

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАКАЧКОЙ. ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

М.М. Зверев, МИРЭА, г. Москва;

С.В. Иванов, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. С.-Петербург;

И.М. Олихов, ФГУП «НИИ «Платан» с заводом при НИИ», г. Фрязино

Представлены результаты работ по созданию полупроводниковых лазеров с электронной накачкой по промышленной технологии. Оцениваются потенциальные возможности использования лазерных электронно-лучевых трубок в дисплеях, в терапии онкологических заболеваний, в исследовании быстропротекающих процессов, в системах воздушной и морской навигации, а также в ТВ-системах с пространственно-временной селекцией. Рассмотрены недостатки лазеров при использовании монокристаллов полупроводников в качестве излучающих элементов и перспективы их замены на полупроводниковые квантово-размерные структуры. Приведены экспериментальные результаты по созданию и исследованию лазерных излучателей на различных полупроводниковых квантово-размерных структурах. Результаты работ открывают возможность создания нового поколения малогабаритных лазеров с электронной накачкой, обладающих уникальными свойствами и перспективами применения в информационных и измерительных системах.

Работы по созданию полупроводниковых лазеров с электронно-лучевой накачкой (ПЛЭН) ведутся в мире уже не одно десятилетие [1,2]. Но идея создания такого лазера [3], как и разработка его промышленной технологии [4, 5], были впервые реализованы в России.

Применение для накачки активных сред электронного пучка, формируемого и управляемого общеизвестными методами и средствами, позволило разработать новый класс приборов квантовой электроники – лазерные электронно-лучевые трубки, представляющие собой гибриды электронно-оптических систем и полупроводниковых (п/п) лазерных мишеней (рис.1).

Работа таких источников излучения основана на осуществлении и поддержании режимов преобразования энергии модулированных или сканирующих электронных потоков накачки полупроводниковыми оптическими резонаторами в модулированное или ска-

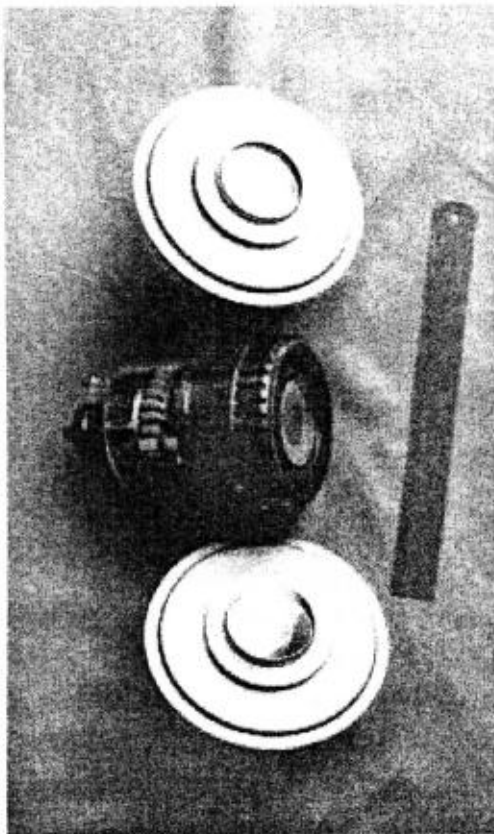
нирующее когерентное излучение (рис. 2). В ряде практических применений лазерной техники ПЛЭН с успехом конкурирует с лазерами других типов, а в ряде случаев позволяет достичь параметров систем, которые невозможно получить другими средствами. Уникальные возможности ПЛЭН определяются характеристиками излучения, которые, в свою очередь, зависят как от характеристик полупроводниковых монокристаллов – преобразователей энергии электронного потока в оптическое излучение, так и от технико-технологических возможностей формирования и модуляции электронных потоков и изготовления полупроводниковых оптических резонаторов (рис.3).

Особенности таких лазеров:

– возможность получения излучения в широком оптическом диапазоне (0,32-30 мкм), определяемом шириной запрещенной зоны используемого полупроводникового монокристалла;

- возможность одновременного излучения на нескольких длинах волн путем размещения на мишенях различных полупроводниковых кристаллов;
- большая излучающая поверхность;
- возможность получения равномерно освещенного рабочего поля без зернистой структуры (отсутствие спекл-фона);
- исключительно низкая когерентность (на 4-5 порядков ниже твердотельных и газовых лазеров) и многомодовость, резко снижающие вредное воздействие излучения ПЛЭН на глаза человека;
- простота перевода оптической системой пространственного распределения излучения, заданного геометрией излучающих площадок, в угловое, по-

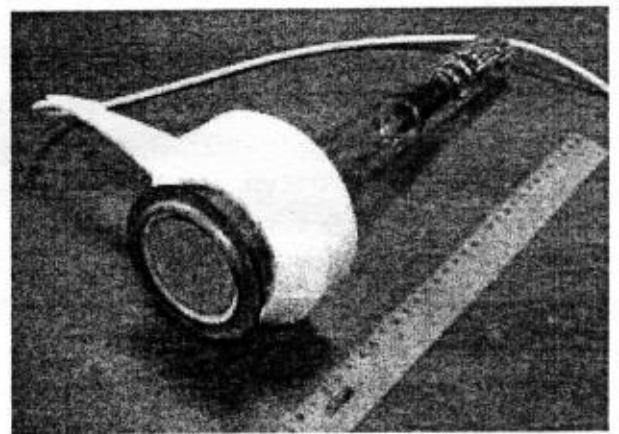
- зволяющее формировать световые пучки заданной конфигурации;
- возможность генерации сверхкоротких импульсов излучения (10^{-9} - 10^{-11} с);
- устойчивость и точность синхронизации;
- простота управления интенсивностью и пространственным позиционированием лазерного луча средствами телевизионной и цифровой техники;
- сочетание в ПЛЭН свойств полупроводникового лазера и свойств электронно-лучевой оптики реализует возможность широкополосной модуляции оптического излучения большой мощности путем модуляции электронного потока накачки методами и средствами ВЧ- и СВЧ-техники до частот в 10 ГГц [6];



а



б



в

Рис. 1. Конструкции лазеров:
а – импульсные лазеры; б, в – сканирующие лазеры

- сравнительно простая система охлаждения;
- устойчивость к механическим нагрузкам благодаря монолитности оптических полупроводниковых резонаторов.

Реально достигнутые характеристики излучения промышленных образцов импульсных и сканирующих лазеров с продольной накачкой приведены в табл. 1.

