

ИПЛЭН

И. Олихов

Новое поколение приборов квантовой электроники

Применение для накачки активных сред электронного пучка, формируемого и управляемого общеизвестными методами и средствами, привело к появлению нового поколения приборов квантовой электроники — лазерных ЭЛТ. Открылись новые, невиданные ранее перспективы построения лазерных систем для решения разнообразных научных и технических задач. В числе этих задач — фундаментальные исследования быстротекающих процессов в газо- и гидродинамике, баллистике, плазме, механике взрывов и соударений. Один из таких приборов — лазерный излучатель световых импульсов наносекундной длительности, созданный специалистами НИИ “Платан”, — удостоен золотой медали и диплома на Всемирном салоне изобретений в Брюсселе.

Работы по созданию полупроводниковых лазеров с накачкой пучком ускоренных электронов, в которых источником лазерного излучения большой яркости служат полупроводниковые монокристаллы или пленки, а пространственная конфигурация излучения, его модуляция и сканирование определяются модуляцией и сканированием электронного потока, ведутся в мире уже не одно десятилетие. Но идея создания такого лазера впервые была реализована в России [1—3]. В подобных приборах при энергии возбуждающих электронов, превышающей потенциал ионизации атомов кристаллической решетки полупроводникового материала (активной среды лазера), возникает лавинообразное размножение электронов. При переходе частиц из возбужденного состояния на нижние энергетические уровни (уровни рекомбинации) происходит последующее испускание кванта света, энергия которого примерно равна ширине запрещенной зоны полупроводникового материала. В результате отражения испускаемого света от зеркал резонатора возникает положительная обратная связь и создаются условия для генерирования когерентного излучения при достижении пороговой мощности. В этом случае суммарные потери как электронного пучка в процессе его термолизации, так и оптического излучения в резонаторе, компенсируются усилением, связанным с индуцированными переходами.

Для развития этого процесса необходима энергия электронного пучка, равная по меньшей мере утроенной ширине запрещенной зоны полупроводникового материала.

Правда, при этом глубина проникновения электронов настолько мала, что создать резонатор для формирования когерентного излучения практически невозможно. С увеличением энергии электронов выходная мощность излучения растет и выходит на насыщение с началом образования радиационных дефек-

тов (при энергии электронов около 300 кэВ). Таким образом, чтобы обеспечить долговечность полупроводникового кристалла, энергия электронного потока не должна превышать энергию образования радиационных дефектов. Мощность излучения при заданной энергии пучка можно повысить, увеличивая плотность тока накачки и уменьшая ее пороговый уровень. Это достигается путем снижения рабочей температуры полупроводника и оптимизации его характеристик. Возможны два режима работы, при которых нагрев кристалла не превышает допустимого в нем уровня тепловых потерь, определяющих предельную пороговую энергию:

— “импульсный” (малая частота следования импульсов), при котором кристалл нагревается до предельно допустимой температуры за время импульса (пачки импульсов) и успевает остыть до первоначальной температуры в промежутке между импульсами. При отводе тепла с требуемой скоростью, определяемой теплопроводностью кристалла, мощность электронного пучка может достигать десятков мегаватт на 1 см²;

— “непрерывный” (большая частота следования импульсов — режим сканирования), при котором кристалл нагревается до предельно допустимой температуры за время действия многих импульсов. В этом режиме мощность электронного пучка составляет сотни ватт на 1 см².

