

05

Амплитудные шумы одномодовых вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 89X nm с внутрирезонаторными контактами

© С.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, Я.Н. Ковач¹, А.А. Блохин¹, М.Н. Марчий¹, Н.А. Кузьменкова¹,
А.С. Пазгалев¹, А.Г. Кузьменков¹, А.П. Васильев², Н.А. Малеев¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

² НТЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 09.06.2025 г.

В окончательной редакции 09.06.2025 г.

Принята к публикации 14.08.2025 г.

Приведены результаты исследований спектральной плотности шумов относительной интенсивности (амплитудных шумов) одномодовых вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 89X nm на основе гибридной конструкции вертикального микрорезонатора с инжекцией носителей заряда через внутрирезонаторные контактные слои и композиционные брэгговские решетки. Анализ амплитудных шумов лазера показал поведение, характерное для $1/f$ -шума в низкочастотной области, с четко выраженным переходом в белый шум при частотах выше 10 kHz. Зависимость амплитудных шумов от оптической мощности лазера имеет W -образный вид. Повышение температуры ведет к росту амплитудных шумов как при фиксированном рабочем токе, так и сравнимой оптической мощности. Достигнутый уровень амплитудных шумов в диапазоне частот 1 – 100 kHz не превышает -120 dB/Hz (в зависимости от температуры и оптической мощности) и позволяет использовать разработанные лазеры в компактных квантовых сенсорах.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, шумы относительной интенсивности, амплитудные шумы, квантовые сенсоры.

DOI: 10.61011/OS.2025.08.61511.8251-25

В последние годы уделяется большое внимание разработке компактных квантовых сенсоров на основе паров атомов щелочных металлов (^{133}Cs , ^{85}Rb или ^{87}Rb), где для оптической накачки и/или детектирования используются лазерные излучатели [1,2]. Наиболее перспективным направлением является применение вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) [3]. Лазерные излучатели для компактных атомных сенсоров должны удовлетворять определенному комплексу требований: одномодовый режим генерации, возможность прецизионной подстройки длины волны на линию поглощения атомов щелочных металлов, узкая спектральная линия, стабильная линейная поляризация излучения, высокое быстродействие при малых рабочих токах, возможность работы при повышенной температуре (в зависимости от реализации газовой ячейки и схемы построения квантового сенсора), малое энергопотребление, низкий уровень шумов. Большинство предложенных конструктивных решений по созданию одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ спектральных диапазонов 75X/79X nm и 85X/89X nm основаны на применении вертикального микрорезонатора с инжекцией носителей заряда через легированные распределенные брэгговские отражатели (РБО) [4–8]. Однако опубликованные работы преимущественно посвящены вопросам стабилизации состояния поляризации излучения, обеспечения требуемого уровня оптической мощности в одномодовом режиме

и/или быстродействия лазера при заданной температуре, тогда как проблемам минимизации шума относительной интенсивности (relative intensity noise, RIN) или амплитудного шума лазера в низкочастотной области уделено мало внимания. При этом отношение сигнал-шум для квантовых сенсоров определяется не только собственными шумами регистрирующего фотодетектора, но и амплитудными шумами лазера, которые желательно минимизировать до уровня дробовых шумов фотодетектора на частотах детектирования (ниже -120 dB/Hz) [4].

Известно, что спектральная плотность шумов инжекционного лазера в области малых частот типично имеет два участка: область фликкер-шума, обусловленная флуктуациями подвижности и плотности носителей заряда в полупроводниковых областях, и область белого шума, обусловленная квантовыми флуктуациями спонтанного излучения [9,10]. Однако процессы биекции мод и наличие подпороговых мод, излучающих в спонтанном режиме, могут приводить к избыточному низкочастотному шуму или его резкому росту с током накачки [11,12]. Более того, существует корреляция низкочастотных шумов RIN и флуктуации тока накачки инжекционного лазера (так называемый электрический шум) [9,13]. Следовательно, наряду с классическим фликкер-шумом $1/f$ -вида существенное влияние на флуктуацию плотности носителей заряда в активной области могут оказывать генерационно-рекомбинационные

