

## СРАВНЕНИЕ DBR-ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ОТ КОМПАНИИ PHOTODIGM С DFB-ЛАЗЕРАМИ

Д. Е. Спенсер, П. Янг, Photodigm

DFB- и DBR-лазеры имеют много общего: это, прежде всего, узкая спектральная линия и возможность настройки частоты. В отличие от DBR-лазера, структура которого выращивается за один шаг, в DFB-структуре решетка должна располагаться под слоем с высоким показателем преломления, выращенным поверх решетки. Разница в создании структур ведет к критическим отличиям между рабочими характеристиками лазеров.

### ВВЕДЕНИЕ

Серия высокоомощных лазерных диодов с выводом излучения вдоль структуры на распределенном брэгговском отражателе (DBR) от компании Photodigm основана на собственной технологии архитектуры DBR-лазеров и процессе выращивания эпитаксиальных слоев за один шаг. В структуре DBR-лазерного диода можно выделить область усиления и отдельную область DBR-решетки, которую наносят поверх гребенчатого волновода (рис. 1). С помощью такого дизайна компания Photodigm сумела занять позицию производителя самых высокоомощных одночастотных монокристаллических лазерных диодов в спектральной области от 740 до 1083 нм, выпускаемых серийно для применения в метрологии и спектроскопии. DBR-лазеры от Photodigm идеально подходят для применений, использующих одночастотное излучение высокой мощности в строго определенном спектральном диапазоне. Компания Photodigm продолжает работать вместе со своими заказчиками для того, чтобы и далее совершенствовать свою технологию и производить стабильные, надежные и точные источники излучения для применений в спектроскопии, атомной физике, нелинейной оптике и изготовлении волоконно-оптических усилителей.

DBR-лазеры были одними из первых одночастотных лазеров, первые шаги в создании и развитии которых были предприняты в 1970-е годы. В 1990-е годы компания SDL стала производить такие лазеры в промышленных масштабах для применения в исследованиях, требующих резо-

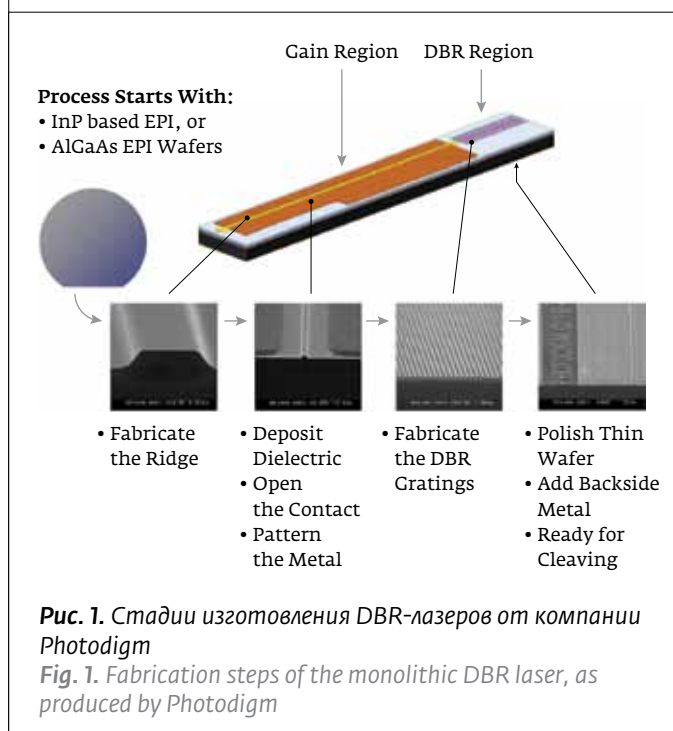
## CONTRASTING THE PHOTODIGM DBR LASER DIODE ARCHITECTURE WITH COMPETING DFB DESIGNS

J. E. Spencer, P. Young, Photodigm

DFB lasers and DBR lasers share many of the same characteristics of narrow linewidth and tunability. Whereas the DBR is fabricated on single growth epi, the DFB requires that the grating be buried under a high index layer, epitaxially regrown over the grating, in order to form the waveguide. This fabrication difference leads to critical distinctions between the operational characteristics of these two architectures.

### BACKGROUND

The Photodigm family of high-power edge-emitting Distributed Bragg Reflector (DBR) laser diodes are based on Photodigm's proprietary single epi growth, DBR laser architecture. The Photodigm DBR laser architecture consists of a gain region and a separate DBR grating region, monolithically fabricated over a continuous ridge waveguide, as shown in Figure 1. With this design, Photodigm has produced the world's highest power commercially available, single-frequency, monolithic laser



нанса с атомными переходами на 780, 852 и 1083 нм. Бум телекоммуникационных технологий в поздние 90-е и ранние 2000-е годы вынудил производителей лазеров сфокусировать свое внимание на их возможности удовлетворить нарастающие аппетиты в области телекоммуникаций. Требования в использовании лазеров с низкой мощностью для спектрального уплотнения каналов были встречены только с началом применения лазеров с распределенной обратной связью (DFB). При этом DBR-лазеры для метрологии практически исчезли с рынка к началу 2000-х годов. Более того, лазеры на 1300 и 1550 нм, необходимые для телекоммуникационных технологий, изготавливались из фосфида индия (InP) – материала, который имеет более подходящий состав для изготовления DFB-структур.

В 2002 году некоторые из производителей шагнули вперед, создавая DFB-лазеры, успешно используемые в области телекоммуникаций. При этом типично для DFB-лазеров их устройства имели сравнительно низкую мощность. Лазеры на основе арсенида алюминия-галлия (AlGaAs), например, отличались сложным процессом изготовления полупроводниковой структуры и проявляли низкую надежность в работе, когда дело касалось применения в контрольно-измерительных приборах и работы на бóльшей оптической мощности.