С учетом особенностей этих режимов были созданы два типа ла-

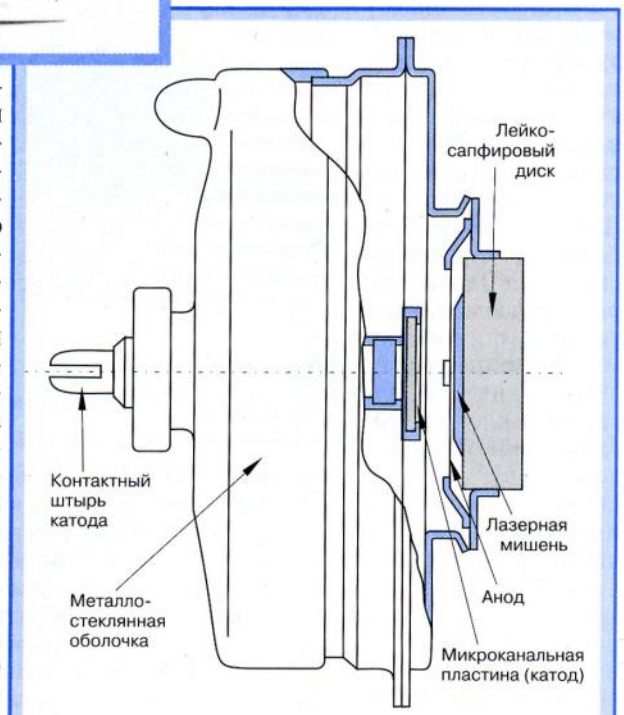
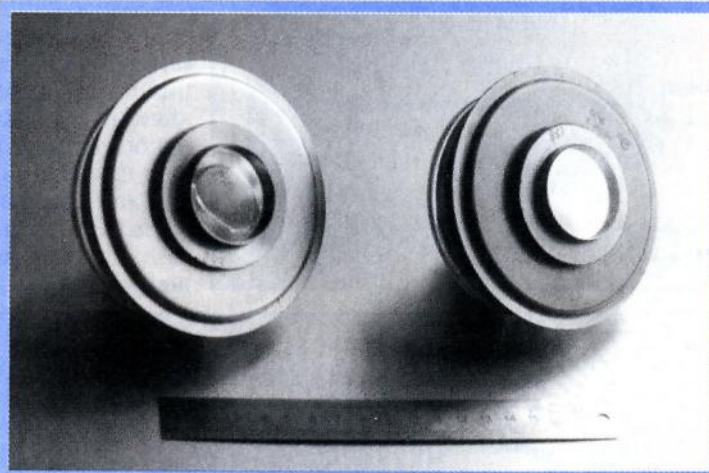


Рис.1. Конструктивное исполнение ИПЛЭН

зерных ЭЛТ — лазерный сканирующий источник излучения (квантоскоп) [4] и лазерный источник наносекундного излучения ИПЛЭН (импульсный полупроводниковый лазер с электронной накачкой) [5]. ИПЛЭН представляет собой высоковольтный вакуумный прибор диодного типа. Он содержит многоэлементную полупроводниковую мишень с оптическим резонатором; электронно-оптическую систему формирования электронного пучка нужной энергии, плотности, длительности и геометрической формы; теплоотвод; систему поддержания вакуума (включающую и вакуумную оболочку прибора). Жесткость конструкции всех элементов обеспечивает стойкость прибора к механическим воздействиям (рис. 1).

шен. Длина волны излучения определяется материалом и температурой мишени. Благодаря применению нескольких полупроводниковых материалов для формирования лазеров можно одновременно получить излучение на нескольких длинах волн, разнесенное в плоскости мишени площадью до 10 см^2 .

В системе формирования электронного пучка ИПЛЭН использован *эмиттер нового типа* — десорбционно-щелевой, сочетающий высокую эмиссионную способность, стабильность и большой ресурс работы [6]. Он выполнен в виде диэлектрических перегородок, размещенных на металлическом основании так, что их боковые образующие параллельны внешнему электрическому полю (рис. 2б).

плотность тока с катодов десорбционно-щелевого типа ($10\text{--}50 \text{ МА/см}^2$) ограничена либо их разрушением, либо текучестью диэлектрика. Для упрощения сборки, увеличения эмиссионной способности и стабильности десорбционно-щелевой катод выполнен на базе микроканальных пластин. Он способен работать в широком диапазоне остаточного давления ($10^{-2}\text{--}10^{-8} \text{ мм рт.ст.}$), практически без изменения эмиссионной способности.

Основные элементы прибора (катод и мишень) не теряют работоспособности при низком вакууме (около 10 мм рт. ст.). Однако в таких условиях прохождение электронного пучка сопровождается образованием ионов, бомбардирующих катод, что вызывает его нагрев, а иногда и разрушение. Из-за достаточно сильного газовыделения мишени и катода в его конструкции использованы титановые газопоглотители.

Блок управления прибора задает блоку формирования высоковольтных наносекундных импульсов, с которым он соединен двумя кабелями, начальное напряжение и осуществляет местное и дистанционное управление запуском лазера. В блок управления входят схемы генерации запускающего импульса, заряда первичного накопительного конденсатора, запуска и индикации.