процессы через ловушки, так называемый генерационно-рекомбинационный шум, имеющий зависимость $1/f^2$ -вида [14]. В отличие от полоскового лазера с торцевым выводом излучения для ВИЛ характерно большое количество внутренних гетерограниц и потенциальных барьеров (преимущественно в толстых легированных РБО), что может приводить к более сложной частотной зависимости электрического шума для тока накачки, как, например, в случае многомодовых ВИЛ спектрального диапазона 850 nm с протонной токовой апертурой [15]. Более того, в работе [16] было показано, что спектральная плотность шумов тока многомодового ВИЛ спектрального диапазона 850 nm с селективно-окисленной токовой апертурой нелинейно растет с током накачки: при малых токах реализуется линейная зависимость электрического шума от тока, а при повышенных токах квадратичная зависимость. Однако для инжекционных лазеров на основе системы материалов AlGaAs/GaAs характерна проблема генерационно-рекомбинационного шума, проводящая к более резкому росту электрического шума с током накачки [13]. В результате, для ВИЛ с классической конструкций микрорезонатора можно ожидать зависимость шумов RIN в низкочастотной области не только от частоты, но и от тока накачки (оптической мощности).

Сравнительно недавно нами была предложена альтернативная конструкция ВИЛ спектрального диапазона 85X/89X nm на основе гибридного вертикального микрорезонатора с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои и композиционные брэгговские решетки (далее концепция гибридного микрорезонатора) [17–19]. Такая конструкция позволяет не только уменьшить внутренние оптические потери и заузить спектральную линию, но и может способствовать подавлению негативного влияния особенностей транспорта носителей заряда на электрический шум. В настоящей работе представлены результаты исследований спектральной плотности амплитудных шумов одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ спектрального диапазона 89X nm, реализованных в рамках концепции гибридного микрорезонатора.

Объект исследований представляет собой полупроводниковый инжекционный лазер на основе гибридного вертикального микрорезонатора с вертикальным выводом излучения вверх и конструктивно состоит из нелегированной подложки GaAs, нижнего распределенного брэгговского отражателя (РБО) на основе четвертьволновых слоев $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, нижнего внутрирезонаторного контактного слоя $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ *n*-типа, нижней композиционной брэгговской решетки *n*-типа на основе слоев $n-Al_{0.15}Ga_{0.85}As/n-Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ с градиентными интерфейсами на гетерограницах, оптического резонатора $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ с активной областью, верхней композиционной брэгговской решетки $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ *p*-типа с селективно-окисленной апертурой, верхнего внутрирезонаторного

контактного слоя $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ *p*-типа и верхнего диэлектрического РБО на основе четвертьволновых слоев SiO_2/Ta_2O_5 . В качестве активной области использованы пять квантовых ям $In_{0.06}Ga_{0.94}As$ толщиной 8 nm, ограниченных барьерами $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$. Токовая апертура сформирована методом селективного окисления в парах воды составного апертурного слоя AlAs/ $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$. Нюансы гетероструктуры и приборной конструкции 89X nm ВИЛ приведены в работах [18,19].

На рис. 1, *a* представлено влияние внешней температуры на вольт- и ватт-амперные характеристики ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с характерным размером селективно-окисленной токовой апертуры 2 μ m. При температуре 20 °C приборы демонстрируют лазерную генерацию с дифференциальной эффективностью 0.57 A/W и пороговым током 0.3 mA. Эффект саморазогрева лазера ограничивает максимальный ток лазера. Поскольку достижения точки насыщения выходной оптической мощности сопряжены с сильным перегревом активной области и резким ускорением деградации лазеров, то диапазон рабочих токов было решено ограничить сверху по уровню падения дифференциальной эффективности на 50%. С ростом температуры до 80 °C наблюдается не только уменьшение предельного рабочего тока насыщения с 3.6 до \sim 3 mA, но и снижение дифференциальной эффективности до 0.47 A/W и рост порогового тока до 0.56 mA. В первом случае такое поведение преимущественно обусловлено ростом теплового сопротивления лазера из-за ухудшения теплопроводности полупроводниковых материалов. Во втором случае эффект может быть связан как с неоптимальным спектральным рассогласованием резонансной длины волны относительно спектра усиления активной области, так и с ухудшением эффективности токовой инжекции с ростом температуры. Анализ причин такого поведения требует дополнительных исследований и выходит за рамки настоящей работы.

