

УДК 539.293;621.382

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

В.В. Парашчук, А.К. Беляева, В.В. Баранов*, Е.В. Телеш*, Vu Doan Mien**, Vu Van Luc**, Pham Van Truong**

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск,

**Institute of Materials Science, Vietnamese Academy of Science and Technology, Hanoi

E-mail: v.parashchuk@ifanbel.bas-net.by

Разработаны химический и вакуумные методы формирования металлических покрытий с высокой адгезией к различным поверхностям на базе многофункциональных ионно-лучевых и магнетронных распылительных систем, в том числе применительно к медным и алмазным теплоотводящим основаниям для диодных лазеров. Определены оптимальные условия сборки диодных лазеров и линеек на основе разработанных способов металлизации и достигнуто существенное улучшение выходных характеристик приборов.

Ключевые слова:

Мощные диодные лазеры, тепловые процессы, алмазные теплоотводящие подложки, высокоадгезионная металлизация, технология сборки лазера, выходные характеристики.

Key words:

High power diode lasers, thermal processes, diamond heat sink substrates, high adhesion metallization, technology of laser assembly, output characteristics.

Введение

Мощные лазерные диоды и лазерные диодные решетки (линейки), излучающие световую мощность от единиц до десятков и сотен ватт в непрерывном режиме, требуют интенсивного отведения тепла от активной области полупроводниковой гетероструктуры. Как показано в настоящей работе, в качестве эффективных теплоотводящих оснований для лазерных диодов могут быть использованы кристаллы алмаза – как природного, так и синтетического. Теплопроводность алмаза принадлежит к его наиболее выдающимся свойствам и в несколько раз превышает теплопроводность всех других твердых материалов – металлов, полупроводников и диэлектриков [1, 2], в том числе меди, которая наиболее часто используется для монтажа лазерных диодов. При этом использование синтетических монокристаллов алмаза предпочтительнее природных ввиду их меньшей стоимости при тех же процессах обработки. Ранее сообщалось о перспективности алмазных технологий для других полупроводниковых приборов [3, 4].

Вместе с тем сверхтвердые материалы, к которым относится алмаз, представляют собой вещества с устойчивыми электронными конфигурациями атомов, химически инертные по отношению к большинству металлов и припоев. В качестве компонентов, обладающих адгезионной активностью к алмазу должны использоваться металлы с высоким химическим сродством к углероду, причем предпочтительнее такие, которые образуют с этим элементом соединения, обладающие «металлическостью» межатомных связей и металлическими свойствами (хром, титан, ниобий, цирконий, тантал, молибден, вольфрам). Разработка технологии создания высокоадгезионных металлических покрытий алмаза представляет собой важную проблему, во многом еще не решенную.

Согласно данным наших предварительным исследований, эффективность алмазных теплоотводящих оснований (АТО) определяется не только высокой степенью адгезии металлического покрытия АТО, но и достаточной величиной его электрической проводимости, не вызывающей существенного джоулевого нагрева основания. Однако как оказалось, одновременное удовлетворение этих условий противоречиво, так как требуемая степень адгезии покрытия достигается при толщинах $d \leq 0,1$ мкм, а хорошая проводимость – при $d > 0,1$ мкм и требуется поиск компромиссных решений. Кроме того, необходима однородность адгезии по отношению ко всем основным поверхностям основания – монтажной, посадочной (противоположной монтажной) и боковым, которые обеспечивают электрическую связь первых двух поверхностей при минимальном удельном сопротивлении металлического покрытия. Так, в наших первоначальных опытах было установлено, что химический метод осаждения никеля обеспечивает наивысшую степень адгезии покрытия АТО по сравнению с другими методами, однако при этом требуемая степень однородности не достигалась. Данное явление объяснялось различием физических свойств указанных поверхностей и ростовыми особенностями используемых кристаллов. В дальнейшем этот метод был усовершенствован с применением дополнительной обработки (очистки и активации) поверхностей и успешно апробирован на примере кубического нитрида бора (сNB) – перспективного, как оказалось, аналога алмаза применительно к нашим целям. Вопросы применения сNB в сравнении с АТО, их преимущества и недостатки предполагается рассмотреть отдельно.

