

Исследование быстродействующих полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров на основе AlInGaAs наногетероструктур с большой спектральной расстройкой усиления

© Н.А. Малеев^{*†}, С.А. Блохин^{*}, М.А. Бобров^{*}, А.Г. Кузьменков^{+*}, А.А. Блохин^{*}, Р. Moser[‡],
J.A. Lott[‡], D. Bimberg[‡], В.М. Устинов^{*}

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[•] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Technical University Berlin,
10623 Berlin, Germany

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 15 июня 2014 г.)

Исследовано влияние спектральной расстройки максимума спектра усиления активной области на основе наногетероструктур AlInGaAs относительно резонансной длины волны вертикального микрорезонатора на статические и динамические характеристики быстродействующих вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с двумя селективно-окисленными токовыми апертурами. Для многомодовых приборов с величиной спектральной расстройки более 20 нм и относительно большими размерами токовой апертуры (более 6 мкм) обнаружено явление аномального начала лазерной генерации через моды высшего порядка с последующим переключением на моды низкого порядка при высоких токах. Одновременная генерация через оба типа поперечных мод, наблюдаемая при промежуточных уровнях накачки, ведет к неклассической форме зависимости максимальной частоты эффективной модуляции от тока накачки. Рост рабочей температуры, а также уменьшение размеров токовой апертуры ВИЛ приводит к классической картине многомодовой лазерной генерации. Наблюдаемые явления необходимо учитывать при оптимизации конструкции быстродействующих вертикально-излучающих лазеров.

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, VCSELs — vertical cavity surface emitting lasers) обладают малой угловой расходимостью и симметричной диаграммой направленности выходного оптического излучения, низкими рабочими токами, высоким быстродействием и групповой технологией изготовления с возможностью полноценного тестирования приборов до разделения пластины на кристаллы. Использование активных областей на основе напряженных квантово-размерных наногетероструктур AlInGaAs, обеспечивающих увеличение дифференциального усиления [1], снижение паразитной емкости анодной контактной площадки за счет ее размещения на толстом планаризирующем слое с низкой диэлектрической проницаемостью [2] и уменьшение внутренней паразитной емкости за счет использования нескольких селективно-окисленных слоев токовых апертур [3], позволяет реализовать быстродействующие ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с полосой рабочих частот выше 25 ГГц при комнатной температуре [4]. Для большинства вариантов применения ВИЛ в быстродействующих (10 Гбит/с и выше) оптических каналах передачи данных требуется обеспечить работу приемопередающих модулей в широком интервале рабочих температур (как правило, 20–85°C) без использования схем активной термостабилизации [5]. Одним из способов улучшения температурной стабильности характеристик ВИЛ является пред-

намеренный сдвиг в коротковолновую область максимума спектра усиления активной области относительно резонансной длины волны вертикального оптического микрорезонатора [6]. При этом выбор оптимального значения величины такой спектральной расстройки (СР) является важной практической задачей и определяется комплексом взаимосвязанных факторов (излучательные свойства активной области; конструкция оптического микрорезонатора; латеральные размеры токовой апертуры, определяющие размеры светоизлучающей области; тепловые характеристики лазера и др.).

В данной работе исследовано влияние величины СР на характеристики быстродействующих ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с активной областью на основе напряженных квантово-размерных наногетероструктур AlInGaAs и двумя селективно-окисленными токовыми апертурами. Детали конструкции и технологии изготовления исследуемых приборов опубликованы ранее [7]. Эпитаксиальные структуры для исследуемых ВИЛ были выращены методом газофазной эпитаксии из паров металлорганических соединений на полуизолирующих подложках GaAs и состояли из верхнего распределенного брэгговского отражателя (РБО), содержащего 21 пару четвертьволновых слоев $Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, легированных *p*-типом; двух легированных *p*-типом пар четвертьволновых слоев, содержащих апертурные слои со сложным профилем по составу Al; нелегированного оптического резонатора $Al_{0.45}Ga_{0.55}As$ с полной оптиче-