Анализ спектральных и поляризационных характеристик 89X nm ВИЛ показал, что лазерная генерация наблюдается через фундаментальную моду (так называемый одномодовый режим) во всем исследуемом диапазоне токов и температур (см. вставку к рис. 1, *a*). Благодаря ромбовидной форме селективно окисленной токовой апертуры вырождение фундаментальной моды снимается и наблюдается фиксация поляризации излучения лазера вдоль кристаллографического направления $[110]$ с фактором подавления ортогонально-поляризованной моды (orthogonal polarization suppression ratio, OPSR) более 20 dB [19]. С ростом температуры до 80 °C наблюдается некоторое снижение уровня OPSR, что, по видимому, обусловлено уменьшением доли вынужденного излучения относительно спонтанного.

Исследования относительной интенсивности шума излучения лазера RIN были выполнены с помощью цифрового синхронного усилителя (ЦСУ), работающего в режиме измерения плотности шумов в полосе 1 Hz на заданной отстройке от несущей частоты. Для

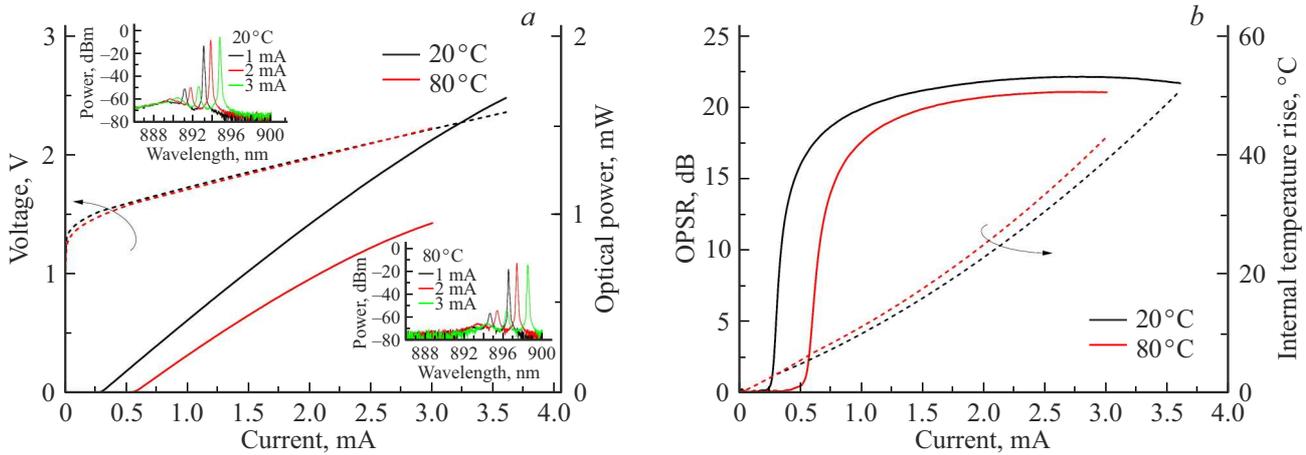


Рис. 1. Статические характеристики ВИЛ спектрального диапазона 89X нм с характерным размером селективно-окисленной токовой апертуры $2\ \mu\text{m}$ при различной температуре: *a* — Вольт и ватт-амперные характеристики. На вставках спектры излучения при различных токах. *b* — зависимости фактора подавления ортогонально-поляризованной моды OPR от тока.