Настоящая работа посвящена оптимизации процесса металлизации АТО на основе природных и искусственных алмазов (моно- и поликристал-

лов) путем испытания и сравнения различных методов и условий нанесения титан-никелевых (Ti-Ni) покрытий. При этом достигнуто однородное высокоадгезионное металлическое покрытие алмазных оснований с требуемым низким удельным сопротивлением по отношению ко всем экспонируемым поверхностям. Похожие результаты получены также для систем Ti-Al-Ni и Cr-Ni-Ni.

Формирования металлических покрытий алмазных теплоотводящих оснований и процесс сборки лазера

Разработанные нами вакуумные методы формирования металлических покрытий с высокой адгезией к различным поверхностям основаны на применении многофункциональных ионно-лучевых и магнетронных распылительных систем, а также сплавов внедрения с высоким сродством к углероду в качестве адгезионных слоёв [5]. В частности напыление Ti/Ni пленок ионно-лучевым распылением производилось на установке Z-400 «Leybold-Heгаeus» с безмасляной откачкой при рабочем давлении $7,8 \cdot 10^{-2}$ Па после нагрева алмазного основания до температуры 200...350 °С. Металлизация производилась с помощью специальной распылительной системы, позволяющей перед нанесением пленок производить обработку поверхности пучком ионов аргона с энергией ~1 кэВ. Это позволяло удалять с поверхности алмаза загрязнения и нарушенные приповерхностные слои с низким сцеплением и обеспечивало величину адгезии наносимой металлической пленки на уровне энергии межатомных связей. Толщина пленок титана составляла ≈ 20 нм при скорости напыления 0,2...0,25 нм/с, никеля – ≈ 300 нм при скорости напыления 0,35 нм/с.

Согласно разработанной методике сборки процессы металлизации алмазного теплоотводящего основания и предварительной очистки его поверхностей выполняются в едином (непрерывном) цикле. В дальнейшем осуществляются наращивание слоя никеля до толщины 0,2...0,3 мкм (контактный слой) и термический отжиг в вакууме, либо без него, при $T=400...450$ °С в течение 30...40 мин. Затем присоединяют АТО к массивному (металлическому) теплоотводу путем напайки высокотемпературным композиционным припоем типа ПОС-61 в восстановительной среде (сухой очищенный водород, H₂). Композиционный припой наносят на посадочную поверхность алмазного теплоотвода методом вакуумного терморезистивного напыления или иным способом (толщина слоя 4...6 мкм). После этого на монтажную поверхность теплоотвода наносят тем же способом слой индия толщиной 3...5 мкм, с использованием микроскопа выполняют позиционирование активного элемента – единичного лазерного диода или линейки в виде полоски длиной L с заданной точностью в рабочей области монтажной поверхности.

Полученную структуру помещают в специальную кассету и загружают в кварцевую камеру (реак-

тор) печи и осуществляют припайвание в восстановительной среде в динамическом режиме с временем нагрева/охлаждения 3...5 мин при температуре $T_{\text{наг}} \geq T_{\text{ликв}} + (50...70)$ °С, где $T_{\text{ликв}}$ – температура ликвидуса материала ($T_{\text{ликв}} \approx 190$ °С для ПОС-61, 156,8 °С для In). Конструкция кассеты позволяет осуществлять процесс сплавления как в условиях заданной механической нагрузки, так и без нее. При этом соблюдают минимальный технологический перерыв между основными операциями сборки лазера – не более 1 ч, а также необходимые микроклиматические условия. Процесс сборки завершается присоединением к гетероструктуре путем ультразвуковой сварки контактных проводов, размещением системы при необходимости в стандартном корпусе, закрепляемом в радиаторе.

После металлизации АТО контролировались качество его покрытия (степень адгезии, однородность), электропроводность и тепловые характеристики – тепловое сопротивление и теплопроводность – как визуально, так и с использованием микроскопа путем демонтажа соединяемых элементов и испытанием адгезии по усилию отрыва (метод «нормального отрыва», стендовый динамометр) или способом «царапания» (микроскопы МИМ-7, МИИ-4).