- Вышеперечисленные особенности лазеров позволили предложить и реализовать ряд экспериментальных образцов оптико-электронных устройств для информационных и измерительных систем с характеристиками, недостижимыми другими средствами [7]:
- калибровку фотоприемников и времяанализирующих ЭОП с субпикосекундным разрешением (10^{-13} с) [8];
 - диагностику пучков заряженных частиц в процессе их формирования в реальном масштабе времени [9];
 - регистрацию быстропротекающих процессов теневыми и интерференционными методами в баллистике, гидро- и газодинамике, в плазме газового разряда, в том числе одновременно на нескольких

длинах волн с пространственным и временным разрешением ≤ 10 мкм и $\leq 10^{-9}$ с соответственно (рис. 4) [10];

- телевизионное наблюдение объектов и процессов в рассеивающих воздушных и водных средах в режиме пространственно-временной селекции объектов с пространственным и временным разрешением до 0,5 м и $\leq 10^{-9}$ с соответственно (рис. 5);
- отображение полноцветной ТВ-информации с высокой и сверхвысокой четкостью на экране до 100 м² (рис. 6) [11,12];
- лазерную сканирующую интроскопию биологических объектов, оптических и полупроводниковых материалов с субмикронным разрешением;
- формирование многоцветного излучения с заданной пространственной конфигурацией с одновременной оптической локацией объектов для нового поколения систем воздушной и морской навигации в экстремальных метеоусловиях [13];
- лазерную диагностику, биостимуляцию, фотодинамическую терапию патологических объектов тела человека [14].

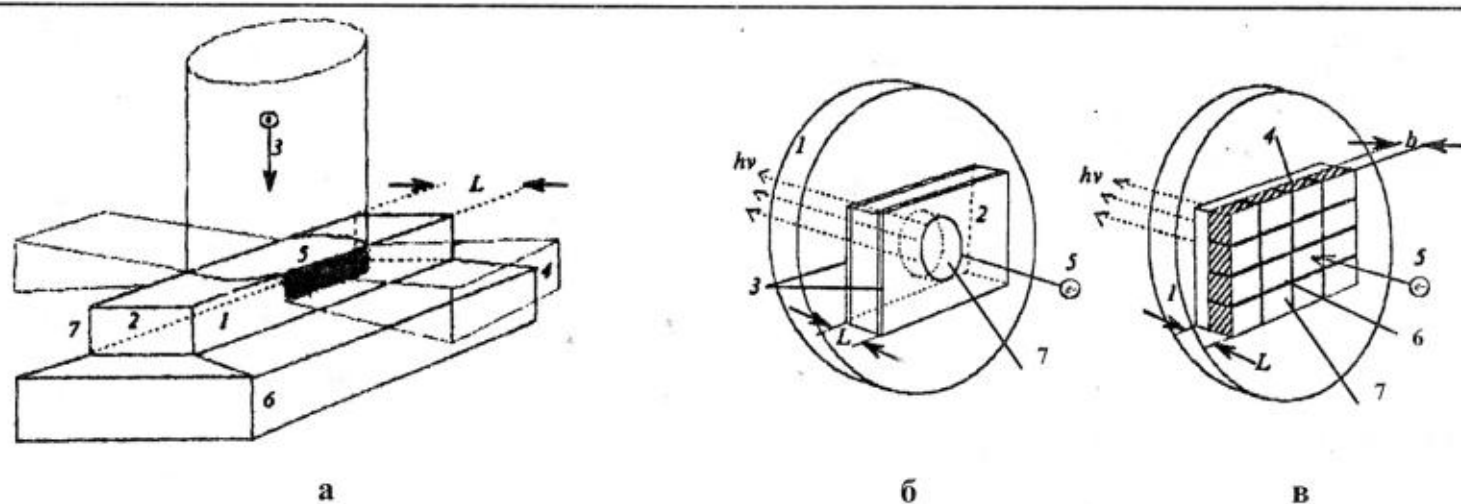


Рис. 2. Схемы работы лазеров:

а – лазер с поперечной накачкой; б – сканирующий лазер; в – импульсный лазер

1,2 – противоположные грани монокристалла; 3 – пучок электронов; 4 – свет; 5 – возбужденная область; 6 – держатель; 7 – зеркала резонатора

1 – подложка; 2 – монокристалл; 3 – зеркала; 4 – область ионизации; 5 – пучок электронов; 6 – оптический поглотитель; 7 – излучающая ячейка

Характеристики излучения и накачки полупроводниковых лазеров

Материалы мишеней	Параметр	Импульсный лазер (ИПЛЭН)	Сканирующий лазер (СПЛЭН)
ZnS ZnO ZnSSe ZnSe ZnTe ZnCdS CdS CdSSe CdSe CdTe GaAlAs GaAs InP GaAlP InGaAs GaAsP GaSb GaAsSb InGaAs	Длина волны излучения, Å	320-1700	320-1700
	Полуширина линии излучения, мкм	30-60	20-50
	Диаметр излучающей ячейки, мм	100-150	20-30
	Диаметр излучающей поверхности, мм	≤20	≤80
	Количество излучающих ячеек, шт.	2·(10 ³ -10 ⁴)	≤10 ⁷
	Длина оптического резонатора, мкм	30-50	5-7
	Напряжение накачки, кВ	150-250	40-50
	Плотность тока накачки, А/см ²	1000	100-200
	Длительность импульса излучения, с	(3-5)·10 ⁻⁹	30·10 ^{-9*}
	Мощность излучения ячейки в импульсе, Вт	(0,5-1,0)·10 ³	2,5-5,0
	Мощность излучения мишени в импульсе, Вт	(5-10)·10 ⁶	2,5-5,0
	Энергия излучения ячейки, Дж	(2,5-5,0)·10 ⁻⁶	(0,1-0,3)·10 ⁻⁶
	Энергия излучения мишени, Дж	(25-50)·10 ⁻³	(120-360)·10 ^{-3*}
	Задержка излучения относительно импульса накачки, с	≤10 ⁻¹¹	≤10 ⁻¹¹
	Расходимость излучения, град.	15-25	10-20
	КПД, %	5-8	3-5
	Рабочая температура, °С	≤20	минус 20

* Развертка по второму ТВ-стандарту: строка – 30·10⁻⁶ с; ячейка – 30·10⁻⁹ с.

С помощью импульсного лазера (ИПЛЭН) впервые удалось зарегистрировать ударные волны в жидкости от пузырьков, захлопывающихся после роста в волне разгрузки (рис.7), определить их пространственную протяженность, длительность и давление.

Генерация излучения одновременно на 3-х длинах волн позволила определить концентрацию электронов

в плазменном шнуре высоковольтного искрового разряда методом, описанным в работе [15] (рис.8).

Летные испытания экспериментальных образцов модулей на импульсных (ИПЛЭН) лазерах продемонстрировали эффективность их использования для зрительных оптических систем посадки летательных аппаратов (ЛА) с расстояний в 15-20 км [13].