повышения соотношения сигнал/шум и эффективного сопряжения малошумящего фотодетектора (МФД) с усилителем ЦСУ использовался преобразователь ток-напряжение (ПТН). С целью адекватного учета частотной зависимости коэффициента усиления преобразователя ПТН и потерь в электрическом тракте, соединяющем выход фотодетектора МФД и вход усилителя ЦСУ, была определена соответствующая передаточная функция G . Среднеквадратичный сигнал общего шума RMS_{total} рассчитывался на основе регистрируемых синфазной и квадратурной компонент шума с усреднением по времени. Уровень шумов RIN определялся вычитанием из общего регистрируемого амплитудного шума RMS_{total} термического шума RMS_{th} регистрирующей системы (определяется при отсутствии оптического сигнала) с последующей нормировкой на передаточную функцию G и среднее значение фототока I_o (при падающей на фотодетектор оптической мощности P_o): $RIN_{laser} = 20 \log(\sqrt{RMS_{total}^2 - RMS_{th}^2} / I_o G)$. Малошумящий источник питания в комбинации с фильтром низких частот с частотой среза 1.5 Hz использовался для минимизации вклада технических шумов источника питания. Ввиду ограничения ПТН по входному току при выходной оптической мощности лазера более 0.6 mW использовались нейтральный фильтры для ослабления оптической мощности, регистрируемой фотодетектором.

На рис. 2, *a* приведены типовые результаты исследования спектральной плотности относительной интенсивности шума излучения одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 89X нм с характерным размером селективно-окисленной токовой апертуры $2\ \mu\text{m}$ при температуре 20 °С. С целью минимизации шумов при использовании канговых разъемов измерения проводились непосредственно на чипах без монтажа в корпус. Следует отметить, что технические шумы измерительной системы начинают проявляться лишь при частотах ниже 100 Hz,

но они на 2 порядка ниже регистрируемых значений шумов лазера и не оказывают существенного влияния. Спектр шумов RIN-лазера в низкочастотной области имеет вид, характерный для $1/f^n$ -шума, с последующим четко выраженным переходом в белый шум при частотах выше 10 kHz, уровень которого заметно превышает уровень дробового шума фотодетектора. Трехкратное увеличение выходной оптической мощности ВИЛ ведет не только к ожидаемому снижению уровня белого шума лазера [20], но и уровня $1/f^n$ -шума, несмотря на рост электрического шума. При этом наблюдается некоторое смещение границы перехода в белый шум (далее перехода $1/f-1/f^0$) в сторону меньших частот. Скорость падения шумов RIN с частотой (в низкочастотной области) слабо зависит от оптической мощности и составляет около $\sim 11\ \text{dB/Hz}$ на декаду, т.е. зависимость имеет классический $1/f$ -вид, характерный для фликкер-шума, что хорошо коррелирует с экспериментальными данными результатов для одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ спектрального диапазона 79X нм [7], 85X нм [4] и 89X нм [6,21] на основе классической конструкции вертикального микрорезонатора с инжекцией носителей заряда через легированные РБО.

На рис. 2, *b* представлены типовые зависимости уровня шума RIN исследуемых лазеров от падающей оптической мощности для различных частот детектирования при температуре 20 °С. Видно, что характер поведения шумов RIN от выходной оптической мощности (тока накачки) зависит от частоты детектирования. В режиме спонтанного излучения рост выходной мощности (коррелирует с положением порога лазерной генерации) ведет к резкому увеличению уровня шумов RIN [22] независимо от частоты детектирования, что может быть объяснено ростом флуктуации материального усиления [9]. При переходе в режим вынужденного излучения картина меняется. Так, при частотах выше 10 kHz вначале наблюдается ярко выраженное падение шумов