[†] E-mail: maleev@beam.ioffe.ru

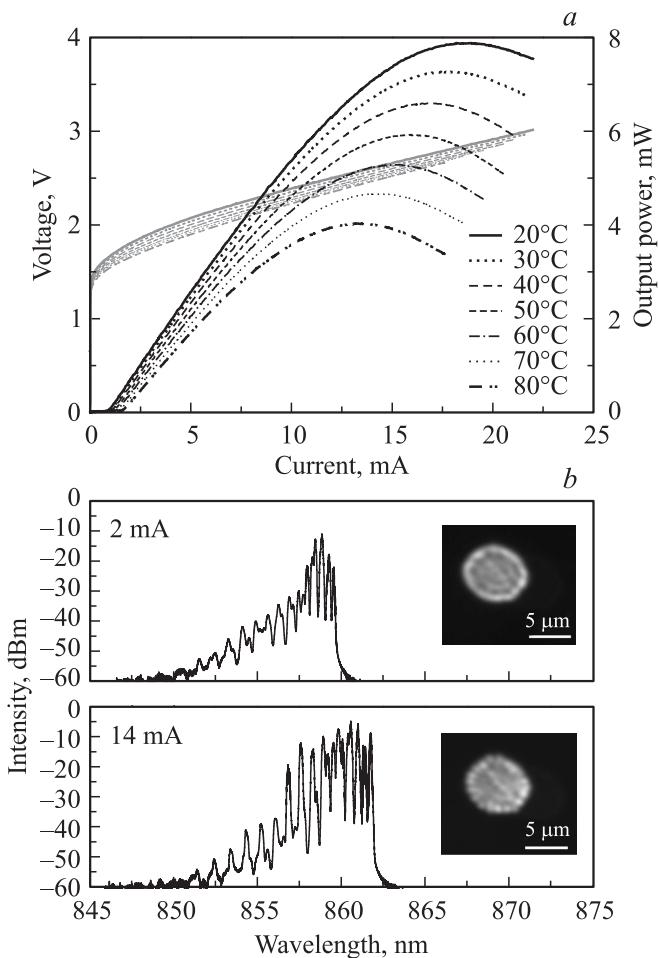


Рис. 1. ВИЛ № 1 с токовой апертурой 7 мкм и величиной CP менее 10 нм. *a* — семейство ватт-вольт-амперных характеристик; *b* — спектры лазерной генерации и картины ближнего поля излучения при температуре 25°C.

ской толщиной в одну резонансную длину волны, содержащего 5 напряженных квантовых ям $In_{0.08}Ga_{0.92}As$ толщиной 4 нм каждая; нижнего РБО, содержащего 36 пар четвертьволновых слоев $Al_{0.1}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, легированных n -типом; и сильно легированного контактного слоя n -GaAs толщиной 1.5 мкм. С целью улучшения статических характеристик и достижения высокого быстродействия параметры РБО (профили изменения состава на границах четвертьволновых слоев и профили легирования) были оптимизированы на предмет снижения последовательного сопротивления и уменьшения внутренних оптических потерь.

Для изготовления кристаллов ВИЛ использовалась фотолитография, сухое травление мезаструктур, селективное окисление токовых апертур, вакуумное напыление и термическое вжигание контактной металлизации, планаризация структур с помощью слоя бензоциклобутена (BCB) и формирование контактных площадок. Измерения статических (ватт-вольт-амперные характеристики, спектры и картины ближнего поля излучения) и динамических (S -параметры) характеристик ВИЛ про-

водились непосредственно на пластине в непрерывном режиме для набора рабочих температур.