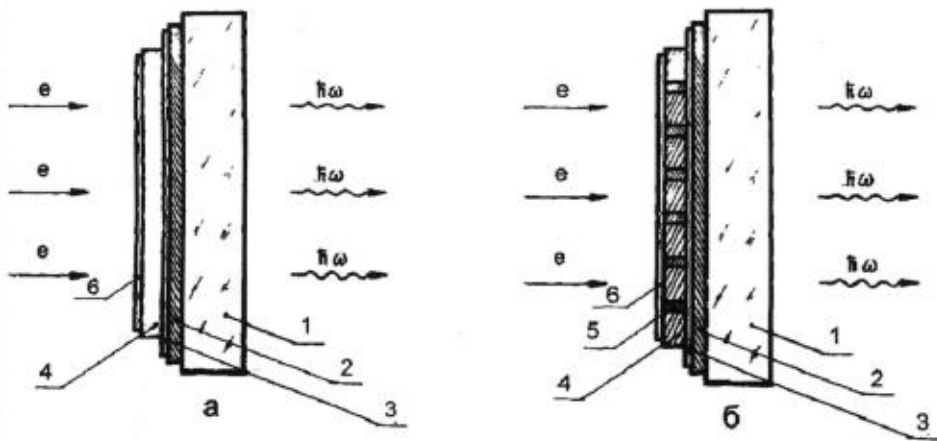
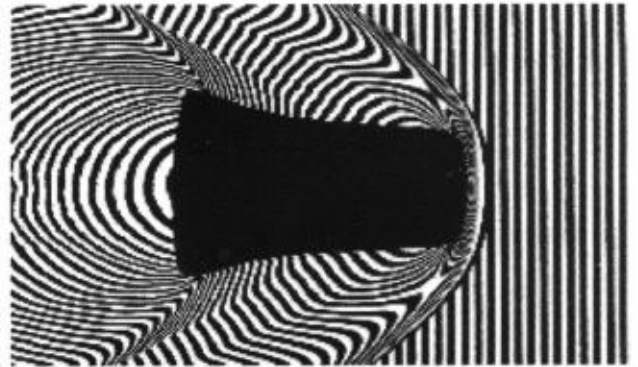


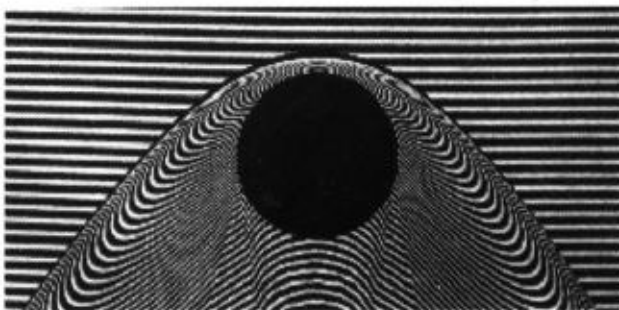
Рис. 3. Конструкции лазерных излучателей: а – сканирующий лазер; б – импульсный лазер.
 1 – лейкосапфировый диск;
 2 – оптический клей; 3 – выходное интерференционное зеркало;
 4 – матрица излучателей;
 5 – оптический поглотитель;
 6 – глухое зеркало



а



б



б

Рис. 4. Визуализация обтекания баллистического объекта:
 а – рубиновый лазер, $v = 800$ м/с;
 б – ИПЛЭН, $v = 800$ м/с;
 в – ИПЛЭН, $v = 800$ м/с

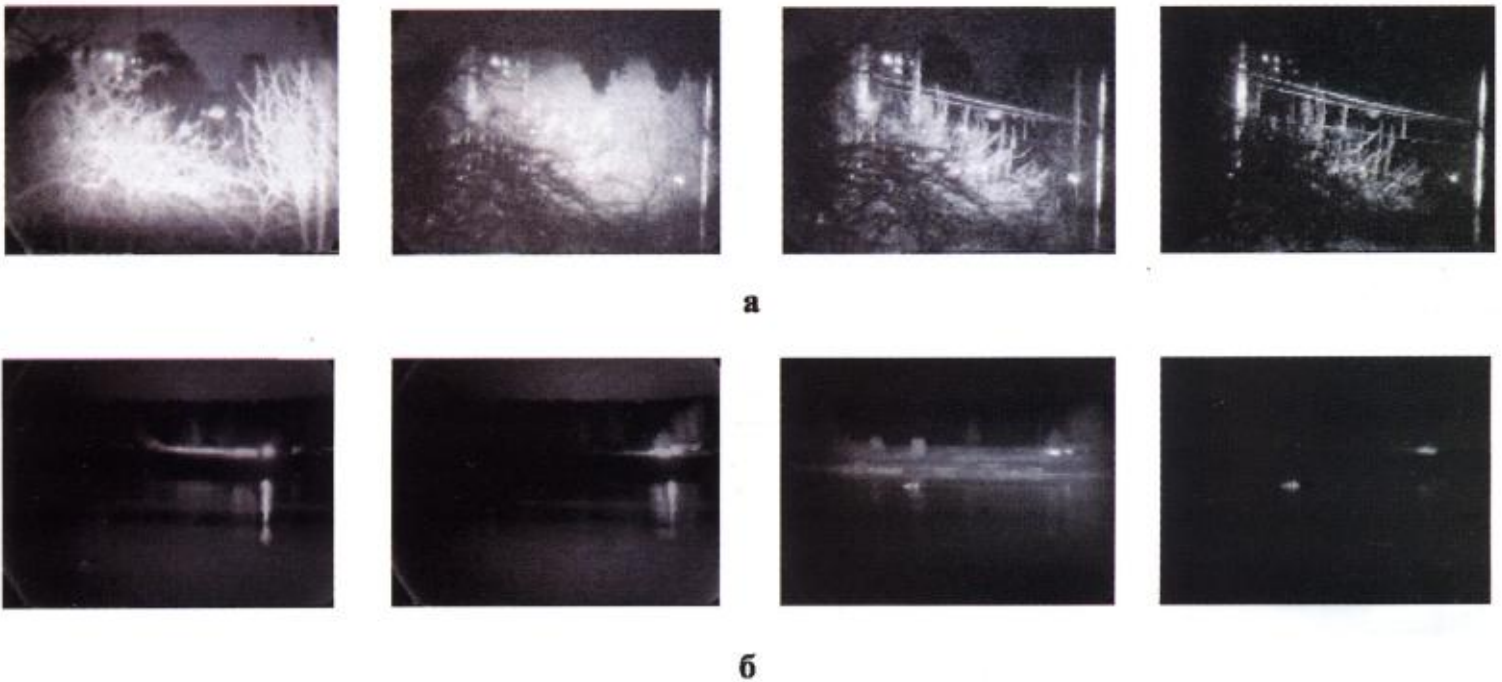
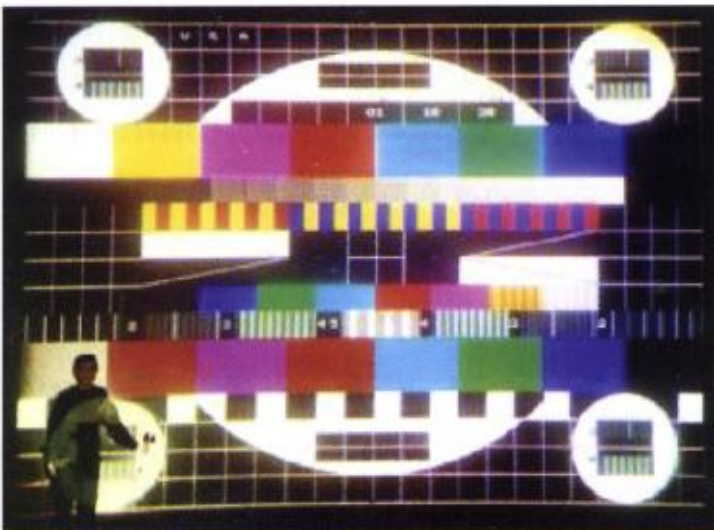
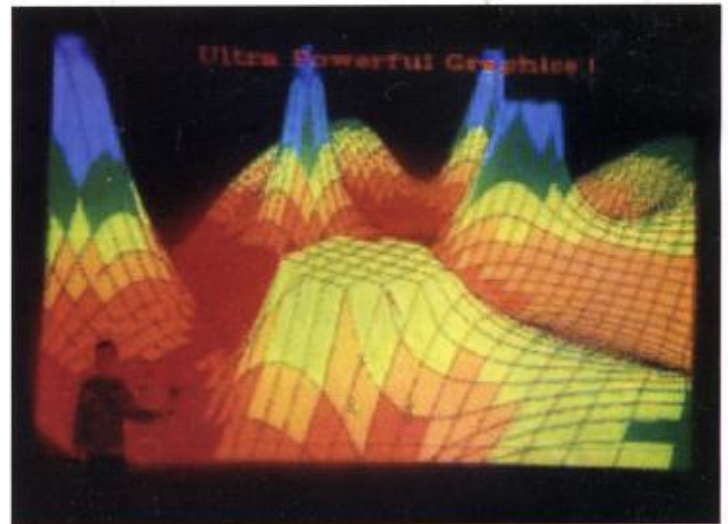