Блок формирования импульсов выполнен на основе двух индуктивно связанных резонансных колебательных контуров, работающих в режиме свободных колебаний [7]. Он обеспечивает получение на емкостной нагрузке (лазерном диоде) импульса напряженной колоколообразной формы с амплитудой $240\text{--}260 \text{ кВ}$ и длительностью $5\text{--}7 \text{ нс}$ по основанию. В результате импульс тока с холодного катода (площадью 2 см^2) диода равен $800\text{--}1000 \text{ А}$. Длительность его по основанию — 5 нс . Блок имеет вид цилиндра диаметром 160 мм и высотой

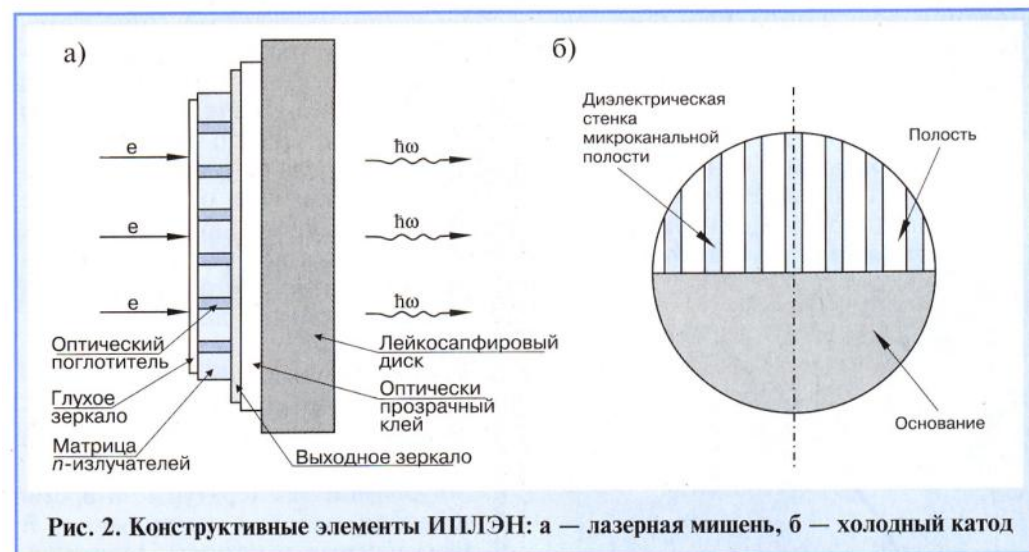


Рис. 2. Конструктивные элементы ИПЛЭН: а — лазерная мишень, б — холодный катод

Наиболее важный и сложный узел прибора — *многоэлементная лазерная мишень*. Она выполнена в виде *n*-матрицы лазерных излучателей, изготовленных на монокристаллической полупроводниковой пластине по групповой технологии (рис. 2а). Для устранения поперечной оптической связи элементы матрицы разделены оптическими поглотителями. Матрица закреплена оптически прозрачным клеем на толстом лейкосапфировом диске, который одновременно служит теплоотводом. Излучающая поверхность мишени может иметь любую форму: узкая щель, сектор, полоска, трехцветное осветительное кольцо для цветной интерферометрии и т.п. Выходное зеркало узла — интерференционное, на заданную волну излучения. Металлодиэлектрическое сплошное (глухое) зеркало одновременно выполняет функцию снятия заряда со всей поверхности ми-

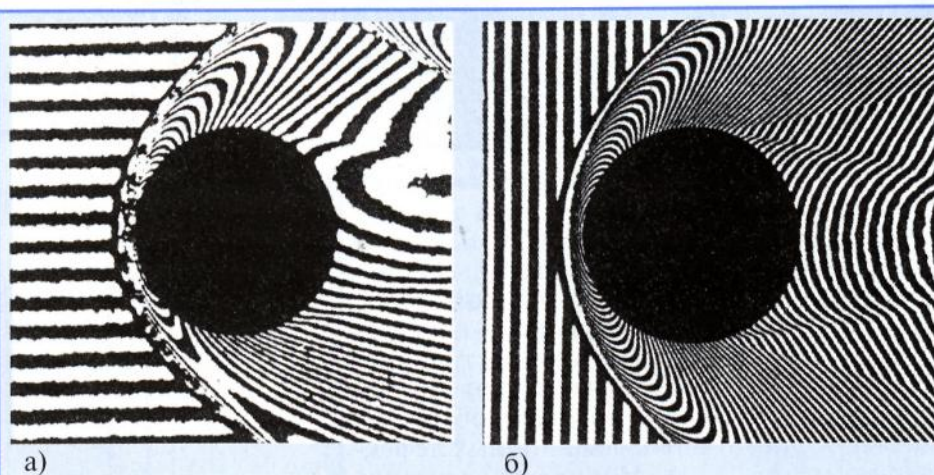


Рис. 3. Интерферограммы движения баллистического объекта со скоростью 800 м/с , полученные с помощью рубинового лазера (а) и ИПЛЭН (б)