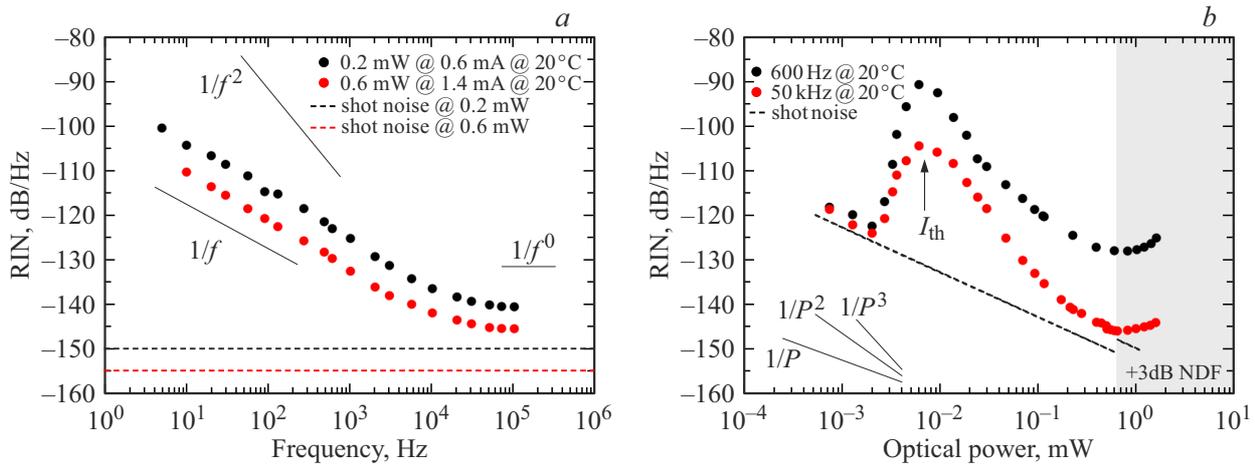


Рис. 2. Спектральная плотность относительной интенсивности шума излучения RIN для гибридного ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с характерным размером селективно-окисленной токовой апертуры $2\ \mu\text{m}$ при температуре измерений 20°C . *a* — частотная зависимость шумов RIN при разном уровне оптической мощности. *b* — зависимость шумов RIN от падающей оптической мощности на разных частотах детектирования. Серым цветом выделена область применения нейтрального фильтра NDF с ослаблением 3 dB.

RIN-лазера с последующим быстрым насыщением на уровне $145\ \text{dB/Hz}$, по-прежнему превышающем уровень дробовых шумов фотодетектора, и последующим ростом уровня шума при падающей оптической мощности выше $1\ \text{mW}$ (т.е. реализуется W -образная зависимость). Скорость падения белого шума составляет $\sim 30\ \text{dB/Hz}$ на декаду, что коррелирует с результатами работ для ВИЛ ближнего ИК диапазона [23,24]. На частотах менее $1\ \text{kHz}$ наблюдается резкое уменьшение скорости падения шума с ростом оптической мощности до $\sim 15\ \text{dB/Hz}$ на декаду, насыщение шумов RIN происходит при несколько меньших значениях падающей оптической мощности, а зависимость имеет более четкий W -образный вид. В результате, по мере роста выходной оптической мощности в режиме лазерной генерации сперва происходит падение шумов RIN, что коррелирует с результатами исследований одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ спектрального диапазона 89X nm [21], но при мощностях более $0.6\ \text{mW}$ наблюдается обратная тенденция к росту шума RIN в низкочастотной области. В целом полученные значения шума RIN в области белого шума заметно ниже данных для классических ВИЛ спектрального диапазона 76X nm [25] и 79X nm [7] и хорошо коррелируют с данными для 85X nm [4] и для 89X nm [6].

Аномальная зависимость шума RIN при сравнимой оптической мощности также наблюдалась для одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 76X nm с воздушной токовой апертурой [25], но рост шума RIN, напротив, был обнаружен в высокочастотной области, где типично проявляется белый шум, и был объяснен поляризационной нестабильностью. Однако анализ модового состава и состояния поляризации излучения исследуемых лазеров не выявил каких-либо эффектов биения поперечных мод и/или переключения поляризации, несмотря на снятие вырождения фундаментальной моды по поляризации.

Похожее поведение шума RIN ранее наблюдалось для многомодовых ВИЛ спектрального диапазона 850 nm с протонной токовой апертурой [13,15], но было объяснено особенностями транспорта носителей заряда в конкретной конструкции ВИЛ. Более того, генерационно-рекомбинационный шум в инжекционных лазерах на основе системы материалов AlGaAs/GaAs может приводить к сдвигу положения границы перехода из зависимости вида $1/f$ в зависимость вида $1/f^0$ и заметному превышению уровня дробовых шумов [13]. Однако в нашем случае наблюдается обратная тенденция для границы перехода $1/f-1/f^0$.

