

УДК 621.378.9 : 535.82

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ В АКТИВНЫХ СРЕДАХ НА ПЕРЕХОДАХ АТОМОВ МЕДИ И МАРГАНЦА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СОЗДАНИЮ ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМ С УСИЛЕНИЕМ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. К. Исаков, М. М. Калугин, Е. Н. Парфенова, С. Е. Потапов

Экспериментально исследованы характеристики усиления излучения в лазерных активных средах на переходах с резонансных на метастабильные уровни атомов металлов (медь, марганец) применительно к созданию усилителей яркости изображений.

Определены зависимости коэффициентов усиления от мощности входных сигналов, распределение усиления по поперечному сечению усилителей, отношение сигнал/шум на выходе усилителей как функция расстройки входных сигналов по отношению к моменту создания инверсии. Приведены оценки реально достижимых энергетических характеристик и результаты опробования усилителей в составе проекционных схем.

Проведено сопоставление основных характеристик лазерных проекционных систем с подсветкой объектов суперлюминесценцией активной среды усилителей и с независимой подсветкой излучением вспомогательных лазеров. Показано, что системы с независимой подсветкой имеют более широкие функциональные возможности. Экспериментально получено линейное увеличение изображений микрообъектов на экране $\times 50\,000$ и разрешение ≈ 0.6 мкм.

При кажущейся простоте и очевидности идея усиления яркости изображений за счет стимулированных переходов долго не находила удовлетворительной практической реализации из-за отсутствия подходящих активных сред. Основные требования, которым должны отвечать активные среды для этих целей: соответствие длин волн рабочих переходов методам регистрации и распознавания изображений, большие коэффициенты усиления и высокая оптическая однородность. Последние требования должны выполняться при приемлемых линейных размерах — по возможности небольшой протяженности ($l \leq 10^2$ см) и достаточном поперечном сечении ($d \approx 1 \div 5$ см). При ориентации на визуальные наблюдения добавляется требование достаточно высокой средней мощности излучения в видимой части спектра в течение продолжительных интервалов времени. Кроме того, всегда желательно, чтобы активная среда обладала высоким КПД преобразования энергии накачки в излучение.

В настоящее время этим требованиям, по-видимому, в наибольшей мере отвечают активные среды на самоограниченных переходах атомов металлов. Впервые усиление яркости изображений микрообъектов в парах металлов осуществлено в [1, 2] применительно к созданию проекционного микроскопа с большим ($10^3 - 10^4$) линейным увеличением.¹ При этом освещение поверхности объектов осуществлялось через микрообъектив суперлюминесценцией, возникающей в активной среде при развитии передних фронтов импульсов возбуждения. Часть отраженного потока, несущего изображение, собиралась тем же объективом, направлялась повторно в активную среду, усиливалась по мощности, и, далее, с помощью проекционной системы (линза, зеркало), изображение объектов строилось на экране (рис. 1, а). Такая «самоспряженность» оптической схемы обеспечивает предельную простоту ее реализации, но вместе с тем привносит

¹ Увеличение обычных проекционных микроскопов ограничено величинами неразрушающих потоков излучения на объектах и редко превышает величину $\times 200$ [3].

ряд очевидных ограничений возможностей прибора и исследования усиления в активных средах. При поисках путей преодоления недостатков, присущих выбранной схеме, авторы [2] приходят к необходимости независимого регулирования освещенности объекта и усиления. При этом в качестве одного из вариантов решения задачи в [2] предлагается использовать активные среды с еще более коротким временем существования инверсии, возбуждаемые бегущей волной накачки. Эффективность такого решения представляется дискуссионной.

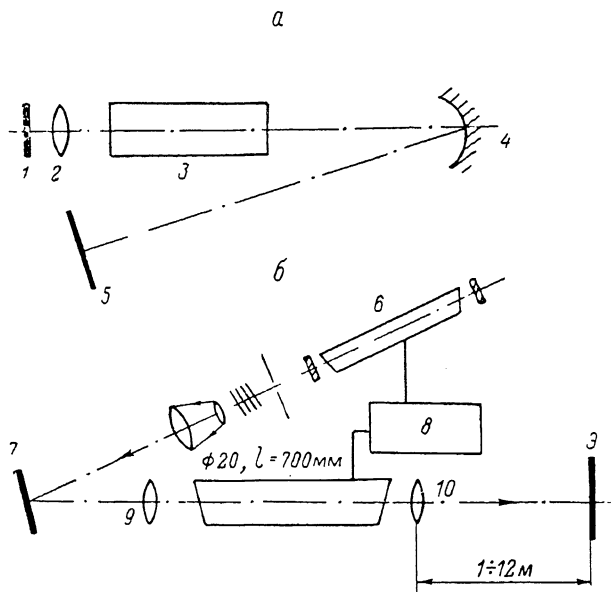


Рис. 1. Схемы проекционных систем с усилением яркости изображений.

a — «самосопряженная» схема, *b* — схема с независимым освещением объекта и усилением яркости изображений. 1 — плоскость предмета (объект); 2 — объектив; 3 — усилитель яркости; 4 — проекционная приставка (зеркало); 5 — экран; 6 — лазер-осветитель; 7 — объект; 8 — блок синхронизации 0—100 нс; 9 — $f=6.2, 8.2, 23.2$ мм или 600, 1200 мм; 10 — $f=30, 60, 120$ мм.