На рис. 1, *a* представлены семейства вольт-амперных и мощностных характеристик для кристалла ВИЛ № 1 с латеральным размером токовой апертуры около 7 мкм, измеренные для набора температур. Данный прибор изготовлен из эпитаксиальной гетероструктуры № 1 с величиной CP менее 10 нм. Следует отметить, что в исследуемых приборах токовая апертура в плане имела симметричную форму. Независимо от рабочей температуры ватт-амперные характеристики имеют классическую форму с линейным ростом выше порога генерации и последующим загибом, вызванным тепловыми эффектами. Анализ спектров лазерной генерации и пространственной картины ближнего поля излучения при комнатной температуре во всем диапазоне рабочих токов подтверждает многомодовую генерацию на пространственных модах низшего порядка, имеющих наибольшую длину волны (рис. 1, *b*). При этом с ростом тока накачки спектр излучения сдвигается в длинно-

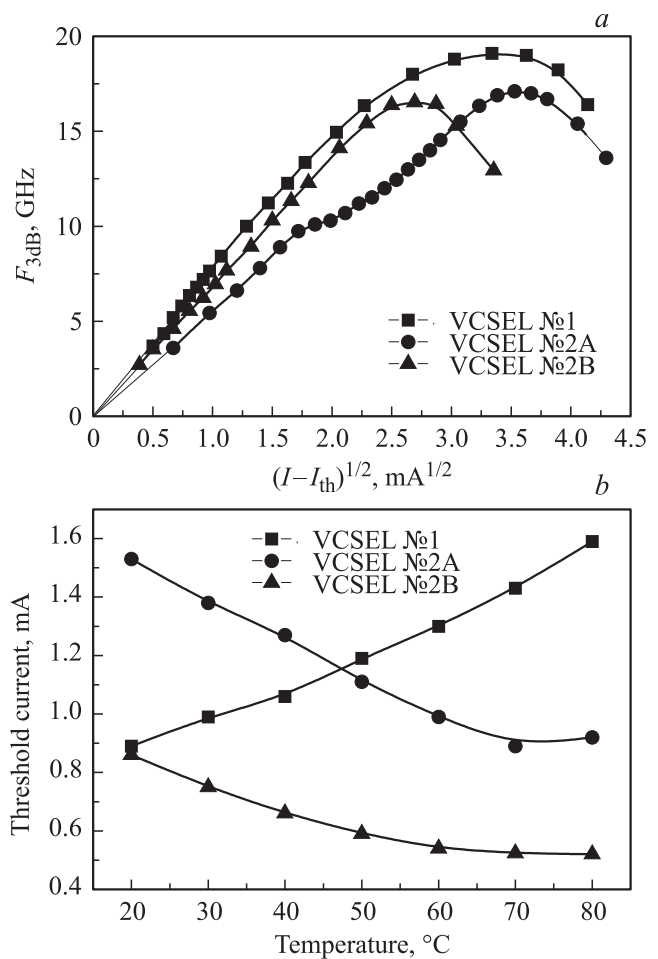


Рис. 2. Зависимости максимальной частоты эффективной модуляции F_{3dB} от уровня токовой накачки выше порога генерации при температуре 25°C (*a*) и зависимости величины порогового тока I_{th} от температуры (*b*) для исследованных вертикально-излучающих лазеров.

волновую область вследствие эффекта саморазогрева лазера.

Согласно результатам анализа экспериментальных зависимостей коэффициента отражения входного высокочастотного сигнала (параметр S_{11}), паразитная частота отсечки ВИЛ № 1 превышает 20 ГГц и не лимитирует высокочастотные свойства лазера. При этом максимальная частота эффективной модуляции (по уровню спада амплитудно-частотной характеристики (параметр S_{21}) на 3 дБ), измеренная для ВИЛ № 1 при комнатной температуре, демонстрирует типичную зависимость от уровня токовой накачки (см. рис. 2, *a*), характерную для инжекционных полупроводниковых лазеров, неограниченных паразитной частотой отсечки: линейный рост на начальном участке со скоростью ~ 7.5 ГГц/мА^{1/2}, затем быстрое насыщение на уровне 19 ГГц с последующим падением частоты на конечном участке из-за эффекта насыщения усиления и падения дифференциального усиления [1]. Описанное поведение полностью соответствует классической модели лазерной генерации ВИЛ [6].