Принимая во внимание высокие тепловые сопротивления исследуемых ВИЛ ($\sim 7\ \text{K/mW}$), было сделано предположение, что данное поведение связано с тепловыми эффектами из-за саморазогрева лазера. Для проверки данного предположения были проведены температурные исследования шумов RIN. Очевидно, что при фиксированном значении тока накачки повышение температуры ведет к росту шумов RIN, что можно связать с падением выходной оптической мощности лазера. Однако даже при сравнимых значениях падающей мощности (за счет изменения рабочего тока) с увеличением температуры наблюдается рост шумов RIN и сдвиг области перехода $1/f$ -шума в белый шум в сторону больших частот (рис. 3, *a*). При этом характер поведения спектральной плотности шумов RIN не меняется, но наблюдается аддитивный рост шумов на $5-6\ \text{dB}$, что можно интерпретировать как сохранение механизмов, определяющих частотную зависимость шумов RIN. Согласно рис. 3, *b*, не выявлено и существенного изменения в зависимости шумов RIN от оптической мощности, за исключением аддитивного повышения шумов, даже в области белого шума.

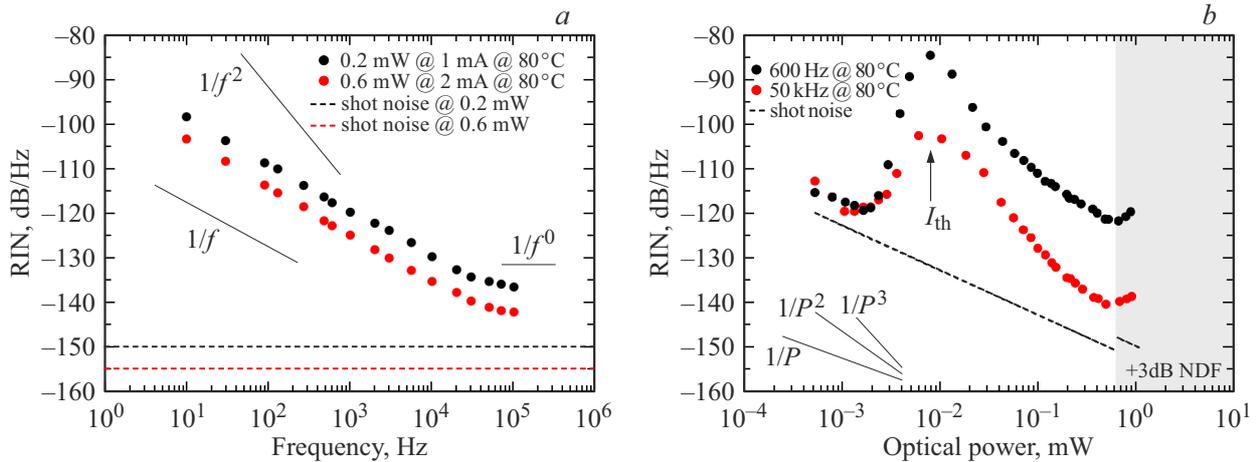


Рис. 3. Спектральная плотность относительной интенсивности шума излучения RIN для гибридного ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с характерным размером селективно-окисленной токовой апертуры 2 μm при температуре измерений 80°C. *a* — частотная зависимость шумов RIN при разном уровне оптической мощности. *b* — зависимость шумов RIN от падающей оптической мощности на разных частотах детектирования. Серым цветом выделена область применения нейтрального фильтра NDF с ослаблением 3 dB.

На рис. 1, *b* приведены результаты оценки перегрева активной области лазера, полученные на основе анализа сдвига резонансной длины волны от температуры и выделяемой мощности. Высокое тепловое сопротивление ВИЛ ведет к стремительному саморазогреву активной области лазера и уже при рабочих токах выше 2.5 mA превышает 30°C. Однако повышение температуры активной области лазера ведет к росту шумов RIN, что и обуславливает насыщение и рост шумов RIN при больших уровнях оптической мощности (тока). Увеличение внешней температуры лишь усиливает негативный эффект из-за роста теплового сопротивления лазера.