Ниже изложены результаты экспериментальных исследований усиления яркости изображений в активных средах на основе паров меди и марганца, проводившихся по более общей схеме (рис. 1, *b*) с применением для освещения объектов вспомогательных лазеров с рабочими длинами волн 0.5106, 0.5782, 0.534, 1.29 мкм.

При соответствующем выборе параметров пассивных оптических элементов, расстояний между ними и синхронизации действия лазеров-осветителей (ЛО) и усилителей эта схема может быть трансформирована практически в любые частные варианты, свободные от ограничений, присущих «самосопряженным» схемам.

Условия и техника эксперимента

В качестве ЛО объектов на просвет или отражение использовались высокостабильные лазеры на парах меди и марганца с относительно небольшой средней выходной мощностью 1—4 Вт при частотах следования импульсов генерации в диапазоне 4—12 кГц. Расходимость их излучения $\sim(2\div4)\cdot 10^{-3}$ рад при применении плоскопараллельных и $\sim 10^{-4}$ рад — неустойчивых резонаторов.

Освещение объектов осуществлялось либо непосредственно, либо через телескопические расширители пучков, осветительные объективы или через специальные маски. Уровень освещенности и длины волн варьировались с помощью наборов цветных и нейтральных светофильтров и диспергирующих элементов.

В качестве усилителей использовались разрядные трубки диаметром 20 мм, длиной 70 и 40 см. Временное согласование импульсов возбуждения усилителей и ЛО осуществлялось при помощи блоков синхронизации, обеспечивавших плавное регулирование взаимной задержки в диапазоне 0—1000 нс; управле-

ние блоками синхронизации ручное или в режиме автоподстройки по максимуму выходной мощности. В качестве почти идеальных объектов использовались фольги металлов, полированные металлические пластины, металлические и диэлектрические зеркала. Тестовыми объектами являлись дифракционные решетки, блоки микросхем, полупроводниковые микроstructures и некоторые биологические объекты. При работе в режиме лазерного проекционного микроскопа в качестве входных микрообъективов использовались план-объективы с увеличением $\times 8$, $\times 12.5$, $\times 31.75$ с большой числовой апертурой. В режиме лазерного проектора при усилении яркости изображений сравнительно удаленных и крупных предметов использовались телескопические объективы с фокусными расстояниями 60, 90, 120 см.

Проекция изображений после усиления по яркости осуществлялась объективами с фокусными расстояниями 30, 60, 120 мм на экраны, удаленные на расстояние 1—12 м от выходных апертур усилителей. Исследование неоднородностей усиления в активных средах проводилось посредством сканирования активной зоны узким пучком излучения ($d=1.5$ мм) параллельно продольной оси с записью разности интенсивностей на входе и выходе. Пространственное распределение интенсивности излучения на выходе усилителей находилось посредством сканирования ближней зоны приемным устройством, состоящим из фотоэлемента Ф-22, диафрагмы ($d=1.5$ мм) и ослабителей с записью сигналов на самописец. Остальные условия и измерительная техника аналогичны использованным в [4].

Основные характеристики усиления активных сред

На рис. 2 представлены типичные зависимости коэффициентов однопроходного усиления и плотности мощности излучения на выходе усилителей от плотности мощности входных сигналов. Эти зависимости получены при усилении однородных по распределению интенсивности (не несущих изображение) пучков излучения. В силу этого применительно к проекционным системам эти зависимости являются идеализированными. Они могут реализоваться только

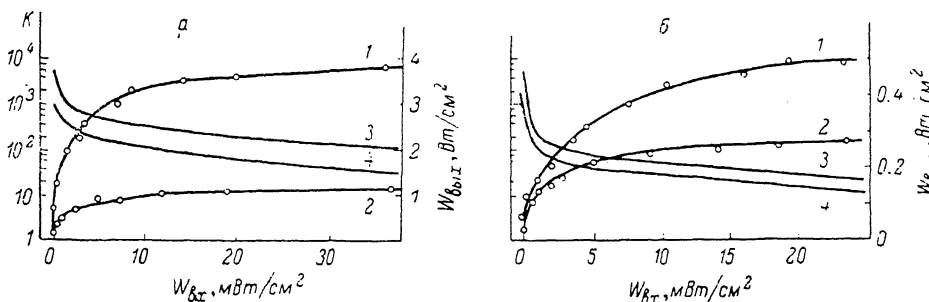


Рис. 2. Зависимости плотности мощности на выходе усилителей яркости и коэффициентов однопроходного усиления от плотности мощности входных сигналов.

а: Cu, $l=700$ мм, $f_{сл}=10$ кГц. 1 — $W_{5106\text{Å}}$, 2 — $W_{5782\text{Å}}$, 3 — $K_{5106\text{Å}}$, 4 — $K_{5782\text{Å}}$; б: Mn, $l=400$ мм, $f_{сл}=4$ кГц. 1 — $W_{\text{вид}}$, 2 — $W_{\text{ИК}}$, 3 — $K_{\text{вид}}$, 4 — $K_{\text{ИК}}$.