Рис. 5. Пространственно-временная визуализация объектов:
а – железнодорожный переезд. Дистанция 60 м; б – береговая линия. Дистанция 600 м



а



б

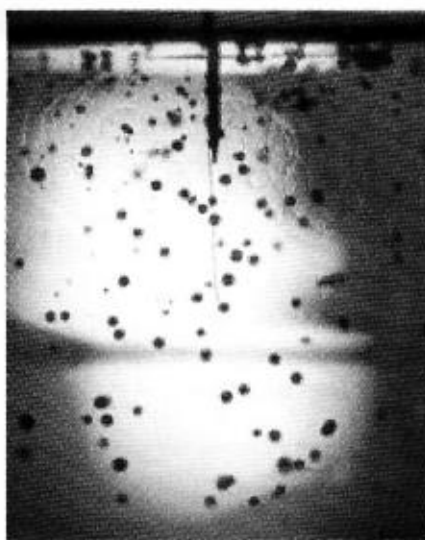
Рис. 6. Проекция изображения с помощью СПЛЭН на большой экран:
а – изображение испытательной таблицы на экране 35 м² с разрешением 1200 строк;
б – изображение в режиме SVGA

Использование в комплекте модулей на импульсных (ИПЛЭН) и сканирующих (СПЛЭН) лазерах обеспечивает одновременное высвечивание трехцветной курсоглиссады в виде пространственно управляемого светового коридора и подсветку границ ВВП и РД в режиме пространственно-временной селекции. Одновременно с высвечиванием цветовых зон модулированное лазерное излучение обеспечивает в режиме оптической локации определение местоположения ЛА в цветовой зоне и расстояние до него. Информация о местоположении ЛА от руководителя визуальной посадки может быть передана на борт самолета или корабля, обеспечивая независимость работы оптической системы от естественных и преднамеренных световых и радиоэлектронных помех (рис.9). Особенностью модулей является повышенная проникаемость лазерного излучения в плохих метеоусловиях. В то же время, благодаря низкой когерентности излучение не оказывает вредного воздействия на глаза человека.

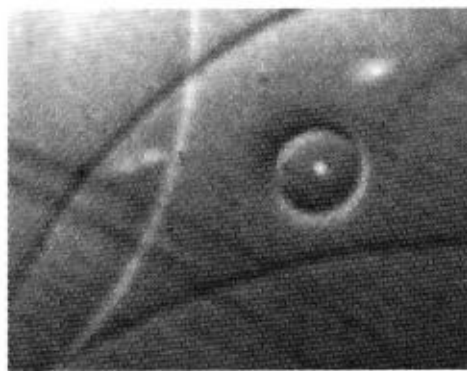
Несмотря на то, что перечисленные выше возможности использования лазеров с накачкой электрон-

ным пучком апробированы и экспериментально подтверждены, широкого распространения такие системы не получили. Главными причинами этого являются высокий уровень пороговой плотности мощности накачки, высокие напряжения, необходимость охлаждения, трудоемкость изготовления излучающих мишеней и выращивания монокристаллов полупроводников заданного качества. Действительно, в импульсных лазерах максимальные мощности получены при энергиях электронного пучка 250-350 кэВ [5]. В проекционных системах отображения информации обычно используются пучки с энергией 50-70 кэВ, причем для охлаждения кристаллов используются холодильные установки [12]. Использование высоких напряжений неизбежно приводит к увеличению размеров устройства и усложнению конструкций модулей.