При подаче импульса напряжения на диод на поверхности диэлектрических пластин и в пристенном слое десорбционного газа начинается процесс лавинной ионизации. В результате образуется плазма, заполняющая щели между диэлектрическими перегородками. Фронт плазмы, обращенный к аноду, характеризуется высокой эмиссионной способностью. Первояны диодов с такими эмиттерами превышают $21 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$. Предельная

500 мм, внутри которого коаксиально скомпонованы все элементы схемы. Коаксиальная линия заканчивается лазерным диодом, который закреплен в системе свинцовых цилиндров. Цилиндры вместе с выходным окном защищают обслуживающий персонал от рентгеновского излучения.

Области применения импульсных лазерных источников наносекундного излучения определяются такими важнейшими их характеристиками,

как энергия излучения, ширина спектральной линии излучения и диаграмма направленности. Энергия излучения многоэлементного лазера определяется уравнением [8]

$$E = 1/3f(x, L, R)K(E_{нак} - E_{пор}),$$

где f — функция выхода излучения, учитывающая потери света в резонаторе, x — нерезонансные потери на единицу длины резонатора, L — длина резонатора, R — коэффициент отражения зеркал, K — отношение излучаемой площади к полной площади лазерной мишени, определяемое геометрией пазов и излучающих элементов; $E_{нак}$, $E_{пор}$ — энергия накачки и пороговая энергия генерирования лазерного излучения, соответственно.

Коэффициент $1/3$ введен в связи с тем, что лишь около 30% энергии электронного пучка идет на образование неравновесных носителей. Увеличить энергию излучения только за счет оптимизации параметров x , L , R практически невозможно. Функция выхода $f(x, L, R)$ в основном зависит от качества полупроводникового монокристаллического материала и структур. В принципе, добиться большей энергии излучения можно за счет увеличения энергии накачки. Но при плотности энергии лазерного излучения около 10 мДж/см² разрушаются зеркала резонатора. Сейчас предельное значение энергии излучения при диаметре излучающей области 3 см составляет 100 мДж. Чтобы повысить его, необходимо работать над увеличением пороговой плотности энергии разрушения зеркал.

Другой очевидный путь повышения энергии излучения — уменьшить пассивную площадь мишени, занимаемую неизлучающими разделительными пазами между элементами, тем самым увеличив значение K . Для за-

щенной зоны и температурой полупроводника. Для лазеров на полупроводниковых соединениях A^3B^5 длинноволновый температурный сдвиг составляет примерно 0,1 нм/град. Уже при небольшом превышении пороговой мощности происходит генерирование излучения в многомодовом режиме, что резко ухудшает когерентность. Другая причина уширения спектра излучения — нагрев кристалла за время воздействия импульса накачки. Экспериментальные значения полосы излучения составляют от 10 до нескольких десятков ангстрем (от единицы до нескольких нанометров).

Традиционные методы изготовления многоэлементных структур (фрезерование микрофрезой) из-за наличия сколов не позволяют уменьшать размеры отдельных элементов до менее 150—200 мкм. В результате теряется эффективная площадь излуче-

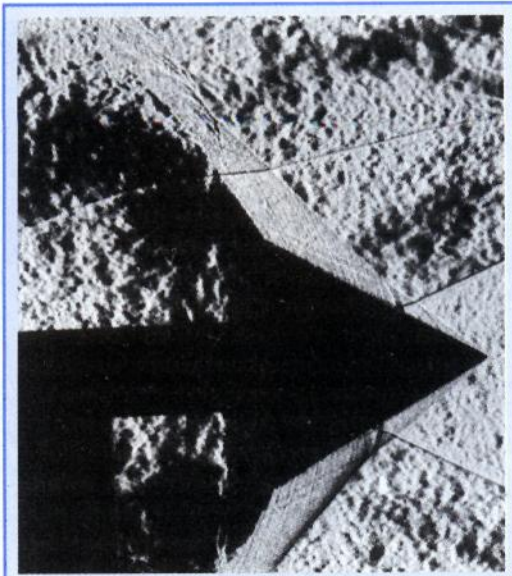


Рис.6. Теневой снимок газодинамического эксперимента

водниковых лазеров можно оценить следующим образом [9] $\theta = D^{0,7}$ град, где θ — угол диаграммы направленности, град, D — размер отдельного излучающего элемента, мкм. При диаметре мишени 15 мм и размере полупроводниковых кристаллов 150x150 мкм реальное значение диаграммы направленности составляет 30—35°.