в случае использования однородных по пропусканию (отражению) и освещенности объектов. Вместе с тем эти зависимости позволяют оценивать энергетические характеристики при изображении реальных объектов, если известны усредненные значения или топография коэффициента пропускания (отражения) и освещенности. Важнейшие особенности этих зависимостей: большие значения коэффициентов усиления, высокая крутизна характеристики в режиме линейного усиления и сравнительно короткий переход от линейного к насыщенному усилению. Это дает возможность выбирать рабочую точку на характеристике (среднее значение плотности мощности входных сигналов) таким образом, чтобы с одной стороны, обеспечивалось получение достаточно контрастных изображений, а с другой — достигалось возможно более полное использование инверсии. В усилителях с активными средами на парах меди ($\lambda=0.5106$ мкм) переход

от режима линейного к насыщенному усилению происходит при плотностях мощности входных сигналов 2—7 мВт/см², на парах марганца ($\lambda=0.534$ мкм) при 2—5 мВт/см². При плотностях мощности входных сигналов, превосходящих переходные значения, реализуется режим насыщенного усиления. В этом случае средняя мощность излучения на выходе усилителей приближается по порядку величины к мощности свободной генерации, возбуждающейся, если разрядную трубку усилителя заключить в оптимальный по добротности резонатор. Например, при плотности мощности пучка излучения на входе усилителя на парах меди 20—50 мВт/см² плотность мощности на выходе из активной зоны протяженностью 70 см, достигает 3—3.5 Вт/см² при уровне накачки, соответствующем примерно 2.5-кратному превышению порога самовозбуждения сво-

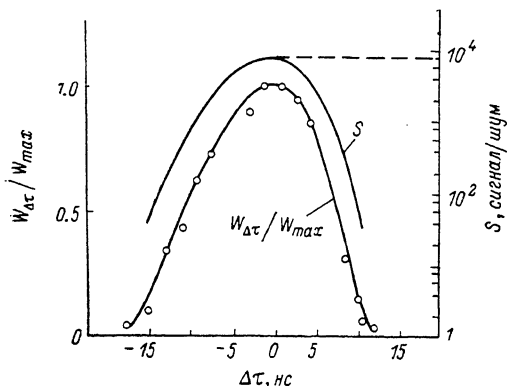


Рис. 3. Зависимости мощности излучения и отношения сигнал/шум на выходе усилителя от временной расстройки входного сигнала по отношению к моменту создания максимальной инверсии в активной среде. Cu $\lambda = 0.5106$ мкм.

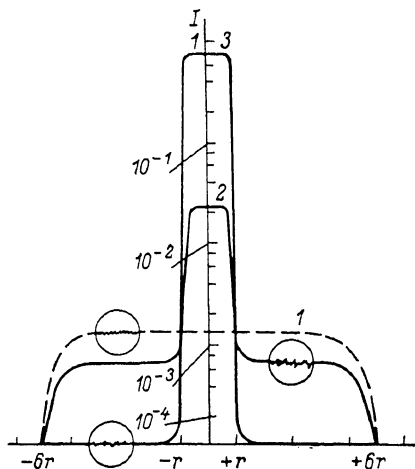


Рис. 4. Типичные картины распределения интенсивности излучения на выходе однопроходного усилителя.

1 — входной сигнал отсутствует, 2 — режим линейного усиления, 3 — при полном насыщении усиления.

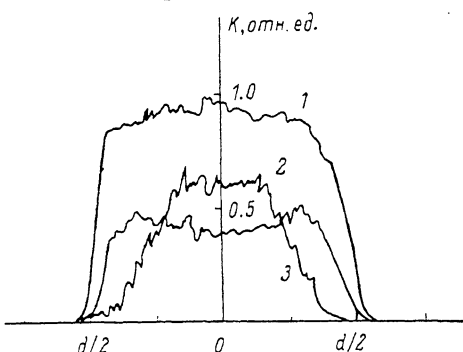
бодной генерации. При этом средняя мощность выходного пучка при полном заполнении входной апертуры 9.5—11.5 Вт. Мощность свободной генерации при тех же условиях 12 Вт. Таким образом, если определять коэффициент использования энергии, запасаемой в активной среде η_0 , как отношение выходной мощности в начале диапазона насыщенного усиления внешних сигналов к мощности в режиме свободной генерации, то его величина может находиться в интервале 0.8—0.95.