Отчасти похожее влияние температуры на шумы RIN было выявлено для одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 76X nm с воздушной токовой апертурой [25] и объяснено неэффективной работой лазеров при повышенных температурах, по-видимому, имея ввиду неоптимальное спектральное рассогласование резонансной длины волны и спектра усиления активной области. Однако повышение температуры также усиливает термический выброс носителей заряда из активной области (снижение эффективности токовой инжекции), что в совокупности с неоптимальным спектральным рассогласованием ведет не только к заметному повышению порогового тока, но и рабочего тока при заданной оптической мощности (учитывая падение дифференциальной эффективности), а следовательно, и к росту электрических шумов. Поиск причин аддитивного повышения шумов требует дополнительных комплексных исследований и выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, проведены исследования спектральной плотности относительной интенсивности шумов одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 89X nm с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои и композиционные брэгговские решетки.

Характер поведения шумов RIN и поляризационных шумов лазеров имеет вид 1/*f*-шума с четко выраженным переходом в белый шум. Увеличение оптической мощности излучения ведет к падению амплитудных шумов с насыщением на уровне -145 dB/Hz в диапазоне частот 10 – 100 kHz. Повышение температуры ведет к росту шумов RIN как при фиксированном рабочем токе, так и оптической мощности. Тем не менее при оптической мощности более 0.2 mW уровень амплитудных шумов в диапазоне частот 1 – 100 кГц оказывается ниже -120 dB/Hz. Полученные результаты в целом коррелируют как с данными для ВИЛ спектрального диапазона 79X nm [7] и 85X nm [4], так и с данными для 89X nm ВИЛ [6,21] с поляризационной анизотропией и пространственно-селективными потерями, успешно апробированных в квантовых стандартах частоты и/или квантовых магнитометрах. Результаты исследований важны для создания лазерных излучателей для квантовых атомных сенсоров на основе атомов ¹³³Cs.

Финансирование работы

Исследования выполнены при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FFUG-2025-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Kitching. Appl. Phys. Rev., **5** (3), 031302 (2018). DOI: 10.1063/1.5026238