Один из способов улучшения диаграммы направленности — увеличение длины резонатора за счет применения выносной, хорошо сфокусированной оптической системы. Однако наряду с сужением диаграммы направленности до нескольких градусов усложняется конструкция прибора и снижается общая мощность излучения. Другой способ — формирование на поверхности полупроводникового кристалла элементов любой геометрии и размеров (точность и разрешение определяются маской, формируемой методом фотолитографии). Наиболее прост в применении способ, основанный на создании конфокального резонатора, который при оптимизации формы зеркал позволяет получить угол направленности 1,0—1,5 град.

Созданный в НИИ “Платан” ИПЛЭН имеет следующие характеристики:

Энергия светового импульса, мДж	20—40
Длительность импульса по основанию, нс	5
Расходимость лазерного излучения, град	20—30
Число одновременно излучаемых длин волн	4
Дискретные длины волн излучения, мкм	0,38—1,1
Ширина спектральной линии излучения, нм	1,0—5,0
Диаметр излучающей поверхности, мм	10—20
Частота следования импульсов, Гц	до 30
КПД, %	5—7
Время задержки светового импульса по отношению к управляющему сигналу, сек	0,5·10 ⁻⁶
Наработка на отказ, имп.	2·10 ⁵
Температурный диапазон эксплуатации, °С	20... 30
Потребляемая мощность с источником накачки, Вт	не более 50
Масса (общая), кг	22

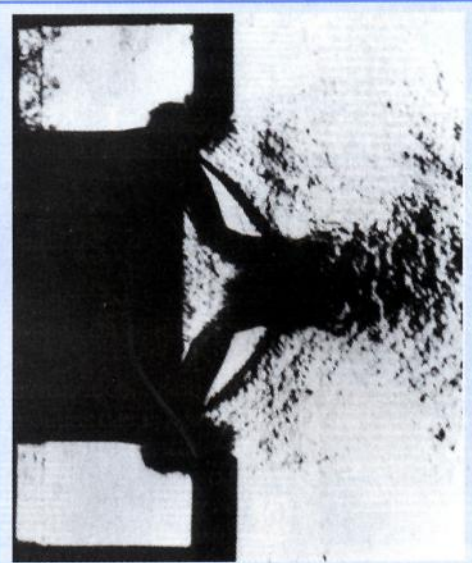


Рис.5. Теневой снимок полета снаряда

ния. В то же время расстояние между зеркалами резонатора, определяемое глубиной проникновения электронного пучка с энергией около 250 кэВ, составляет несколько десятков микрон. В результате усиливается значительная часть оптического излучения в направлениях, не совпадающих с осью резонатора. Одновременно возбуждается большое число типов колебаний высшего порядка, максимумы которых в дальней зоне отклонены от оси резонатора. Наличие таких мод определяет широкую диаграмму направленности, при этом яркость излучения лазера снижается. Диаграмму направленности полупро-

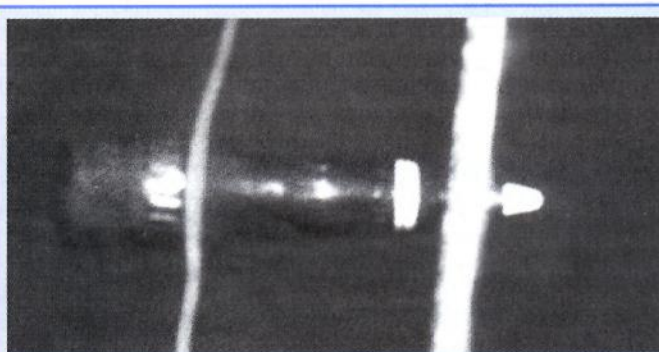


Рис.4. Теневой снимок пробоя преграды снарядом на скорости 900 м/с

данной излучающей площади этот запас не превышает 30%. Повышение мощности лазера за счет увеличения активной области в поперечном направлении (в том числе путем использования многоэлементных структур с размерами отдельных ячеек 200—300 мкм и более) ухудшает КПД и расходимость излучения прибора.