Следует подчеркнуть, что приведенные значения усиления и съемов мощности реализуются при оптимальных значениях температуры стенок разрядных трубок и давления буферных газов (описание соответствующих зависимостей имеется в [4]), а указанные значения коэффициентов использования энергии, запасаемой в активной среде, достижимы только при оптимальной синхронизации действия и согласовании длительностей импульсов излучения задающих лазеров и усилителей. В противных случаях происходит резкое снижение усиления и уменьшение контраста изображений. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости мощности излучения и отношения сигнал/шум на выходе усилителя на переходах атомов меди от временной расстройки входного сигнала по отношению к моменту создания максимальной инверсии в активной среде. Запаздывание отвечает отрицательному, а опережение — положительному направлению оси абсцисс. Видно, что расстройка в интервале 7—10 нс приводит к снижению мощности на выходе примерно на 50% и уменьшению контраста более чем в 10 раз. Последнее происходит из-за уменьшения интенсивности пучка, несущего изображение, и увеличения фона суперлюминесценции на выходе усилителей. При спектрально-однокомпонентных сигналах на входе усилителей спектральный состав фона суперлюминесценции на выходе изме-

няется в зависимости от знака расстройки. Например, при $\lambda=0.5106$ мкм в случае опережения в фоне преобладают компоненты с $\lambda=0.5106$ мкм, а в случае запаздывания возрастает относительный вклад компоненты с $\lambda=0.5782$ мкм. Эти изменения спектрального состава фона можно использовать в качестве одного из критериев автоподстройки. Аналогичные особенности усиления присущи и активным средам на переходах атомов марганца с тем отличием, что диапазон рассогласований на длине волны 0.534 мкм и в ИК области спектра в 2—2.5 раза шире, чем показано на рис. 3. Отметим, что эти зависимости являются определяющими в выборе структуры схем управления и работоспособности систем усиления яркости изображений удаленных и подвижных объектов.

При усилении изображений слабоосвещенных объектов важными параметрами, определяющими качество изображений, являются отношение мощности сигналов, несущих изображение, к шуму суперлюминесценции на выходе усилителей и неоднородности усиления.

Пространственное распределение и уровень шума зависят от ряда факторов и главным образом от плотности мощности входных сигналов, заполнения апертуры усилителей, рассогласования во



времени действия элементов системы и особенностей геометрии усилителей. На рис. 4 приведены репродуцированные записи распределения интенсивности излучения на выходе усилителей на

Рис. 5. Относительные изменения насыщенного коэффициента усиления по поперечному сечению активной зоны усилителя при различных значениях температуры стенок разрядной трубки усилителя. Cu, $\lambda = 0.5106$ мкм.

1 — $T = T_{opt}$, 2 — $T < T_{opt}$, 3 — $T > T_{opt}$.

переходах атомов меди, полученные с помощью сканирующего приемника. Видно, что при отсутствии входных сигналов на выходе усилителей имеется более или менее равномерный фон суперлюминесценции. По мере увеличения плотности мощности входных сигналов уровень фона уменьшается к концу диапазона линейного усиления примерно на порядок. При этом отношение сигнал/шум оказывается в интервале 10^3 — 10^4 . При насыщении усиления и полном заполнении входной апертуры распределение приближается к виду, характерному для свободной генерации. Если входные сигналы спектрально-однокомпонентны и усиливаются только на одном переходе, то в фоне преобладают компоненты, соответствующие неиспользуемому переходу.

Приведенные распределения получены при полном заполнении апертуры усилителей примерно однородным пучком. В реальных ситуациях при неполном заполнении и неоднородных пучках уровень фона суперлюминесценции естественно выше, чем при насыщении усиления по всему поперечному сечению. Кроме того, уровень фона, как уже отмечалось, возрастает при рассинхронизации системы. Однако при наличии запаса мощности освещенность объекта, уровень накачки активной среды и синхронизацию можно выбирать так, что фон не будет препятствовать выявлению деталей изображений. Интересно отметить, что в фоне суперлюминесценции, распространяющейся от усилителя в направлении объектов, при некоторых условиях могут возникать их негативные изображения [5]. Это связано с тем, что пространственное распределение инверсии искажается при усилении входных сигналов так, что становится обратным по отношению к плотности их мощности. Соответственно этому поток суперлюминесценции на выходе усилителей тоже можно считать несет изображения объектов с распределением интенсивности, обратным по отношению к входным сигналам. Пространственное наложение этих изображений снижает контраст.

На рис. 5 приведены осциллограммы, иллюстрирующие наиболее типичные распределения усиления по диаметру разрядных трубок. В них можно выделить два вида неоднородностей: крупномасштабные, определяющие общий вид распределений и мелкомасштабные. Крупномасштабные неоднородности зависят от

контролируемых условий эксперимента и воспроизводимы. Мелкомасштабные неоднородности связаны с флуктуациями разряда, не поддающимися непосредственному контролю. Вид распределений в целом зависит одновременно от многих условий. Например, двугорбые распределения с максимумами в пристеночных областях возникают, когда температура стенок разрядных трубок ниже оптимальной. Такие распределения в большей мере характерны для разрядных трубок больших диаметров при низких давлениях буферных газов. Наиболее равномерные распределения достигаются при выборе параметров возбуждения усилителей вблизи оптимальных значений [4]. При этом мелкомасштабные неоднородности тоже оказываются минимальными. Распределение с максимумом в центре возникает при перегреве разрядных трубок, завышенных давлениях буферных газов и загрязнениях активных сред.

Оценки возможностей и результаты экспериментальных исследований усиления яркости изображений

1. Достижимые мощности пучков, несущих изображение, размеры и освещенность экранов, а также возможное линейное увеличение лазерных проекционных систем с усилением яркости изображений оценим в предположении использования однокаскадных усилителей. Создание многокаскадных усилителей возможно, но, по-видимому, нецелесообразно из-за возрастания технических трудностей поддержания оптимальных режимов их действия.