Для изучения влияния величины СР были исследованы ВИЛ, изготовленные из эпитаксиальной структуры № 2 с большой (более 20 нм) величиной СР. На рис. 3, *a* представлены семейства вольт-амперных и мощностных (ватт-амперных) характеристик для кристалла ВИЛ № 2А с латеральным размером токовой апертуры около 7 мкм. Следует отметить, что в исследуемых приборах токовая апертура в плане имела форму, близкую к квадрату, что обусловлено особенностями процесса селективного окисления слоев AlGaAs с высоким составом по Al. При относительно низких рабочих температурах (от 20 до 40 °С) на ватт-амперных характеристиках можно выделить три участка: начальный с относительно низкой дифференциальной эффективностью (участок I), средний с резким ее возрастанием (участок II) и завершающий с классическим ходом ватт-амперной характеристики (участок III). Для анализа причин наблюдаемого аномального поведения ВИЛ № 2А были измерены спектры лазерной генерации и картины ближнего поля излучения в зависимости от рабочего тока. Приведенные на рис. 3, *b* результаты измерений позволяют сделать выводы о том, что на участке I реализуется лазерная генерация на одной из поперечных мод высшего порядка, которая преимущественно пространственно локализована вблизи границы токовой апертуры. Затем, по мере роста уровня накачки, на участке II одновременно реализуется генерация на поперечных модах высокого и низкого порядка. При дальнейшем росте токовой накачки происходит переход к классической многомодовой генерации на нескольких поперечных модах низкого порядка (участок III).

По сравнению с ВИЛ № 1 конструкция лазера принципиально не изменялась, паразитная частота отсечки ВИЛ № 2А по-прежнему превышает 20 ГГц и не влияет на быстродействие прибора. В то же время форма зависимости максимальной частоты эффективной модуляции ВИЛ № 2А от уровня токовой накачки, измеренная при

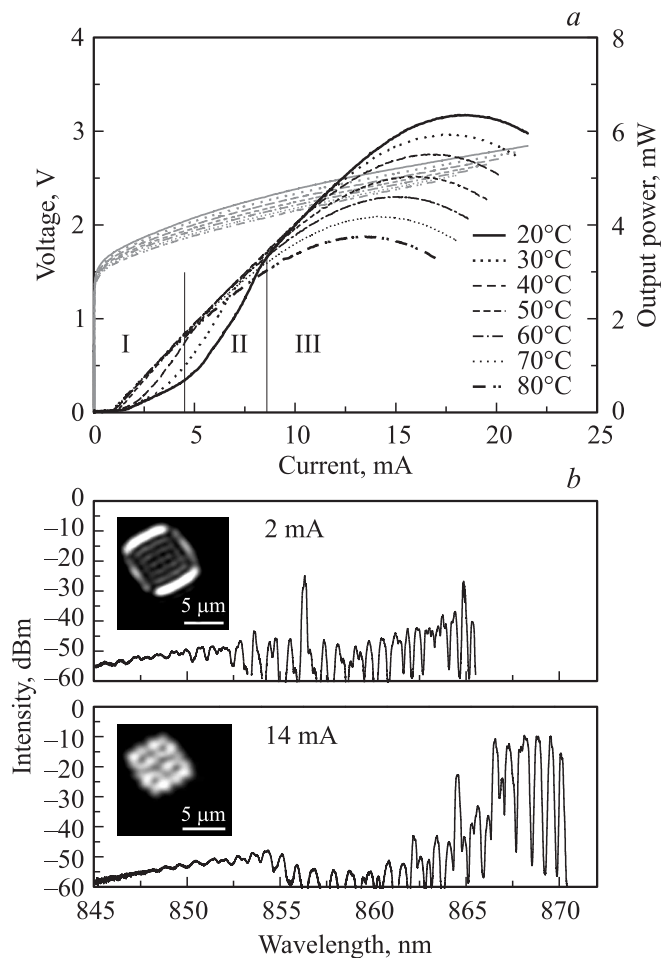


Рис. 3. ВИЛ № 2А с токовой апертурой 7 мкм и величиной СР более 20 нм. *a* — семейство ватт-вольт-амперных характеристик; *b* — спектры лазерной генерации и картины ближнего поля излучения при температуре 25 °С.