В полупроводниковых лазерах положение спектральной линии излучения определяется шириной запре-

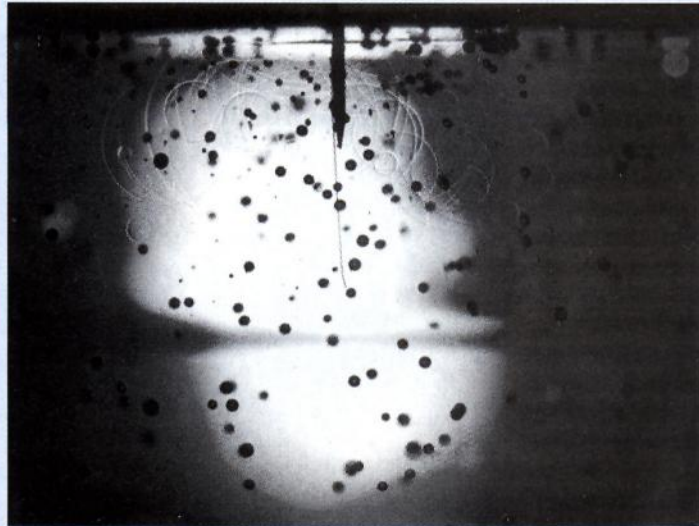


Рис.7. Визуализация ударных волн в жидкости

Для масштаба со стороны свободной поверхности опущена игла диаметром 550 мкм с тонкой проволокой диаметром 50 мкм. Темные точки — шарики полистирола диаметром 585 мкм (к поверхности некоторых примыкают пузыри)

В сравнении с широко известными импульсными источниками света и высококогерентными лазерами ИПЛЭН имеет целый ряд достоинств. В их числе:

- возможность получения равномерно освещенного рабочего поля без зернистой структуры (спекл-фона);

- отсутствие на рабочем поле дифракционных изображений от щели или ножа, поскольку они пространственно не совмещены и размывают друг друга;

- менее жесткие требования к соосному положению источника и к положению его изображения по глубине (при широком источнике всегда есть пучки, заполняющие апертуру оптической системы);

- возможность разделять энергию световолоконным коллектором по нескольким оптическим каналам с заданной задержкой благодаря большой излучающей поверхности;

- простота перевода оптической системой пространственного распределения излучения, заданного геометрией излучающих площадок, в угловое, что позволяет формировать одноцветный или многоцветный световой пучок заданной конфигурации;

- одновременное излучение на нескольких длинах волн за счет размещения на мишени различных полупроводниковых кристаллов;

- малые значения времени излучения (10^{-9} с) и времени задержки (менее $0,5 \cdot 10^{-6}$ с) импульса света по отношению к управляющему импульсу, что позволяет исследовать процессы, про-

текающие со скоростью 15 км/с;

- высокие ударо- и вибропрочность, благодаря чему можно регистрировать процессы ударного воздействия в непосредственной близости от объекта воздействия;

- простота конструкции благодаря отсутствию теплоотвода.

Впервые ИПЛЭН был использован в качестве источника света наносекундной длительности в теневых и интерференционных приборах для исследования быстротекущих про-

ИПЛЭН использовался и для получения снимков взаимодействия двух скачков уплотнения. Первый, конический, образуется при обтекании кольца с 5°-ным коническим поднутрением, второй возникает при сверхзвуковом обтекании конуса, расположенного по оси кольца (рис.6). Газодинамический эксперимент проводился на сверхзвуковой трубе при числе Маха $M=3,11-3,14$, полном давлении в приемнике установки $P=0,8-1,2$ МПа и температуре 273 К. Для оптической визуализации обтекания объекта сверхзвуковым потоком использовался теневой прибор ИАБ-451.

Исключительное пространственно-временное разрешение ИПЛЭН демонстрирует снимок вторичных ударных волн от пузырей, захлопывающихся после роста в волне разгрузки, которая возникает при отражении волн сжатия от свободной поверх-