Поскольку изображения объектов несут расходящиеся пучки, рабочие объемы активной зоны усилителей с цилиндрической геометрией используются лишь частично. Согласно графическим построениям, коэффициент их использования κ_1 может принимать значения 0.5—0.7. С учетом этого и приведенных выше значений κ_0 коэффициент съема мощности при насыщенном усилении яркости изображений по отношению к режиму свободной генерации может находиться в интервале $\kappa = \kappa_0 \kappa_1 = 0.4 \div 0.66$. Примем для дальнейших оценок $\kappa = 0.5$. Типичные современные значения средней суммарной мощности свободной генерации лазеров с продольным разрядом на парах меди находятся в интервале 10—30 Вт, на парах марганца 5—10 Вт. В соответствии с этим достижимые значения средней суммарной мощности пучков, несущих изображение, на выходе усилителей яркости на переходах атомов меди могут оцениваться в интервале значений до 15 Вт, а на переходах атомов марганца до 5 Вт.

Для оценок возможных размеров экранов зададимся освещенностью в диапазоне 0.1—0.3 Вт/м². Отметим, что эти значения не являются стандартными или нормативными и принимаются здесь условно для приблизительных оценок. С учетом этого площадь экранов проекционных лазерных систем можно оценить в пределах до нескольких десятков квадратных метров. Это существенно превосходит обычно встречающиеся технические потребности. При этом линейное увеличение изображений, исходя из энергетических возможностей усилителей, в принципе может доходить по порядку величины до нескольких сотен тысяч. Реальные же значения линейных увеличений, очевидно, будут ограничиваться

Объектив	Фокусное расстояние, мм	Числовая апертура, A	Поле зрения, мм		Разрешение системы, мкм
			при независимом освещении	при освещении суперлюминесценцией	
× 8	23.3	0.17	1.0	0.63	2.23
× 12.5	8.2	0.37	0.52	0.31	1.43
× 31.75	6.2	0.65	0.34	0.19	0.563
0-2	600		19	13	40

² При проведении экспериментов такие уровни освещенности находились как наиболее благоприятные для визуального анализа изображений на длине волны 0.5106 мкм на экране размером 1×1 м. При этом изображения имели все особенности, присущие лазерному освещению: зернистость структуры, монохроматичный фон и т. д. Нижнее значение освещенности отвечает условиям наблюдения в частично затемненном помещении, оно несколько превосходит нормативную освещенность экранов кинотеатров.

характеристиками объективов и особенностями зрительного восприятия изображений в лазерном свете.

В настоящей работе экспериментально достигнуто линейное увеличение $\times 50\,000$. При этом в качестве демонстрационного объекта использовалась дифракционная решетка 600 штр/мм. Фотография изображения приведена на рис. 7, а. Полученное увеличение, очевидно, не является предельным. В данном случае оно ограничивалось микроскопической вибрацией элементов, смазывающей изображение на экране, и габаритами установки.

2. Размеры поля зрения при независимом освещении объектов излучением ЛО, очевидно, определяются угловой апертурой разрядных трубок усилителей и параметрами используемых пассивных оптических элементов. При освещении объектов суперлюминесценцией активной среды усилителей (метод пригоден для усиления яркости изображений близко расположенных объектов) эффективное поле зрения оказывается в 1.5—2 раза меньше, чем при независимом

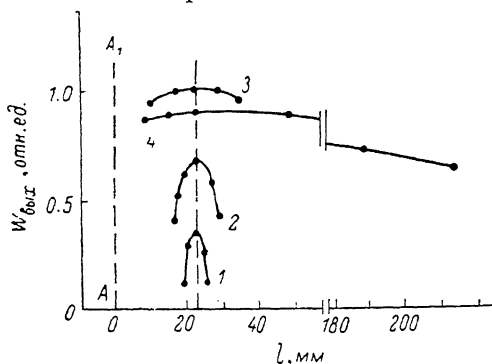


Рис. 6. Зависимость мощности пучка, несущего изображение тестового объекта (дифракционная решетка 200 штр/мм), от его смещения относительно фокальной плоскости микрообъектива.

1 — глубина резкости в «самосопреженной» схеме, 2 — при освещении объекта излучением ЛО через рассеиватель, 3 — при освещении объекта пучком с расходимостью $2 \cdot 10^{-3}$ рад, 4 — то же при освещении пучком с расходимостью $\sim 10^{-4}$ рад (линейное увеличение везде одинаковое). AA₁ — плоскость входной апертуры микрообъектива. Cu, $\lambda = 0.5106$ мкм.

освещении. Это связано с резким уменьшением освещенности от центра поля к периферии при фокусировке суперлюминесценции на поверхности объекта.

Измеренные экспериментально размеры полей зрения проекционной системы с разрядной трубкой $d=20$, $l=700$ мм с использованием планарных микрообъективов и репродукционного объектива 0-2 приведены в таблице.