Влияние технологических условий сборки лазерных диодных структур на их основные характеристики

С целью изготовления АТО для диодных лазеров (ЛД) использовались монокристаллы синтетического алмаза типа МСТМ «Алмазот», выращенные методом температурного градиента из раствора углерода в расплаве металла при высоких давлениях и температуре. Кристаллы вырезались по плоской сетке куба усеченного октаэдра и имели размеры $\sim 1,5 \times 1,5 \times 0,3$ мм. Полировка АТО осуществлялась с доведением шероховатости поверхности до значений 2,8...12,8 нм. В отдельных случаях использовали природные алмазные образцы, а также поликристаллические синтетические алмазные основания, выращенные модифицированным CVD методом, с размерами $\sim 12 \times 2,5 \times 0,3$ мм, а также меньших размеров, – впрессованные в медные теплоотводы и допускающие обработку всего одной или двух поверхностей.

Для возбуждения диодных лазеров в непрерывном режиме использовался источник типа LDC-8-01 с точностью установки амплитуды тока ~ 1 мА. В качестве источника импульсов тока для мощных лазерных диодных линеек (ЛДЛ) служил генератор, вырабатывающий сигнал амплитудой до 200 ± 2 А, длительностью до ~ 10 мс и частотой следования до ~ 100 Гц. Мощность (энергия) излучения фиксировалась измерителем класса Coherent FM со сменными головками. При необходимости осуществлялась регистрация спектров излучения при помощи установки на базе монохроматора типа МДР-23 и ССD-камеры типа Sony ILX512, сопряженной с компьютером и спектральным разре-

шением $\sim 0,3 \text{ \AA}$. Теплопроводность алмазных оснований оценивалась путем исследования теплопереноса через образец на установке типа УКТ-3 или методом релаксации тепловых решеток на лазерном терморелаксометре ЛТР 266-01 до и после процесса металлизации с точностью $\sim 20 \%$.

а) Теплоотводящие основания из природного алмаза. В процессе сборки на начальном этапе использовались теплоотводы из природного алмаза и лазерные диоды на основе InGaAs/AlGaAs гетероструктур с квантовой ямой и шириной полоскового контакта $\sim 100 \text{ мкм}$. АТО имели коэффициент теплопроводности $\sim 1400 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, их размеры соответствовали оптимальным с точки зрения результатов моделирования в них тепловых процессов [6].

Исследовалась зависимость мощности излучения, генерируемого лазерным диодом в непрерывном режиме, от тока накачки I в широком диапазоне – вплоть до полной деградации (рис. 1). Характеристики инжекционных лазеров, собранных с применением алмазных оснований, сравнивались с параметрами приборов, собранных при тех же условиях непосредственно на медном хладопроводе. При этом зеркала резонатора формировались путем естественного скола граней кристалла (без напыления диэлектрических зеркал).

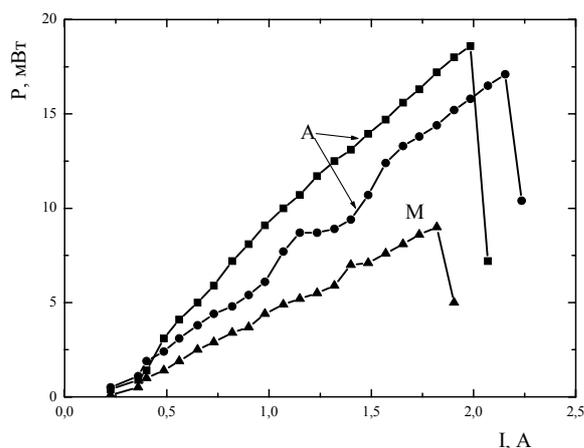


Рис. 1. Ваттамперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных основаниях (А) и на медных хладопроводах (М)

Как видно из данных измерений, в целом лазерные диоды с АТО деградируют при более высоких уровнях накачки. Наблюдаемый определенный разброс данных, по-видимому, связан с разбросом адгезионных свойств пленочных покрытий АТО, зависящих от используемого процесса металлизации и влияющих на тепловое сопротивление прибора R_t . При этом имеет место снижение величины R_t в среднем не менее чем на $\sim 30 \%$ (до $\sim 3 \text{ К/Вт}$) в случае алмазной подложки при оптимизированной технологии сборки. Этот факт объясняется более высокой эффективностью алмазных теплоотводов по сравнению с медными вследствие значительно большей интенсивности процессов теплообмена, осуществляемых в первом случае [6]. Согласно

данным [3, 4] в этих условиях максимальное снижение теплового сопротивления для мощных транзисторов может достигать 2,5 раз.