комнатной температуре, заметно отличается от обычной (см. рис. 2, *a*). При уровнях накачки, соответствующих участку II, наблюдается падение скорости нарастания максимальной частоты эффективной модуляции с током накачки. Одновременно при этом наблюдаются два резонансных пика в амплитудно-частотной характеристике лазера (не показано). Аналогично случаю, рассмотренному в работе [8], можно предположить, что причина наблюдаемых явлений состоит в конкуренции между модой высшего порядка и модами низкого порядка за носители заряда.

На рис. 2, *b* приведена эволюция порогового тока с температурой для исследуемых лазеров. ВИЛ № 1 демонстрирует рост величины порогового тока с температурой, тогда как для ВИЛ № 2А наблюдается обратная температурная зависимость порогового тока, что обеспечивает более высокую температурную стабильность лазеров с большой величиной СР.

В работе [9] опубликованы результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей лазерной генерации в зависимости от величины СР

для ВИЛ спектрального диапазона 910–965 нм с одной селективно-окисленной токовой апертурой круглой формы в диапазоне низких рабочих температур (110–220 К). Было показано, что в случае большой величины СР возможна последовательная реализация лазерной генерации в трех режимах: на одной или нескольких поперечных модах высшего порядка; одновременно на нескольких поперечных модах (включая фундаментальную) и на фундаментальной моде. Недавно возможность подобного поведения в диапазоне рабочих температур 20–85°С была экспериментально обнаружена для ВИЛ спектрального диапазона 965 нм с двумя селективно-окисленными токовыми апертурами круглой формы и величиной СР около 10 нм [10]. Для того чтобы качественно оценить влияние конструкции оптического микрорезонатора на возможность реализации аномального начала лазерной генерации, были выполнены оценочные расчеты фактора оптического ограничения для возможных мод оптического микрорезонатора ВИЛ при разной конструкции апертурных слоев. Рассматривались варианты одного тонкого апертурного слоя, двух тонких апертурных слоев, двух толстых (четвертьволновых) апертурных слоев и двух апертурных слоев с градиентным изменением толщины (последний вариант использован в исследуемых приборах). При расчетах использовалась модель эффективного показателя преломления [11], в рамках которой реальный волновод заменяется на эффективный плоский (в случае апертуры квадратного сечения) или цилиндрический (для круглой апертуры) оптический волновод. Из результатов моделирования следует, что использование двух толстых селективно-окисленных токовых апертур или двух апертурных слоев с градиентным изменением толщины существенно увеличивает скачок эффективного показателя преломления между центральной частью ВИЛ (областью протекания тока, ограниченной токовой апертурой) и его периферией (области с селективно-окисленными слоями), что приводит к улучшению локализации поперечных мод высокого порядка и нивелированию разницы в значениях их фактора оптического ограничения по сравнению с фундаментальной модой. Данный эффект в сочетании с большим значением СР обеспечивает условия реализации аномального режима начала лазерной генерации, поскольку баланс между величиной оптического усиления и уровнем оптических потерь для мод высшего порядка достигается раньше, чем для фундаментальной моды.

Проявление аномального режима лазерной генерации является нежелательным явлением при практическом использовании ВИЛ в быстродействующих системах оптической связи, поскольку при этом ухудшается качество спектра выходного излучения, нарушается линейность зависимости выходной мощности и максимальной частоты эффективной модуляции от тока накачки. Результаты исследований показывают, что по мере уменьшения размеров токовой апертуры происходит переход к нормальному режиму лазерной генерации. Данный

факт вызван существенным перегревом активной области ВИЛ для приборов с маленькими апертурами, что уменьшает эффективное значение СР по сравнению с приборами больших размеров при одинаковом значении внешней температуры и соответственно ухудшает условия для начала генерации через моды высшего порядка до момента достижения баланса оптических потерь и усиления для фундаментальной моды. В качестве иллюстрации на рис. 2, а представлена зависимость максимальной частоты эффективной модуляции от тока накачки для ВИЛ № 2В с латеральным размером токовой апертуры около 5 мкм, демонстрирующая классический вид со скоростью нарастания ~ 6.5 ГГц/мА^{1/2} и максимальной частотой эффективной модуляции ~ 16.5 ГГц. При этом характер температурной зависимости порогового тока качественно не меняется, а величина порогового тока не превышает 1 мА во всем диапазоне рабочих температур (см. рис. 2, б).