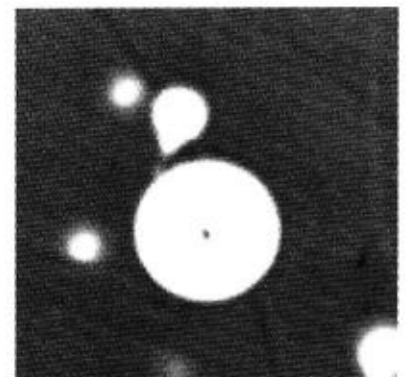
Сегодня, благодаря технологическим успехам, появилась возможность значительно улучшить параметры ПЛЭН. Так, в качестве активного элемента лазера используются квантово-размерные (КР) гетероструктуры. За счет локализации электромагнит-



а



б



в

Рис. 7. Ударная волна в жидкости:

а – общий вид эксперимента; б, в – увеличенное изображение пузырьков. Диаметр пузырьков около 30 мкм; давление около 3000 атм; время экспозиции 5 нс; протяженность фронта около 30 мкм; скорость распространения фронта 1500м/с

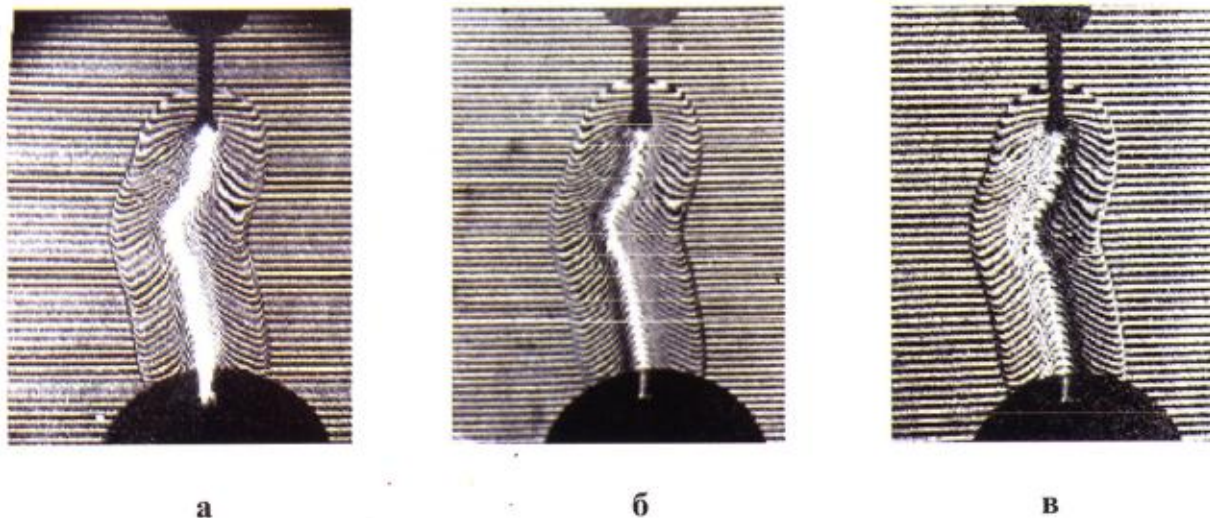


Рис. 8. Визуализация процессов в плазме высоковольтного разряда на трех длинах волн одновременно:
 а – $\lambda = 510-660 \text{ нм}$, $\Delta\lambda = 150 \text{ \AA}$; б – $\lambda = 525 \text{ нм}$, $\Delta\lambda = 35 \text{ \AA}$; в – $\lambda = 635 \text{ нм}$, $\Delta\lambda = 45 \text{ \AA}$

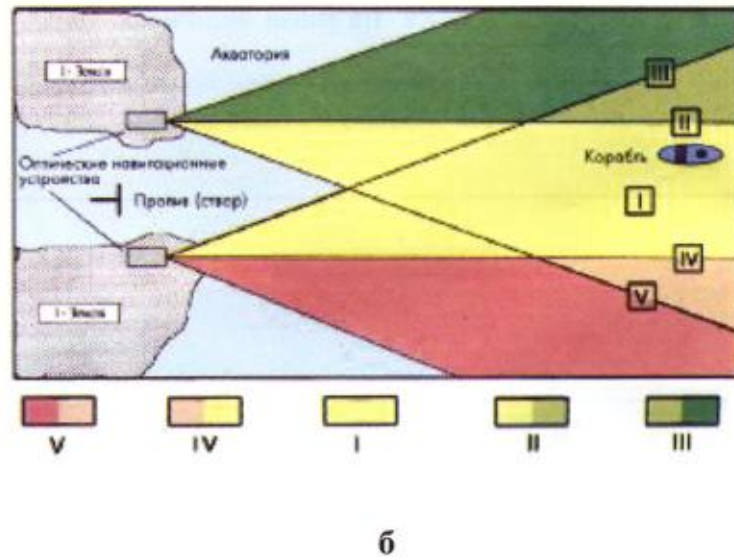
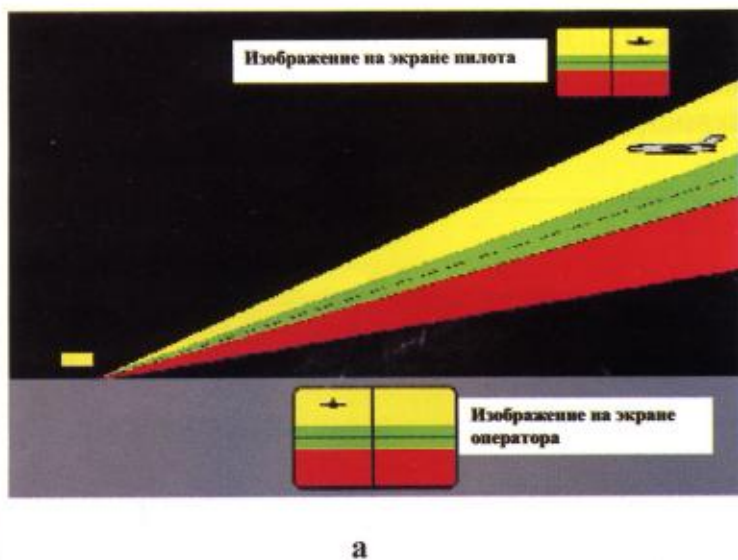


Рис. 9. Системы визуальной навигации:
 а – воздушная система навигации; б – морская система навигации

ного поля в пределах волновода и эффективного дрейфа носителей к активной области удается уменьшить потери света на длине волны генерации и увеличить концентрацию частиц в области рекомбинации. Изменение энергетического спектра носителей заряда в КР-структурах приводит к увеличению спектральной плотности излучения. Это по-

зволяет уменьшить рабочую энергию пучка и пороговую плотность тока, а также повысить рабочую температуру кристалла до комнатной.

Подобные структуры широко используются при изготовлении лазерных диодов (ЛД). Однако при использовании электронно-лучевой накачки не требуется наличия *p-n*-перехода и омических контактов,

что значительно упрощает технологию изготовления активных элементов, расширяет возможности выбора соединений для работы на разных длинах волн и позволяет уйти от проблем, ограничивающих срок службы ЛД. При электронно-лучевой накачке неравновесные носители возбуждаются в объеме, определяемом сечением электронного пучка и глубиной его проникновения в кристалл. Таким образом, отсутствует присущая ЛД проблема транспортировки носителей заряда в активную область. Благодаря этому объем активной области при накачке лазера электронным пучком может быть значительно больше, чем при инжекционной накачке, что позволяет получать больший уровень выходной мощности. Увеличивая поперечное сечение пучка, можно проводить накачку лазерных сборок, состоящих из большого числа лазерных элементов. Это обеспечивает дальнейшее увеличение выходной мощности и одновременно позволяет ПЛЭН работать на нескольких длинах волн.