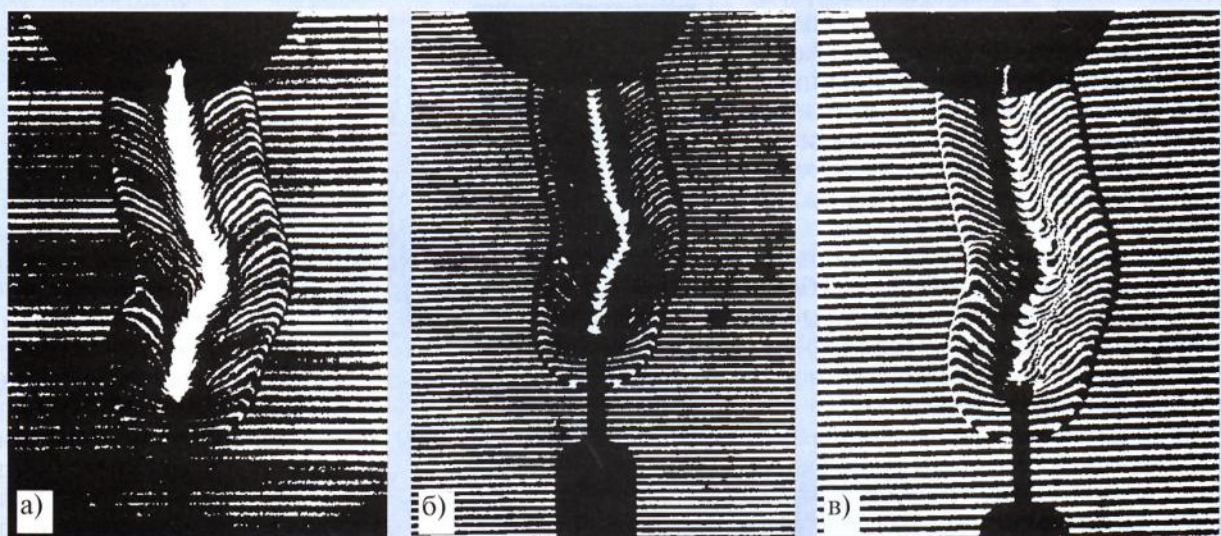


Рис.8. Интерферограммы плазменного шнура высоковольтного импульсного разряда, зарегистрированные на трех длинах волн (источник — трехцветный полупроводниковый лазер, а); на длине волны зеленого — 0,535 мкм (б) и красного — 0,645 мкм (в) излучения (источник — полупроводниковый лазер)

цессов на баллистической и газодинамической установках (рис. 3) [10]. Для сравнения использовался рубиновый лазер ОГМ-20 с энергией 1,2 Дж в импульсе длительностью 120 нс. Баллистическая установка имела дифракционный интерферометр с размером поля 200x300 мм. Как видно из рисунка, при использовании рубинового лазера полосы перед объектом сливаются, так как их поперечный размер сравним с неоднородностью, обусловленной спекл-эффектом. Интерферограмма, полученная с помощью ИПЛЭН, отличается высоким контрастом, на ней полностью отсутствует спекл-структура. Аналогичная по качеству интерферограмма получена и при исследовании динамики движения тела сложной формы. Чрезвычайно высокая ударо- и вибропрочность ИПЛЭН позволила зарегистрировать процесс разрушения преграды снарядом, летящим со скоростью 900 м/с (рис. 4), и сфотографировать его полет всего в пяти метрах от пушки (рис.5).

ности жидкости (рис.7). Скорость ударной волны равна 1,5 мкм/ч (1500 м/с), время жизни пузырьков — около 1 мкс. По данным компьютерной обработки снимка, амплитуда и длительность ударных волн от пузырьков на фазе захлопывания (светлые кольца) при пространственной протяженности около 20 мкм составляют от 1000 до 3000 атмосфер и примерно 20 нс соответственно.

Возможность одновременно генерировать излучение на нескольких длинах волн делает перспективным применение прибора для исследования плазменных процессов в высоковольтных импульсных разрядах (рис. 8). В эксперименте для регистрации искрового разряда между шаровыми электродами диаметром 3 и 0,3 см, отстоящими друг от друга на 6—8 см, использовали трехдлинноволновый лазер и интерферометр Маха-Цандера с диаметром рабочего поля 200 мм. ИПЛЭН запускался синхронно с подачей на шаровые электроды им-

пульсного напряжения амплитудой 200—250 кВ. Интерферограммы регистрировались в основной (на трех длинах волн) и дополнительной (на длинах 0,535 и 0,645 мкм) ветвях интерферометра. Интерферограмма, полученная в основной ветви интерферометра, ахроматизирована, что позволило определить смещение полос на цилиндрической ударной волне. Интерферограммы на одной из трех длин волн использовали для определения концентрации электронов по оси разряда [11].

