нелинейной оптики, фотохимии, биологии, медицины и др. Развитие инженерной мысли направлено на разработку генераторов, перестраиваемых в определённых спектральных диапазонах излучения для лазерной спектро-

копии и фотохимии, где перспективные методы основаны на селективном взаимодействии лазерного излучения с веществом; дистанционного обнаружения веществ, включая лазерное зондирование атмосферы для определения её состава, загрязняющих примесей и измерения их концентрации; лазерной фотобиологии, медицинских технологий (к примеру, для удаления новообразований) и фотодинамической терапии и в др. случаях. Перспектива развития мощных, профессиональных (к примеру, в медицине и в производстве – для резки материалов), а также слабой реплики первых – бытовых квантовых генераторов расширяется. С учётом инноваций в области когерентного освещения для распределения интенсивного электромагнитного излучения уже осуществляется «программирование» света сложной структуры, доступное даже при невысокой мощности генерация луча – преобразования фемтосекундных импульсов в ультракоротком режиме. Это позволяет создавать гиперспектральный синхронный поток и способствует инновационным решениям завтрашнего дня в ядерной физике, военпроме и обеспечении безопасности жизни. С лазерной техникой человек уверенно созидает будущее.

Литература

1. *Howard, A., Walch, P., Produit, T. et al.* Молния с лазерным наведением (2023). *Nature Photonics*. URL: <https://www.nature.com/articles/s41566-022-01139-z> и <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01139-z>
2. *Гулевич Е. и др.* Оптоэлектронные приборы для ближней и средней ИК-области спектра 0,7-5 мкм. URL: http://www.photonics.su/files/article_pdf/2/article_2698_296.pdf
3. *Деревянко И.А.* Лазерное облучение семян и развитие проростков. URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018003485>
4. *Дун А.* Инженеры показали, как выглядят брызги воды из унитаза при смыве с поднятой крышкой. URL: <https://www.gazeta.ru/science/news/2022/12/08/19220905.shtml>
5. Лазерная указка OMEGA LASERS SUPREME BLUE 450SX5000 - адаптированная реплика. URL: https://aliexpress.ru/item/1005002970816891.html?spm=a2g0o.search.search_results.66.3fb173119QLJDi&sku_id=12000023015824584
6. *Медведев Д.* Сила инерции: как запустить термоядерную реакцию лазером. URL: <https://2051.vision/2022/12/16/nif/>
7. Новости науки и техники. Ученые подсветили лазером брызги из унитаза. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2022/12/13/24586/>
8. Отражение молнии лазерным громоводом. URL: <https://actu.epfl.ch/news/deflecting-lightning-with-a-laser-lightning-rod-2/>
9. Патент RU 2 774 048 С1. Алимов А.В. Способ нанесения цветного изображения лазерной гравировкой. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2022/12/14/24593/>
10. *Разина Е.А., Коренивский Н.В.* Технология маркировки материалов при помощи лазерного оборудования. С. 136-139. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2022/12/09/24551/>



НОВОСТИ МИРА

Российские учёные осваивают терагерцевый диапазон

В НИЯУ МИФИ продолжает работу V Всероссийская конференция с международным участием «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения ТЕРА-2023».

Новейшие терагерцевые технологии уже сегодня играют важную роль в самых разных областях: от радиоастрономии до медицины, от сферы противодействия терроризму до систем связи 6G. По мере увеличения плотности информационных потоков именно терагерцевые технологии способны стать главным направлением развития техники передачи и обработки информации.

Такие технологии являются логическим продолжением развития радиотехники по мере освоения области всё более высоких частот. Терагерцевый диапазон (от 100 ГГц и выше) находится на стыке радиотехники и оптики, в силу чего генерация терагерцевого излучения, его распространение, взаимодействие с окружающей средой и, наконец, его детектирование имеет ряд особенностей, которые и являются предметом изучения ученых в России и за рубежом. У истоков этого научного направления стояли такие выдающиеся отечественные физики, как Сергей Вавилов, Павел Черенков, Пётр Лебедев и Александра Глаголева-Аркадьева.

В 2015 году в МГУ им. М.В. Ломоносова, где прошла первая российская конференция по этой тематике, был подписан меморандум о создании Международного терагерцевого консорциума, в который вошли более 130 институтов из 30 стран. С тех пор конференция «ТЕРА» стала важным научным событием, объединяющим российских и иностранных учёных. Соорганизаторами V конференции выступают НИЯУ МИФИ, РАН, НИЦ «Курчатовский институт» и МГУ им. М.В. Ломоносова.

Цель конференции – обсуждение актуальных теоретических и экспериментальных научных результатов в области технологий СВЧ- и ТГц- электромагнитных волн, организация экспертной площадки по обсуждению и формированию векторов развития в этой предметной области.



Открывая конференцию, ректор НИЯУ МИФИ Владимир Шевченко отметил, что это знаковое событие не случайно происходит в стенах ядерного университета. Исследования в области СВЧ- и ТГц- электромагнитных волн также являются для НИЯУ МИФИ приоритетными.

В настоящее время работы в сфере терагерцевых технологий (в том числе, в рамках программы «Приоритет 2030») в НИЯУ МИФИ ведут несколько научных групп. Кафедра «Физика микро- и наносистем» проводит исследования в области молекулярной спектроскопии и радиовидения (получения изображений в реальном времени в ТГц-диапазоне). Центр радиофотоники и СВЧ-технологий и кафедра «Физика конденсированных сред» – в области материалов и устройств для генерации терагерцевого излучения (в частности, здесь ведутся работы по оптимизации широкополосных терагерцевых излучателей на основе низкотемпературных полупроводников). Теоретики кафедры физики конденсированных

сред разрабатывают новые принципы генерации терагерцевого излучения на основе ускорителей заряженных частиц высокой энергии.

«Уверен, что конференция даст новый импульс учёным и студентам НИЯУ МИФИ и станет стимулом развития этих перспективных направлений – как в научном, так и в прикладном смысле», – сказал Владимир Шевченко.

Ректор НИЯУ МИФИ также особо отметил, что конференция стала первым большим научным мероприятием, которое проводится в новом Научно-лабораторном корпусе – здании, которое призвано стать центром научной жизни университета.

Сопредседатель конференции, член-корреспондент РАН, профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и руководитель группы терагерцевой оптоэлектроники и спектроскопии Александр Шкуринов зачитал приветствие участникам конференции от ректора МГУ Виктора Садовниченко. Свои приветственные обращения в адрес участников конференции направили также президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук и первый вице-президент РАН Владислав Панченко.

Научную часть конференции открыли доклады директора Международного научно-образовательного центра «Фотоника» при Саратовском государственном университете Валерия Тучина «Терагерцевая биофотоника» и заведующего Лабораторией оптоэлектроники двумерных материалов МФТИ Дмитрия Свинцова «Сверхчувствительное терагерцевое детектирование на графеновых полевых транзисторах». Всего за четыре дня работы на конференции будет представлено около 100 докладов по различным направлениям терагерцевой науки.

mephi.ru