Эффективность использования КР-структур в ПЛЭН была продемонстрирована как в нашей стране, так и за рубежом. В частности, применение многослойных КР-гетероструктур в лазерах с продольной накачкой позволило получить генерацию в сине-зеленом диапазоне в сканирующем режиме при комнатной температуре со средней мощностью больше двух ватт. Прибор работал при напряжении более 30 кВ, а пороговая плотность мощности накачки превышала 1 МВт/см² [16]. Применение КР-структур в сочетании с автоэмиссионными источниками электронов позволило создать лазеры, работающие при энергии электронов ~10 кэВ в красном и инфракрасном диапазонах на структурах CdTe/CdMnTe и GaAs/GaAlAs при комнатной температуре [17], и в сине-зеленом диапазоне (структуры ZnCdSe/ZnSe) – при криогенном охлаждении образца [18]. При этом лазер представлял собой ЭЛТ длиной около 15 мм.

Широкозонные полупроводники на основе ZnSe, используемые при создании ПЛЭН сине-зеленого ди-

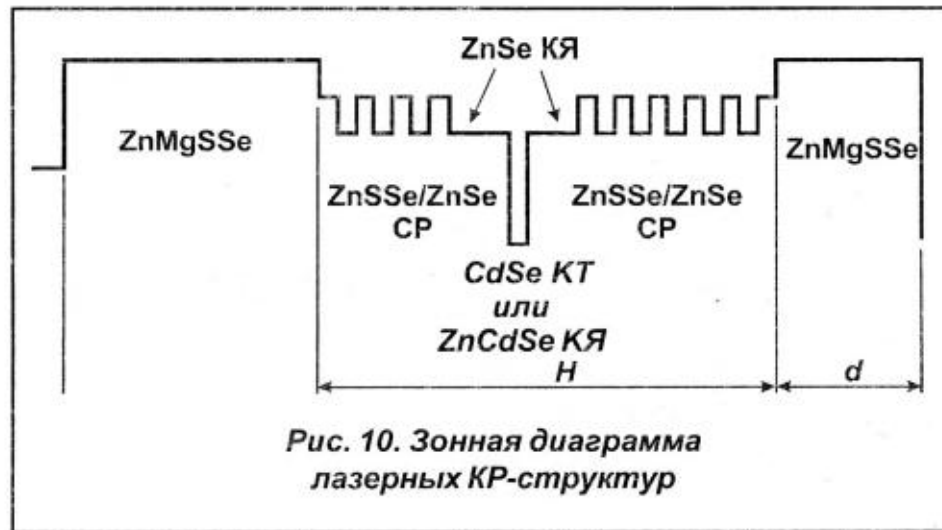


Рис. 10. Зонная диаграмма лазерных КР-структур

апазона, наиболее ярко демонстрируют основные преимущества ПЛЭН по сравнению с ЛД на ZnSe. В данном случае ПЛЭНы являются реальной альтернативой инжекционным приборам, времена жизни которых при комнатной температуре в непрерывном режиме не превышают 400 часов. Именно использование нелегированных КР-структур в ПЛЭН позволяет обойти проблему р-легирования ZnSe, которая заключается в нестабильности азотного акцептора в ZnSe, приводящей к деградации ЛД [19].

Попытки создания ПЛЭН на основе селенида цинка предпринимаются уже в течение нескольких де-

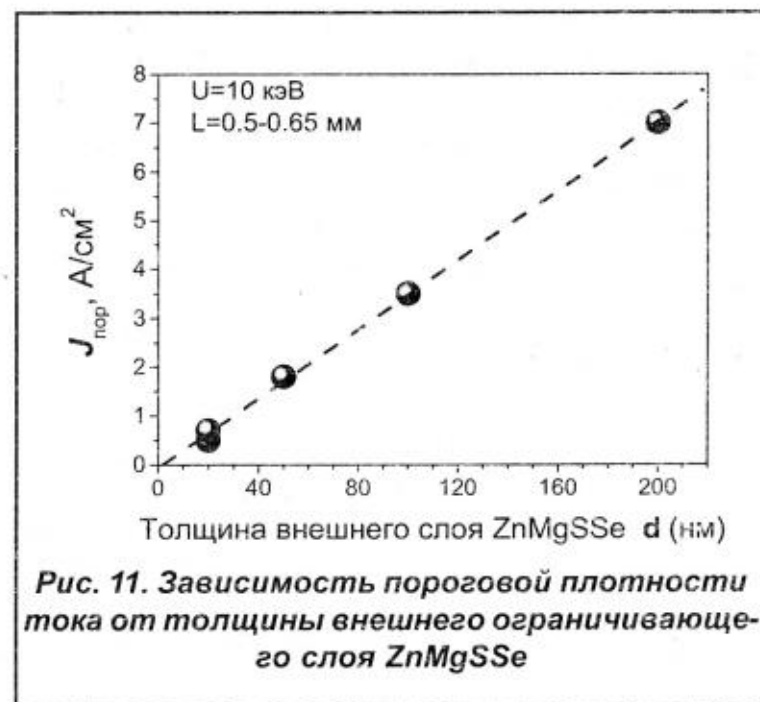


Рис. 11. Зависимость пороговой плотности тока от толщины внешнего ограничивающего слоя ZnMgSSe

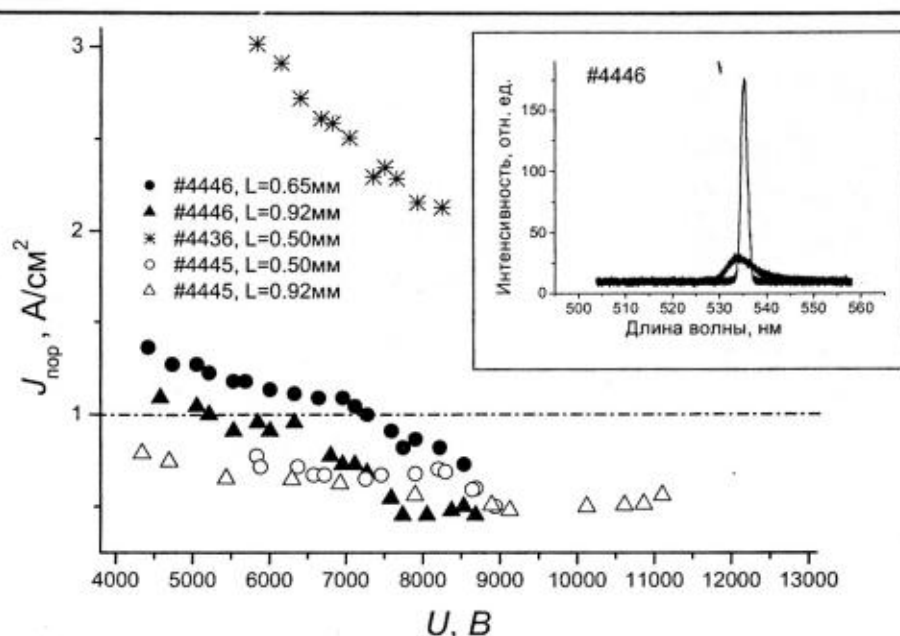


Рис 12. Зависимость пороговой плотности тока от энергии электронного пучка для лазеров на основе различных КР-структур: #4446 – $d=20$ нм, $H=0,37$ мкм; #4445 – $d=20$ нм, $H=0,62$ мкм; #4436 – $d=50$ нм, $H=0,25$ мкм. На вставке представлен спектр излучения лазера на основе структуры с $d = 20$ нм и $H = 0,37$ мкм