Последовательное применение технологических операций, оптимизирующих в целом процесс сборки лазерных диодов на АТО (использование высокотемпературного твердого припоя типа ПОС-61 вместо индиевого, отжиг АТО после металлизации, напаивание лазерного диода на АТО при механической нагрузке), позволило увеличить выходную мощность ЛД не менее чем в 2 раза (рис. 2), что согласуется с данными для других полупроводниковых приборов [3, 4]. Из рис. 2 следует, что ваттамперная характеристика образцов на алмажном теплоотводе сохраняет линейность во всем диапазоне токов накачки. Насыщение ваттамперной характеристики одного из лучших ЛД на медном хладопроводе наступает уже при $I \sim 1,8 \text{ А}$. Такой характер зависимости $P(I)$ может быть следствием меньшей теплопроводности меди по сравнению с АТО и изменения R_t прибора в сторону увеличения при больших токах возбуждения.

Рис. 2. Ваттамперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных (А) и медных (М) основаниях с использованием термообработки (по оптимизированной технологии)

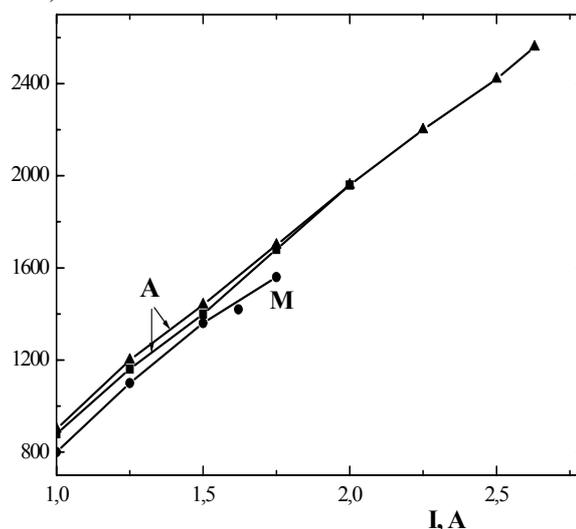


Рис. 2. Ваттамперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных (А) и медных (М) основаниях с использованием термообработки (по оптимизированной технологии)

Следует отметить, что припой типа ПОС-61 характеризуется большим коэффициентом теплопроводности, более высокой температурой плавления и прочностью, чем у индия, что необходимо для повышения надежности, срока службы и стабильности параметров мощных ЛД, в особенности при высоких температурах окружающей среды.

б) Теплоотводящие основания из искусственных алмазов. Использовались теплоотводы на основе искусственных алмазов и лазерные диоды, аналогичные описанным выше. Измеренные значения теплопроводности неметаллизированных АТО, используемых в наших экспериментах, находились в диапазоне $600 \dots 1400 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Сравнение пара-

тров изготовленных инжекционных лазеров показало, что при использовании теплоотводящих оснований из синтетического алмаза, металлизированных методом ионно-лучевого распыления, их характеристики близки к таковым для лазерных диодов, собранных на теплоотводящих основаниях из природного алмаза с теплопроводностью ~ 1400 Вт/м·К. Измеренные величины адгезии для различных образцов лежали в пределах 5...30 МПа. Разброс значений величины адгезии для одного образца составлял не более 30 % и определялся режимами нанесения пленок и процессом пайки. Удельное сопротивление напыленных слоев не превышало ~ 1 Ом·см.