- [2] P. Zhou, W. Quan, K. Wei, Z. Liang, J. Hu, L. Liu, G. Hu, A. Wang, M.Ye. *Biosensors*, **12** (12), 1098 (2022). DOI: 10.3390/bios12121098
- [3] B.D. Padullaparthi, J. Tatum, I. Kenichi. *VCSEL Industry: Communication and Sensing* (John Wiley & Sons, 2021).
- [4] D.K. Serkland, K.M. Geib, G.M. Peake, R. Lutwak, A. Rashed, M. Varghese, G. Tepolt, M. Prouty In: *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XI*, ed. by K.D. Choquette, J.K. Guenter. *Integrated Optoelectronic Devices* (2007), p. 648406. DOI: 10.1117/12.715077
- [5] J.D. Francesco, F. Gruet, C. Schori, C. Affolderbach, R. Matthey, G. Mileti, Y. Salvadé, Y. Petremand, N. De Rooij In: *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics IV*, ed. by K. Panajotov. *SPIE Photonics Europe* (2010), p. 77201T. DOI: 10.1117/12.854147
- [6] F. Gruet, A. Al-Samaneh, E. Kroemer, L. Bimboes, D. Miletic, C. Affolderbach, D. Wahl, R. Boudot, G. Mileti, R. Michalzick. *Opt. Express.*, **21** (5), 5781 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.005781
- [7] V.A. Gaisler, I.A. Derebezov, A.V. Gaisler, D.V. Dmitriev, A.K. Bakarov, A.I. Toropov, M.M. Kachanova, Y.A. Zhivodkov, A.V. Latyshev, M.N. Skvortsov, S.M. Ignatovich, V.I. Vishnyakov, N.L. Kvashnin, I.S. Mesenzova, A.V. Taichenachev, S.N. Bagaev, I.Y. Blinov, D.A. Parekhin, *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **57** (5), 445–450 (2021). DOI: 10.3103/S875669902105006X
- [8] Q. Fu, Y. Sun, S. Yu, A. Wang, J. Yin, Y. Zhao, J. Dong. *Nanomaterials*, **13** (6), 1120 (2023). DOI: 10.3390/nano13061120
- [9] Y.L. Bessonov, N.B. Kornilova, V.D. Kurnosov, N.V. Moroz, S.D. Narolenko, C.M. Thai, V.R. Shidlovskii. *Sov. J. Quantum Electron.*, **15** (11), 1567–1569 (1985). DOI: 10.1070/QE1985v015n11ABEH007990
- [10] T. Suhara. *Semiconductor Laser Fundamentals* (CRC Press, 2004). DOI: 10.1201/9780203020470
- [11] A.P. Bogatov, A.E. Drakin, S.A. Plisyuk, A.A. Stratonnikov, M.S. Kobyakova, A.V. Zubanov, A.A. Marmalyuk, A.A. Padalitsa. *Quantum Electron.*, **32** (9), 809–814 (2002). DOI: 10.1070/QE2002v032n09ABEH002296
- [12] A.P. Bogatov, P.G. Eliseev, O.A. Kobildzhanov, V.R. Madgazin, O.G. Okhotnikov, G.T. Pak, A.V. Khaïdarov. *Sov. J. Quantum Electron.*, **16** (12), 1596–1602 (1986). DOI: 10.1070/QE1986v016n12ABEH008476
- [13] S.-L. Jang, J.-Y. Wu. *Solid. State. Electron.*, **36** (2), 189–196 (1993). DOI: 10.1016/0038-1101(93)90138-G
- [14] F.N. Hooge, T.G.M. Kleinpenning, L.K.J. Vandamme. *Reports Prog. Phys.*, **44** (5), 479–532 (1981). DOI: 10.1088/0034-4885/44/5/001
- [15] P. Signoret, G. Belleville, B. Orsal. *Fluct. Noise Lett.*, **01** (01), L1–L5 (2001). DOI: 10.1142/S0219477501000044
- [16] J. Zhang, W. Liao, X. Wang, G. Lu, S. Yang, Z. Wei. *Photonics*, **9** (11), 801 (2022). DOI: 10.3390/photonics9110801
- [17] M.A. Bobrov, N.A. Maleev, S.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, A.A. Blokhin, Y.A. Guseva, M.M. Kulagina, Y.M. Zadiranov, S.I. Troshkov, V. Lysak, V.M. Ustinov. *Semiconductors*, **50** (10), 1390–1395 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616100092
- [18] S.A. Blokhin, N.A. Maleev, M.A. Bobrov, A.G. Kuz'menkov, A.P. Vasil'ev, Y.M. Zadiranov, M.M. Kulagina, A.A. Blokhin, Y.A. Guseva, A.M. Ospennikov, M.V. Petrenko, A.G. Gladyshev, A.Y. Egorov, I.I. Novikov, L.Y. Karachinsky, D.V. Denisov, V.M. Ustinov. *Quantum Electron.*, **49** (2), 187–190 (2019). DOI: 10.1070/QEL16871
- [19] S.A. Blokhin, Y.N. Kovach, M.A. Bobrov, A.A. Blokhin, N.A. Maleev. *St. Petersburg. Polytech. Univ. J. Phys. Math.*, **16** (3), 16–22 (2023). DOI: 10.18721/JPM.163.202
- [20] M. Yamada. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22** (7), 1052–1059 (1986). DOI: 10.1109/JQE.1986.1073087
- [21] E. Kroemer, J. Rutkowski, V. Maurice, R. Vicarini, M.A. Hafiz, C. Gorecki, R. Boudot. *Appl. Opt.*, **55** (31), 8839 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.008839
- [22] A.B. Маругин, A.B. Харчев, В.Б. Цареградский. *ЖТФ*, **64** (5), 62 (1994).
- [23] F. Koyama, K. Morito, K. Iga. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (6), 1410–1416 (1991). DOI: 10.1109/3.89958
- [24] D.M. Kuchta, J. Gamelin, J.D. Walker, J. Lin, K.Y. Lau, J.S. Smith, M. Hong, J.P. Mannaerts. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (11), 1194–1196 (1993). DOI: 10.1063/1.108731
- [25] H.P. Zappe, F. Monti di Sopra, H.-P. Gauggel, K.H. Gulden, R. Hovel, M. Moser. In: *Laser Diodes and LEDs in Industrial, Measurement, Imaging, and Sensors Applications II; Testing, Packaging, and Reliability of Semiconductor Lasers V*, ed. by G.T. Burnham. *Symposium on Integrated Optoelectronics (SPIE, 2000)*, p. 106. DOI: 10.1117/12.380526