ZnMgSSe. Для разных структур варьировались толщины внешнего слоя ZnMgSSe (d) и СП волновода (H). Схематическая зонная диаграмма исследуемых КР-структур представлена на рис. 10. Структуры отличались также и строением активной области, в качестве которой применялась как квантовая яма (КЯ) ZnCdSe, так и наноструктуры CdSe/ZnSe с квантовыми точками (КТ). ПЛЭН с активной областью на основе КЯ (ZnCdSe) и толщиной внешнего слоя $d=50-100$ нм продемонстрировали значения пороговой плотности тока при комнатной температуре $\sim 3-3,5$ А/см² при энергии электронного пучка 25 кэВ [21]. Длительность импульсов накачки составляла 50 нс при частоте следования до 10 Гц. Максимальная оптическая мощность генерации (на

одну грань) при энергии электронов 25 кэВ и плотности тока ~ 10 А/см² составила 5,5 Вт. Использование лазерной КР-структуры такой же геометрии, но с активной областью на основе CdSe-наноструктур с КТ (при номинальной толщине слоя CdSe 2,5–2,8 монослоя (МС)) позволило получить генерацию в зеленой области спектра (520–530 нм) при энергиях электронов 8–30 кэВ и уменьшить пороговую плотность тока пучка электронов до уровня (0,6 – 0,8) А/см² при комнатной температуре [22]. Максимальная импульсная мощность генерации составила 9 Вт при эффективности 1,6% на одну грань. Благодаря более полному использованию энергии накачки в КР-структуре с увеличенной до 0,4 мкм толщиной СП-волновода и активной областью в виде трех равномерно распределенных плоскостей КТ CdSe, максимальные значения эффективности и выходной мощности составили соответственно 4% и 12 Вт с одной грани кристалла [23].

Адаптация полупроводниковых активных элементов для использования в компактных ПЛЭН с источни-

святков лет. Впервые о получении генерации при электронной накачке полупроводникового лазера на основе объемного кристалла ZnSe сообщалось в 1967 году [20]. Пороговая плотность при температуре 77 К и энергии электронного пучка 45 кэВ составила 20 А/см². Дальнейшие исследования, направленные на снижение порога генерации, повышение рабочей температуры, велись как по пути совершенствования качества используемых полупроводниковых кристаллов, так и по линии использования эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур.

КР-структуры для сине-зеленых ПЛЭН с поперечной накачкой электронным пучком выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs. Для ограничения области локализации световой волны в резонаторе, увеличения эффективности сбора носителей и стойкости всей структуры к механическим напряжениям волноводная область структур формировалась в виде сверхрешетки (СР) ZnSSe/ZnSe с периодом в несколько нанометров, ограниченной широкозонными слоями

ками электронного пучка в виде, например, холодных катодов предполагает существенное снижение анодных напряжений при сохранении малой плотности тока в пучке. Потребовалась дальнейшая оптимизация конструкции лазерной КР-структуры на основе селенида цинка, которая привела к значительному уменьшению толщины d внешнего слоя $ZnMgSSe$. Благодаря этому были снижены потери энергии накачки во внешнем ограничивающем слое, особенно существенные при малых энергиях электронного пучка, когда глубина проникновения пучка в кристалл составляет доли микрона. Этот эффект проиллюстрирован на рис.11, где представлена зависимость пороговой плотности тока от толщины d . Для накачки оптимизированных КР-структур использовался импульсный электронный пучок с энергией электронов до 12 кэВ и плотностью тока в плоскости образца до 3 А/см². Длительность импульсов составляла около 200 нс, частота следования – до 10 Гц.

На рис.12 представлена зависимость пороговой плотности тока $J_{пор}$ от энергии электронов для лазеров на основе разных структур. Минимальное значение пороговой плотности тока 0,4-0,5 А/см² наблюдалось при энергии пучка 8-9 кэВ для лазеров на основе структуры с толщиной $d=20$ нм при длине резонатора $L=0,92$ мм. Стоит отметить, что в лазерах с оптической накачкой на основе таких КР-структур был получен рекордно низкий порог генерации – 2.5 кВт/см² [24]. Как следует из рис.2, пороговая плотность тока возрастает при уменьшении длины резонатора, существенно увеличивается с ростом толщины внешнего слоя d и уменьшается с понижением энергии. Минимальная энергия электронного пучка, при которой удалось получить генерацию в таких КР-структурах, составила 3,7 кэВ. При энергии пучка около 5 кэВ максимальная импульсная мощность достигала около 2 Вт. Спектр излучения лазера на основе структуры с толщиной внешнего слоя $d = 20$ нм до и после порога генерации представлен на вставке к рис. 12. Длина волны в максимуме составила 535 нм при ширине линии около 2-3 нм.

Приведенные примеры показывают, что использование КР-гетероструктур позволяет получить лазер-

ное излучение при комнатной температуре и при низких значениях ускоряющего напряжения. При этом имеется возможность дальнейшего уменьшения рабочего напряжения и увеличения эффективности генерации путем совершенствования конструкции п/п структуры. Благодаря низким значениям пороговой мощности накачки, нагрев образца в условиях эксперимента пренебрежимо мал, то есть имеется возможность значительного увеличения энергетических параметров за счет увеличения длительности и частоты следования импульсов накачки и использования сканирующего режима работы. Оценки показывают реальность достижения в лазерах данного типа уровня средней мощности в несколько ватт.

Полученные в экспериментах низкие значения пороговой плотности тока пучка при умеренных ускоряющих напряжениях и комнатной температуре открывают возможность создания компактных приборов – ПЛЭН. При этом благодаря использованию различных п/п структур можно существенно расширить рабочий спектральный диапазон лазеров. Использование структур на основе нитридов Ga и Al, а также соединений $ZnMgO$, позволит в будущем перейти к освоению УФ-области спектра.