Таким образом, величина спектральной расстройки максимума спектра усиления активной области на основе AlInGaAs-наногетероструктур относительно резонансной длины волны вертикального микрорезонатора существенно влияет на статические и динамические характеристики быстродействующих ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с двумя селективно-окисленными токовыми апертурами, для которых при определенных условиях (многомодовые приборы с величиной спектральной расстройки более 20 нм и относительно большими размерами токовой апертуры) наблюдается неклассическое поведение многомодовых лазеров. Оптимизация величины СР позволит одновременно обеспечить хорошую температурную стабильность и высокое быстродействие ВИЛ рассматриваемой конструкции.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 24 президиума РАН и гранта РФФИ 13-02-12142-офи_м.

Авторы выражают признательность компании Коннектор Оптикс (Санкт-Петербург) за предоставленные для исследований образцы быстродействующих VCSEL.

Список литературы

- [1] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (Wiley, N. Y., 1995).
- [2] A.N. Al-Omari, K.L. Lear. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 969 (2004).
- [3] K.L. Lear, A. Mar, K.D. Choquette, S.P. Kilcoyne, R.P. Schneider, jr., K.M. Geib. *Electron. Lett.*, **32**, 457 (1996).
- [4] P. Westbergh, R. Safaisini, E. Haglund, J.S. Gustavsson, A. Larsson, A. Joel. *Proc. SPIE*, **8639**, id. 86390X 6 p., DOI: 10.1117/12.2001497 (2013).
- [5] P. Westbergh. *High speed vertical cavity surface emitting lasers for short reach communication*, PhD thesis (Chalmers University of Technology, Göteborg, 2011).
- [6] VCSELs: *fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers*, ed. by R. Michalzik (Springer, 2013).

- [7] L.Ya. Karachinsky, S.A. Blokhin, I.I. Novikov, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, M.A. Bobrov, J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, J.-R. Krop, D. Bimberg. *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 065 010 (2013).
- [8] Y. Satuby, M. Orenstein. *IEEE J. Quant. Electron.*, **35**, 944 (1999).
- [9] C. Degen, I. Fischer, W. Elsässer, L. Fratta, P. Debernardi, G.P. Bava, M. Brunner, R. Hövel, M. Moser, K. Gulden. *Phys. Rev. A*, **63**, 023 817 (2001).
- [10] S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, J.A. Lott, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, A.G. Gladyshev, A.M. Nadochiy, E.V. Nikitina, V.G. Tikhomirov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov. *Proc. SPIE*, **8276**, Paper 8276–31 (2012).
- [11] G.R. Hadley. *Optics Lett.*, **20** (13), 1483 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of high-speed AlInGaAs VCSELs with large gain-cavity detuning

N.A. Maleev*, S.A. Blokhin*, M.A. Bobrov*,
A.G. Kuzmenkov⁺, A.A. Blokhin[•], P. Moser[≠],
J.A. Lott[≠], D. Bimberg[≠], V.M. Ustinov*

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

+ Submicron Heterostructures for Microelectronics,
Research & Engineering Center of the Russian
Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

• St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

≠ Technical University Berlin,
10623 Berlin, Germany

Abstract Impact of spectral detuning between AlInGaAs-based active region optical gain and resonance cavity mode on static and dynamic characteristics of high-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with double oxide current aperture was investigated. For devices with relatively large apertures (lateral size > 6 micron) and large gain-cavity detuning value (> 20 nm) anomalous start of lasing via high-order transverse modes with the subsequent switching to the lowest order modes at higher currents was observed. Simultaneous lasing via both types of transverse modes at intermediate pumping level resulted in non-classical dependence of modulation bandwidth on bias current. Increase of operating temperature as well as reduction of VCSEL aperture size resulted in classical multimode lasing behavior. Observed phenomena need to be considered at high-speed VCSELs optimization.