в) Импульсные диодные линейки на АТО. Изучена сравнительная эффективность лазерных диодных линеек на основе алмазных и медных подложек. Исследовались 30-ваттные диодные линейки (длиной 2...3 мм) на базе гетероструктур типа InGaAs/AlGaAs/GaAs, излучающие на длине волны ~ 810 нм импульсы света миллисекундной длительности в широком диапазоне амплитуд возбуждающих импульсов (до ~ 100 А) при частоте следования до ~ 10 Гц. Использовались алмазные теплоотводящие основания из поликристаллов, выращенных модифицированным CVD-методом. При этом рассмотрены два метода соединения алмазного основания с медной подложкой – один с использованием традиционной технологии металлизации и последующего припаивания, другой – упрощенным способом механической впрессовки. Сравнительные исследования ваттамперных характеристик ЛДЛ, собранных с использованием указанных АТО, а также на основе искусственных монокристаллов и медных оснований показало (рис. 3), что при частотах следования импульсов тока накачки $f \sim 10$ Гц и прочих равных условиях рабочая область ЛДЛ по длительности импульсов возбуждения в случае алмазных теплоотводов простирается до $\tau \geq 1$ мс, тогда как медные основания позволяют работать лишь в ограниченной области длительностей возбуждающих импульсов $\tau \leq 100$ мкс (рис. 3, а).

Следует отметить, что наиболее эффективными в данном случае оказались АТО из монокристаллов. Метод впрессовки поликристаллов дает сравнимые и несколько худшие результаты, однако отличается большей технологичностью и менее трудоемко. Использование комбинированного охлаждения «микроканальный жидкостный теплоотвод – АТО» (рис. 3, б, кривые 4, 5) позволяет расширить рабочую область ЛДЛ по току накачки в 2...3 раза при частоте следования импульсов $f \sim 10$ Гц в миллисекундном диапазоне. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования алмазных технологий при разработке мощных линеек и других структур на основе инжекционных лазеров.

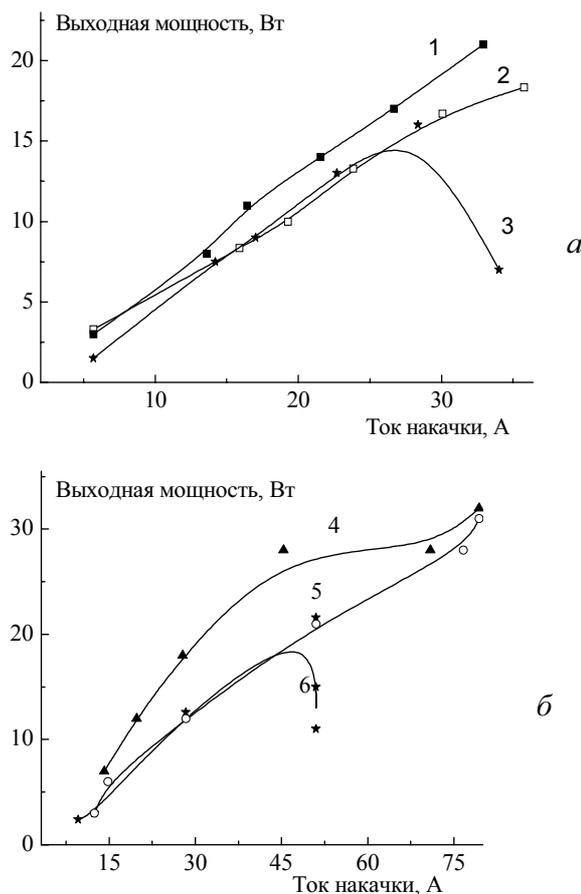


Рис. 3. Ваттамперные характеристики ЛДЛ на медных (а) и алмазных (б) основаниях. Длительность импульсов тока: 1) 30; 2) 50; 3) 100; 4–6) 500...1000 мкс. Кривые 1–4 получены для образцов, не прошедших наработку, 5 и 6 – после наработки