Проведенные эксперименты убедительно доказывают возможность применения ИПЛЭН для исследований в баллистике, гидро- и газодинамике, плазме. Прибор перспективен для решения многих задач: телевизионного наблюдения объектов с пространственно-временной селекцией в рассеивающих воздушных и водных средах; применения в системах экологического контроля воздушного бассейна путем зондирования атмосферы короткими импульсами на нескольких длинах волн одновременно; в мобильных системах воздушной и морской навигации, курсоуказателей маячкового типа (благодаря формированию многоцветного светового пучка заданной пространственной конфигурации). Большого эффекта от применения ИПЛЭН можно ожидать при экспериментальной дора-

ботке конструкций и режимов работы газотурбинных двигателей аэрокосмической техники нового поколения.

Для более оперативной визуализации и обработки результатов экспериментов на базе ИПЛЭН потребуются создать компьютеризованный телевизионный комплекс с использованием ПЗС-формирователя сигнала изображения или видеоконвертера нового поколения и многопучкового кинескопа с разрешением более 2500 строк. Разрешение такого комплекса — не хуже чем фотопленки, а оперативная компьютерная обработка существенно сократит время эксперимента, повысив точность и скорость исследований на баллистических и газодинамических установках. Новые перспективы открывает прибор и в фундаментальных исследованиях, позволяя отказаться от применения сложных импульсных газовых и других лазеров со специальными устройствами синхронизации и выделения вспышек.

Литература

1. Басов Н.Г., Богданкевич О.В., Девятков А.Г. Оптический квантовый генератор на кристалле CdS с возбуждением быстрыми электронами. — ДАН СССР. Сер. физ., 1964, т.155, N4.
2. Королев С.В., Олихов И.М., Петров Д.М. Электронное возбуждение по-

лупроводниковых лазеров. — Электронная промышленность, 1973, N5, с.22.

3. Богданкевич О.В. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком. — Квантовая электроника, 1994, N12.

4. Уласюк В.Н. Квантоскопы. — М.: Радио и связь, 1989.

5. Олихов И.М., Гольченко А.Н., Гушин М.В., Косовский Л.А., Уласюк В.Н. Лазер. — Патент РФ N 2063097 (приоритет от 22.03.1994).

6. Гольченко А.Н., Гушин М.В., Уласюк В.Н. Холодный катод. Авт. свид. СССР № 1274528 (приоритет от 6.03.1985).

7. Месяц Г.А. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. — Новосибирск: Наука, 1983.

8. Богданкевич О.В., Дарзбек С.А., Елисеев П.Г. Полупроводниковые лазеры. — М.: Наука, 1976.

9. Туманова А.Ф. Неаксиальные типы колебаний в полупроводниковых лазерах с распределенными параметрами. Кандидатская диссертация. — М., 1988.

10. Гольченко А.Н., Глаголев А.И., Иванов В.Ф., Менде Н.П., Олихов И.М., Петрушенко Ю.В. Оптические исследования быстропротекающих процессов с использованием полупроводникового лазера с электронной накачкой. — Измерительная техника, 1994, № 6.

11. Диагностика плазмы. — М.: Мир, 1967.

Представляем автора статьи

ОЛИХОВ Игорь Михайлович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИИ "Платан". Закончил Таганрогский радиотехнический институт в 1962 году. Автор более 60 научных публикаций. Основные направления научно-исследовательской деятельности: разработки в области СВЧ-техники, полупроводниковых лазерных приборов и систем на их основе. Несколько разработок автора отмечены золотыми медалями и дипломами Всемирного салона изобретений "Брюссель-Эврика".

Высокая технология микроэлектроники помогает создавать мобильные лазерные системы для обеспечения посадки летательных аппаратов и проводки судов в экстремальных условиях

Мы имеем в виду импульсные полупроводниковые лазеры с электронной накачкой, статью о которых вы только что прочитали. Особенности ИПЛЭН в формировании многоцветного светового луча заданной пространственной конфигурации и технологичность разработки обеспечили возможность создания на их основе оптических навигационных устройств безопасного судовождения и посадки летательных аппаратов. Их мировой технический уровень подтвержден патентами РФ, золотыми медалями Всемирного салона изобретений "Брюссель-Эврика'97" и Международной выставки изобретений в Женеве (1998 год). От всей души поздравляем разработчиков с очередной наградой и желаем им дальнейших творческих удач. Статью о новых навигационных устройствах редакция предполагает опубликовать в одном из ближайших номеров.

А
Н
О
Н
С