3. Экспериментально показано, что практически реализующаяся глубина резкости существенно зависит от расходимости излучения, которым освещается объект. При проведении экспериментов в качестве тестового объекта использовалась дифракционная решетка 200 штр/мм, фокусное расстояние входного объектива 23.2 мм. Сравнивались четыре варианта освещения объекта: 1) люминесценцией активной среды усилителя, сфокусированной входным объективом («самосопреженная» схема; рис. 1, а); 2) излучением лазера-осветителя через рассеиватель; 3) непосредственно пучком излучения лазера-осветителя с расходимостью $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ рад; 4) излучением лазера-осветителя с расходимостью $\sim 10^{-4}$ рад.

Результаты сравнительных испытаний представлены на диаграмме (рис. 6), иллюстрирующей изменения мощности на выходе усилителя в зависимости от расстояния между плоскостью входной апертуры микрообъектива и объектом. Здесь за относительную единицу принята мощность, полученная при положении объекта в фокальной плоскости и освещении его излучением с расходимостью $\sim 10^{-4}$ рад, с плотностью мощности, отвечающей началу диапазона насыщенного усиления. Индексация кривых отвечает способам освещения объектов. Длина проекций отрезков кривых на оси абсцисс соответствует практически реализующейся глубине резкости. Видно, что при освещении объектов суперлюминесценцией и рассеянным излучением глубина резкости мала и требуется довольно точная фиксация объекта в фокальной плоскости объектива. При освещении излучением с малой угловой расходимостью практически реализующаяся глубина резкости возрастает до десятков сантиметров.

4. Разрешающая способность усилителей мощности пучков, несущих изображение, очевидно, определяется числом Френеля для конкретных апертурных размеров и оптическими неоднородностями активной среды. Согласно ряду косвенных экспериментальных данных, относительное изменение показателя пре-

ломления при типичных условиях возбуждения активных сред с парами металлов продольным разрядом не превышает 10^{-5} — 10^{-6} . В соответствии с этим можно предполагать, что в рассматриваемом случае неоднородности показателя преломления в активных средах не должны являться фактором, ограничивающим разрешающую способность системы. С целью проверки этого предположения проводились сопоставления реального разрешения макета проекционного микроскопа с усилителем яркости на парах меди и теоретического разрешения применяемых объективов. В качестве пробного объекта использовалась дифракционная решетка 600 штр/мм. Из фотографии (рис. 7, а) видно, что штрихи решетки с периодом 1.67 мкм отчетливо различимы. Предельное теоретическое разрешение использовавшегося при этом микрообъекта составляет примерно 0.84 мкм. Сопоставление этих значений отчасти подтверждает сделанное предположение, хотя ясно, что для полного его обоснования необходимы детальные исследования возмущений показателя преломления и рассеяния в активных средах. Последнее может играть заметную роль в активных средах на основе галлоидных соединений металлов, использование которых в усилителях яркости представляется привлекательным с нескольких точек зрения. Отметим, что аналогичный экспериментальный результат в части оценок разрешения ранее был получен в [2], где считается, что разрешение на линейном размере поля зрения не зависит от фокусного расстояния объектива и примерно равно числу Френеля для размеров разрядной трубки. Очевидно, это справедливо как оценка верхнего предела по геометрическим критериям.

5. Контраст усиленных изображений одного и того же объекта зависит от его освещенности и уровня накачки усилителя. Это обусловлено резким переходом от линейного к насыщенному усилению (рис. 2), что позволяет в каждом конкретном случае выбирать положение рабочей точки так, чтобы обеспечивались наиболее благоприятные условия наблюдения. Анализ измерений показывает, что оптимальное положение рабочих точек при усилении изображений различных реальных объектов группируется в основном вблизи области перехода от линейного к насыщенному усилению. Для контрастных объектов в большинстве случаев оптимальными оказываются рабочие точки в начале диапазона насыщенного усиления. При этом повышение освещенности объекта приводит к незначительному приращению яркости, а контраст изображений снижается. Последнее происходит из-за более полного насыщения усиления во всем объеме активной зоны. В пределе это ведет к выравниванию освещенности в различных частях изображений. Для слабоконтрастных объектов оптимальные рабочие точки группируются в диапазоне перехода от линейного к насыщенному усилению. При этом усиление яркости изображений может происходить с увеличением контраста. При уменьшении освещенности объекта по мере перехода все больших объемов активной среды в режим линейного усиления яркость изображений уменьшается, а контраст сначала возрастает. Затем эффективный контраст ухудшается из-за увеличения фона суперлюминесценции и уменьшения яркости изображения, и оно «тонет» в фоне. То же самое происходит при повышении накачки усилителя к уровню, предшествующему возбуждению генерации на паразитных отражениях. Кроме этого, эффективный контраст изображений зависит, как уже отмечалось, от качества синхронизации действия лазеров-осветителей и усилителей (рис. 3).