Выводы

Разработана технология формирования высокоадгезионных металлических покрытий, позволяющая создавать лазерные диодные структуры с высокоэффективным теплоотводом на основе искусственных алмазов, обладающие улучшенными базовыми характеристиками. Для лазерных диодов непрерывного режима с использованием алмазных теплоотводящих оснований достигается увеличение выходной мощности до двух раз и существенное расширение линейного (рабочего) участка ваттамперной характеристики. Применение алмазных теплоотводящих оснований для импульсных линеек позволяет расширить рабочую область по току накачки в 2...3 раза и более чем на порядок – по длительности возбуждающих импульсов при частоте следования $f \geq 10$ Гц в миллисекундном диапазоне.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований и Вьетнамской академией наук и технологий в рамках совместного международного проекта (Ф09ВН-007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Природные алмазы России / Под ред. В.Б. Кваскова. – М.: Полярон, 1997. – 304 с.
2. Anthony T.R., Banholzer W.F., Fleischer T.F., et al. Thermal diffusivity of isotopically enriched ^{13}C diamond // *Phys. Rev. B.* – 1990. – V. 42. – № 2. – P. 1104–1111.
3. Моряков О.С., Квасков В.Б., Горбачев В.В., Зезин Р.Б., Храброва Т.В. Природные алмазы в полупроводниковой электронике // *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.* – 1988. – В. 4 (1342). – 36 с. – М.: ЦНИИ «Электроника».
4. Моряков О.С. Алмазные теплоотводы в конструкции полупроводниковых приборов // *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.* – 1982. – В. 1 (857). – 46 с. – М.: ЦНИИ «Электроника».
5. Баранов В.В., Парашук В.В., Рябцев Г.И. и др. Особенности микромонтажа мощных лазерных диодов // *Проблемы проектирования и производства РЭС: Сб. матер. V Междунар. научно-техн. конф. (Новополоцк, 29–30 мая 2008).* – ПГУ, 2008. – С. 40–44.
6. Рябцев Г.И., Батай Л.Е., Парашук В.В. и др. Теплоотводы на основе искусственных алмазов для мощных лазерных диодов // *Lithuanian Journal of Physics.* – 1999. – V. 39. – № 4–5. – P. 389–394.

Поступила 08.10.2009 г.

УДК 621.373.826

СКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРООБЪЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНЫХ СРЕД ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ЗАСВЕТКИ

Г.С. Евтушенко¹, Ф.А. Губарев^{1,2}, В.Б. Суханов², Д.В. Шиянов², С.Н. Торгаев^{1,2}, М.В. Тригуб^{1,2}

¹Томский политехнический университет

²Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

Представлен анализ возможности создания и использования активных оптических систем для визуализации макро- и микрообъектов, в условиях внешней (либо собственной) засветки, в том числе в режиме реального времени. Представлены результаты разработки и тестирования макета такой системы с использованием активной среды высокочастотного лазера на парах бромида меди. Визуализирован процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Проведен ряд экспериментов по визуализации биообъектов, в том числе в условиях внешней засветки.

Ключевые слова:

Лазеры на парах металлов, активная оптическая система, высокоскоростной лазерный монитор, лазерный микроскоп.

Key words:

Metal-vapor lasers, active optical system, high-speed resolution laser monitor, laser microscope.

Введение

В настоящее время все более востребованными становятся оптико-электронные системы, способные визуализировать быстротекущие процессы, в том числе экранированные от наблюдателя слоем плазмы. Такие процессы протекают в зоне взаимодействия мощных потоков энергии (лазерное излучение, электронный пучок и т. д.) с веществом, например, при создании наноразмерных структур, лазерной обработке материалов, самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Для наблюдения подобных явлений целесообразно использовать высокоскоростные лазерные мониторы, в которых в качестве оптического усилителя применяются лазеры на самоограниченных переходах металлов, в частности, лазер на парах меди. Выбор данного типа лазеров обусловлен следующими особенностями: работа в видимой области спектра, высокая спектральная яркость, однородность среды, большое усиление и высокая частота следования импульсов генерации [1].

Оптические системы с усилителями яркости

Для создания активных оптических систем (АОС) необходимо применение квантового усилителя, который должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Оптическая среда квантового усилителя должна быть оптически однородной для того, чтобы усилитель не вносил искажений в передаваемую информацию.
2. Высокое усиление среды, что позволяет работать без резонатора (режим сверхсветимости).
3. Геометрические размеры и угловая апертура усилителя должны обеспечивать прохождение световых пучков без потерь оптической информации.
4. Выходная мощность усилителя должна быть достаточной для практического применения (визуальный контроль).
5. Работа активной среды в импульсном режиме.

Впервые активные среды газовых лазеров для создания АОС применены в работе [2], в которой