Достижения радиоэлектроники тесно связаны с новыми открытиями и физическими процессами. Катодолюминесценция (взаимодействие электронного потока с люминофорами) породила класс приборов – ЭЛТ, без которых немислимы современные средства отображения информации. Изобретение лазера и работы по созданию п/п лазеров дали возможность создать новый тип лазерных ЭЛТ – ПЛЭН, не имеющий мировых аналогов. Накопленный опыт формирования электронных потоков в ЭЛТ, их модуляции и управления позволили получить уникальные характеристики излучения ПЛЭН, недоступные лазерам других типов, и найти им практические приложения.

Дальнейшее совершенствование ПЛЭН и перспективы их массового использования связаны с созданием нового поколения лазеров на основе многослойных КР-гетероструктур в качестве их активных элементов.

Заключение

В радиоэлектронике, как ни в одной отрасли, новейшие достижения теснейшим образом связаны с новыми открытиями и использованием физических процессов, протекающих в микромире. Физический эффект катодолюминесценции (взаимодействие электронного потока с люминофорами) породил целый класс приборов – электронно-лучевых трубок (ЭЛТ), без которых немислимы современные средства отображения информации. Открытие лазерного эффекта и последующие работы по созданию полупроводниковых лазеров дали возможность создать новый тип лазерных ЭЛТ – полупроводниковые лазеры с электронной накачкой (ПЛЭН), не имеющих мировых аналогов. Накопленный научно-технический и технологический потенциал по формированию электронных потоков в ЭЛТ, их модуляции и управлению позволили получить уникальные характеристики лазерного излучения ПЛЭН, недоступные лазерам других типов, а также найти свою нишу в практическом применении, расширяющую возможности использования лазерной техники в различных областях.

Дальнейшее совершенствование ПЛЭН и, самое главное, перспективы их массового использования в уже опробованных областях связаны с освоением нанотехнологии для создания нового поколения лазеров на основе многослойных квантово-размерных гетероструктур в качестве их активных элементов. Внедрение открытий и привлечение научного потенциала коллектива ученых ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе, возглавляемого академиком Ж.И. Алферовым, позволят довести новое поколение ПЛЭН до промышленного выпуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев С.В., Олихов И.М., Петров Д.М. Электронное возбуждение полупроводниковых лазеров. – Электронная промышленность, вып. 2, 1973, с. 21-34.
2. Богданкевич О.В. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком. Обзор. Квантовая электроника, 212, 1994, № 12, с. 1113-1134.

3. 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. 195, № 4, 783.
4. Уласюк В.Н. Квантоскопы. – М.: Радио и связь, 1988.
5. Олихов И.М. ИПЛЭН – новое поколение приборов квантовой электроники. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 1998, № 3-4, 25-29.
6. Богданкевич О.В., Королев С.В., Наседкин А.А., Олихов И.М., Петров Д.М. Накачка полупроводникового лазера модулированным СВЧ сигналом. – Квантовая электроника, 1971, № 4, с. 97-99.
7. Богданкевич О.В., Меерович Г.А., Олихов И.М., Садчихин А.В. Устройства на основе полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком. – Радиотехника и электроника, 1999, 44, 8, 901-919.
8. Новицкий Л.А., Степанов Б.М. Фотометрия быстропротекающих процессов. Справочник. – М.: Машиностроение, 1983, с. 233-242.
9. Королев С.В., Олихов И.М. Исследование структуры и процессов формирования электронных потоков в СВЧ приборах с помощью эффекта электронного возбуждения полупроводников. – Электронная техника. Сер. 1, 1977, № 1, с. 52-60.
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 полупроводниковых лазеров с электронной накачкой. – Измерительная техника, 1994, № 6, с. 22-23.
11. Богданкевич О.В., Садчихин А.В., Созинов С.Б., Уласюк В.Н. и др. Проекционные системы отображения информации на основе квантоскопов. – Техника кино и телевидения, 1998, 10.
12. Макиенко О.М. Лазерные кинескопы нового поколения. Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2000, № 6, с. 54-56.
13. Олихов И.М., Косовский Л.А. Мобильная лазерная трехцветная навигационная система. Надежность в экстремальных ситуациях. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 1999, № 3, с. 46-49.
14. Vakulovskaya E.G., Meerovich G.A., Chental V.V., Ulasuk V.N. CIS Selected Papers. "Laser Use in Oncology". – SPIE, 1996, v. 2728, 210.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Oncology". – SPIE, 1996, v. 2728, 210.
15. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Ходдлстоуна и С.М. Леонарда. – М.: Мир, 1967.
16. Basov N.G., Dianov E.M., Kozlovsky V.I., Krysa A.B., Nasibov A.S., Popov Yu.M., Prokhorov A.M., Trubenko P.A., Shcherbakov E.A. Laser Cathod - Ray Tubes Using Multilayer Heterostructures. – Laser Physics, 1996, vol.6, 3, 608-611.
17. Molva E., Accomo R., Labrunie G., Cibert J., Bodin C., Dang L.SFenillet, G.. Microgun-pumped semiconductor laser. – Appl. Phys. Letters, 1993, 62, 796.
18. Herve D., Accomo R., Molva E., Vanzetti L., Paggel J.J., Sorba L., Francioci A.. Microgun-pumped blue lasers. – Appl. Phys. Letters, 1995, 67 (15), 9, 2144-2146.
19. Ivanov S.V. Novel Materials and Designs for Long-Living II-VI Blue-Green Lasers. – Phys. Stat. Sol. 2002, (a) 192(1), 157-165.
20. Bogdankevich O.V., Zverev M.M., Krasilnikov A.I., Pechenov A.N. – Phys. Stat. Sol. 1967, 19, K5
21. Zverev M.M., Sorokin S.V., Sedova I.V., Peregoudov D.V., Ivanov S.V., Kop'ev P.S. ZnSe - based room temperature low-threshold electron – beam pumped semiconductor laser. Physica Status Solidi, 2002, (b), 229(2), 1025.
22. Зверев М.М., Иванов С.В., Перегудов Д.В., Сорокин С.В., Седова И.В., Копьев П.С. – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования 2002, 9, 22.
23. Zverev M.M., Sorokin S.V., Sedova I.V., Peregoudov D.V., Ivanov S.V. and Kop'ev P.S. High-efficiency Electron-Beam Pumped Green Semiconductor Lasers Based on Multiple Quantum Disk Sheets. – Phys. Stat. Sol., 2005, (c) 2(2), 923.
24. Sorokin S.V., Sedova I.V., Toropov A.A., Yablonskii G.P., Lutsenko E.V., Voinilovich A.G., Danilchuk A.V., Dikme Y., Kalisch H., Schineller B., Heuken M. and Ivanov S.V. – High-efficiency integral III-N/II-VI laser converter. – Electron. Lett, 2007, 43 (3), 162.
-