6. Плотности мощности в поле зрения оценим для случая использования усилителей яркости в составе лазерного проекционного микроскопа. Примем в качестве типичных следующие значения параметров: поперечный размер поля зрения 2 мм, апертура усилителя 2 см, коэффициент отражения объектов (с учетом рассеяния) 0.2, коэффициент потери мощности на пассивных элементах в интервале от объекта до активной зоны 0.5. Среднее значение плотности мощности на входе усилителя пусть соответствует переходному режиму усиления $5 \cdot 10^{-3}$ Вт/см². Возможные отклонения от этого значения в сторону линейного и насыщенного усиления до 10^{-3} и 10^{-2} Вт/см² соответственно. С учетом этих значений требующаяся плотность мощности оказывается в диапазоне 1—10 Вт/см². Это вполне достижимо с применением маломощных лазеров для неразрушающего освещения большинства объектов при том, что для оценок приняты неблагоприятно жесткие значения некоторых параметров. Кроме того,

здесь предполагалось освещение объекта на отражение без фокусировки излучения. При фокусировке излучения запасы мощности для освещения объектов

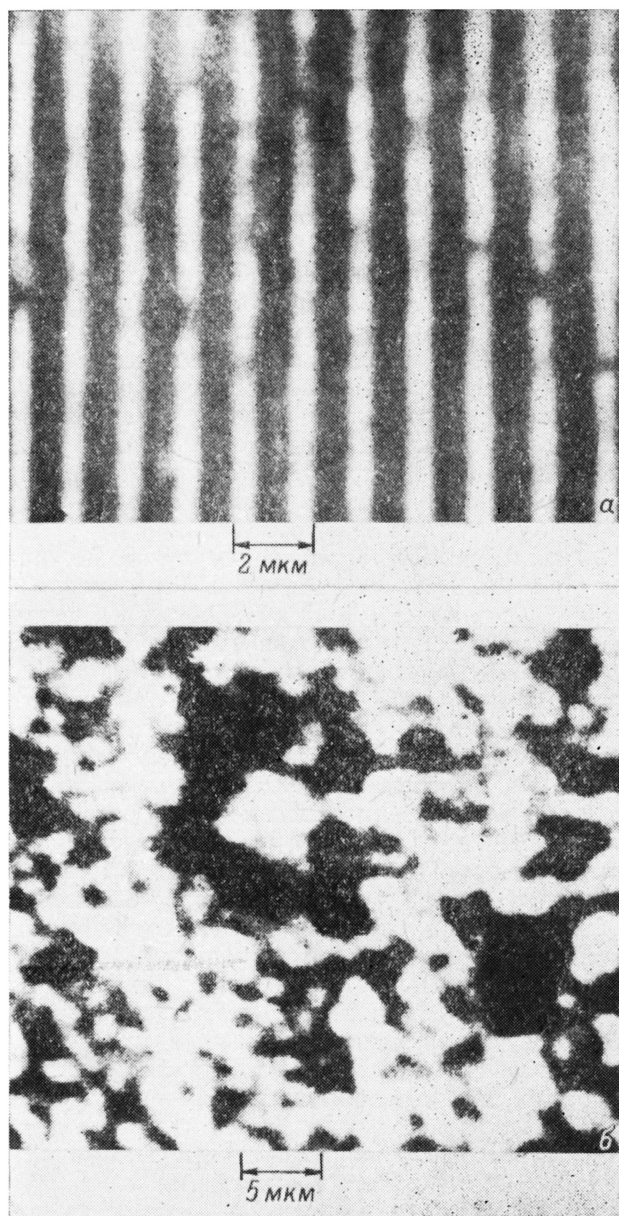


Рис. 7. Изображение поверхностей объектов.

a — участок поверхности дифракционной решетки 600 штр/мм, $\times 50\,000$; *b* — участок поверхности полированного молибдена, $\lambda=0.5341$ мкм, $\sim \times 10\,000$; *в* — поверхность диэлектрического зеркала, $\lambda=0.5341$ мкм, $\times 10\,000$; *г* — участок поверхности блока микросхемы, $\lambda=0.5106$ мкм.

могут составлять несколько порядков. Это позволяет варьировать освещенность в широких пределах (вплоть до локальных лучевых разрушений) с помощью ступенчатых и плавных ослаблений.

Заключение

В качестве иллюстрации возможностей использования усилителей яркости изображений приводим фотографии изображений различных объектов с экранов макетов проекционных систем (рис. 7). Из них фотографии *a—в* получены

при использовании усилителей с активными средами на парах меди и марганца в составе лазерного проекционного микроскопа. При этом задачей ставилось усиление яркости для крупномасштабных проекций изображений с большим линейным увеличением. Фотография (рис. 7, з) получена при использовании

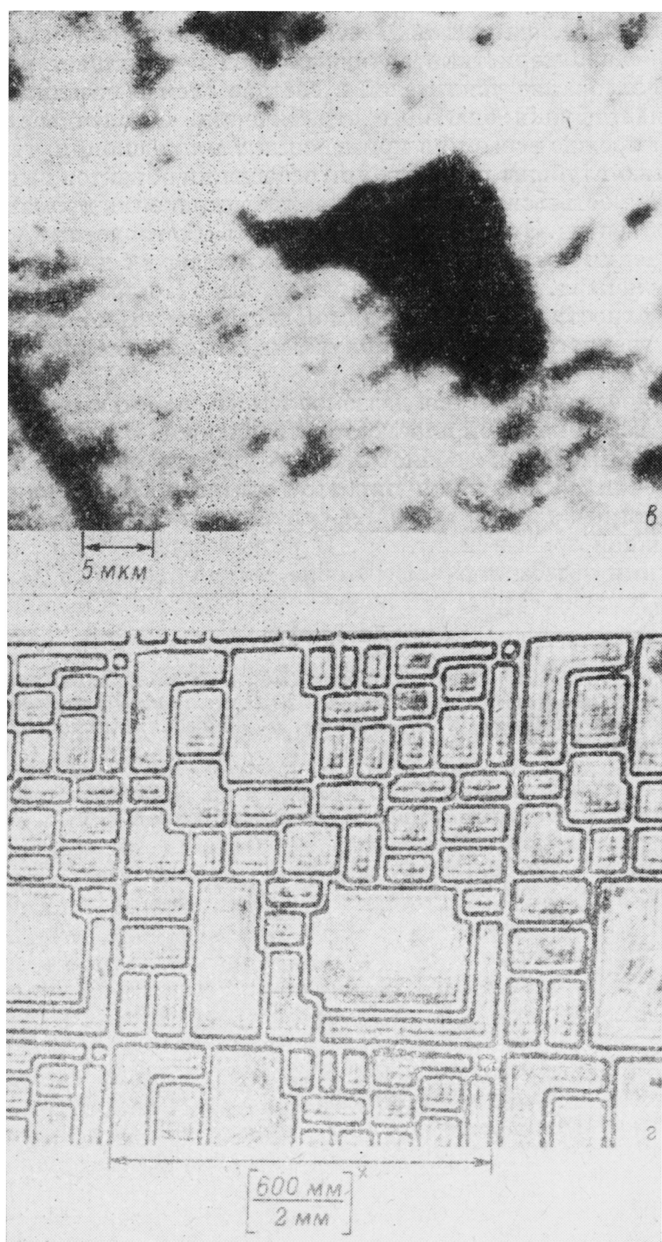


Рис. 7 (продолжение).

усилителя яркости на парах меди в составе телескопической системы. В этом случае предполагалось получить изображение сравнительно удаленных слабо освещенных объектов или их частей с относительно небольшими линейными увеличениями. В обоих случаях при надлежащем согласовании действия усилителей и лазерно-осветителей удастся получать изображения с возможностью варьирования в широких пределах яркости, контраста и уровня фона. Естественными недостатками этих изображений являются зернистость, присущая лазерному излучению, и монохроматичность. Последнее, впрочем, по-видимому, не

является фактором, ограничивающим технические применения. Этот недостаток может быть частично исключен при применении в лазерах и усилителях комбинированных активных сред типа $\text{Cu} : \text{Au} : \text{Ne}$, исследованных в [6].

Самосопряженное использование активных сред для освещения объектов и усиления яркости изображений, очевидно, является уникальным и в силу этого ограничено кругом задач микроскопии близко расположенных объектов. При этом, как видно из [2], не представляется возможным в полной мере использовать энергетические характеристики активных сред и возникает ряд других ограничений. Использование усилителей в составе схем с независимой подсветкой объектов снимает функциональные ограничения, обеспечивает большую гибкость систем и прежде всего при применении в микроскопии. Например, благодаря увеличению глубины резкости при освещении объектов излучением с малой угловой расходимостью снимается требование устранения хроматических аберраций входных объектов. Это позволяет применять многоцветные лазеры и усилители для получения цветных изображений или лазеры с длинами волн в различных областях спектра, такие как, например, $\text{Mn} : \text{He}$ лазеры. При этом на изображения поверхности объектов в видимой части спектра можно налагать изображения их внутреннего строения, получаемые одновременно на просвет в ИК части спектра.

Другое важное преимущество, даваемое тем же свойством, — возможность размещать объекты за фокальной плоскостью объективов. Это повышает порог самовозбуждения усилителей, позволяет поднять уровень накачки и сьем мощности в выходные пучки. Кроме того, при этом намного снижается воздействие на объекты сфокусированного излучения суперлюминесценции и теплового излучения из активной зоны усилителей. В ряде случаев, в частности при работе с биологическими объектами, это условие может оказаться доминирующим.

Литература

- [1] К. И. Земсков, А. А. Исаев, М. А. Казарян, Г. Г. Петраш. Квант. электр., 1, 14 (1974).
- [2] К. И. Земсков, А. А. Исаев, М. А. Казарян, Г. Г. Петраш. Квант. электр., 3, 35 (1976).
- [3] Г. Е. Скворцов, В. А. Панов, Н. И. Поляков, Л. А. Федин. Микроскопы. «Машиностроение», Л. (1969).
- [4] М. М. Калугин, Е. И. Кузьмина, С. Е. Потапов. Квант. электр., 8, 1085 (1981).
- [5] Ф. В. Бункин, К. И. Земсков, М. А. Казарян и др. Квант. электр., 8, 1372 (1981).
- [6] М. М. Калугин, С. Е. Потапов, М. В. Тютчев. Письма ЖТФ, 6, 280 (1980).

Поступило в Редакцию
27 апреля 1982 г.