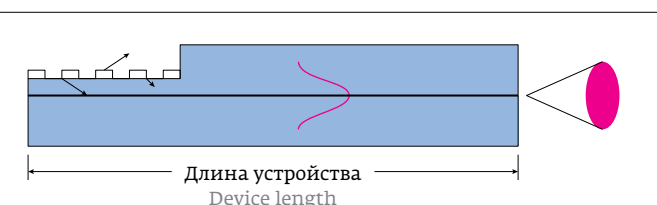
В 2007 году компания Photodigm представила свою линейку DBR-лазеров, в основе производства которых лежит технология выращивания эпитаксиальных структур за один шаг. Эти лазеры стали прямыми конкурентами DFB-лазеров в спектральной области от 780 до 1083 нм. Целью компании было создание продукта, который бы работал на более высоких мощностях и с более высокой надежностью, чем DFB-лазеры. Была также и другая цель – создание технологии, которая позволит легко выйти на промышленные масштабы в производстве DBR-лазеров. Более высокая производительность и надежность DBR-лазеров от Photodigm дала им существенное преимущество по отношению к DFB-лазерам. Это привело к тому, что имя компании стало широко известно в области создания лазерных источников для применения в атомных ловушках, метрологии, создании контрольно-измерительных приборов, которые требуют высокой мощности, стабильности оптического излучения и возможности фиксации излучения на одной конкретной частоте.

diodes for instrumentation, metrology, and spectroscopy in the wavelength region 740 to 1083 nm. Over the years, Photodigm DBR lasers have proven themselves to be ideally suited for applications requiring high-power single-frequency performance within a well-defined operating range. Photodigm has worked with its customers to develop a family of products unmatched in the industry, optimized for stability, reliability, and power for precision applications in spectroscopy, atomic physics, non-linear optics, and fiber amplifiers.

DBR lasers were among the first single frequency lasers, with development beginning in the 1970's. They were commercially produced by SDL in the 1990's for research applications requiring resonance with atomic transitions at 780, 852, and 1083 nm. The telecom boom in the late 1990's to early 2000's forced laser manufacturers to focus their capacity to meet the explosive demand in telecom applications. The needs of low power signal lasers for wavelength division multiplexing were best met by distributed feedback lasers, and DBR lasers for instrumentation and metrology disappeared from the market by the early 2000's. Furthermore the 1300 and 1550 nm lasers required for telecom were produced from InP, which has a favorable processing chemistry for DFB fabrication.

Several manufacturers stepped in to fill the SDL void by 2002, using the DFB architecture so successful in telecom. Characteristic of DFB lasers, these devices had relatively low power. Characteristic of AlGaAs lasers, they had a difficult processing chemistry, and they experienced poor reliability when operated at the higher power required in instrumentation.

Photodigm introduced its product line based on its single epi growth DBR architecture in 2007, directly competing with DFB lasers in the 780 to 1083 nm band. The goal of this new product was to offer a product that could operate at higher power and with better reliability than the DFB, while at the same time offering a production pathway that offered improved manufacturing scalability through single growth epi. Photodigm's DBR lasers offered a distinct technology choice for users of instrumentation lasers in the near IR



**Рис. 2.** Диаграмма поперечного сечения структуры DBR-лазера

**Fig. 2.** Cross sectional diagram of DBR laser showing main features of the device



## DBR-ЛАЗЕР ОТ КОМПАНИИ PHOTODIGM

Создание DBR-лазера от Photodigm начиналось с выращивания эпитаксиальных слоев на GaAs-подложке. Инженеры компании Photodigm создали эпитаксиальную структуру, используя оригинальное программное обеспечение, разработанное для внутреннего использования. Эпитаксиальная структура состоит из одной или нескольких высокопреломляющих квантовых ям, окруженных слоями с низким коэффициентом преломления, которые будут формировать волновод. Далее, следом за выращиванием эпитаксиального слоя, создается лазерная структура с особенностями поверхностного рельефа, образующими монолитный одномодовый гребенчатый волновод, который располагается вдоль всей длины устройства. Резонатор лазера состоит из активной области усиления, возбуждаемой электрическим зарядом, и пассивной DBR-области, располагающихся на волноводной гребенчатой структуре. Область усиления вытравлена до необходимой глубины для генерации одночастотного излучения при инжекции электрического заряда в квантовую яму. Пассивная DBR-область – это Брэгговское зеркало с селекцией по длине волны, которое обеспечивает обратную связь в узкой спектральной области. При наложении полосы отражательной способности DBR и области усиления эпитаксиальной структуры, DBR-зеркало выделяет одну продольную моду с самым высоким значением усиления, получая при этом высокостабильное лазерное излучение на определенной длине волны. На одном конце объемный резонатор определяется высокоотражающим DBR-зеркалом и пассивированной склотовой выходной гранью с антиотражающим (AR) покрытием на другом конце. Выходная грань с AR-покрытием служит для вывода дифракционно-ограниченного излучения.

Характерной особенностью такого устройства лазера является поверхностная дифракционная решетка, которая вытравлена в полупроводниковом поверхностном слое над квантовыми ямами в пассивной области гребенчатого волновода. Однако волноводная мода сильно связана с DBR. Она периодически отражается на резонансной длине волны решетки. Не резонирующие с DBR продольные моды не испытывают обратную связь и теряются. DBR-зеркало состоит из чередующихся слоев материалов с высоким и низким коэффициентами преломления. В DBR, изготовленной методом травления, материал с высоким коэффициентом преломления является зубьями решетки, а пространства между ними заполнены диэлек-

band. Users soon came to value the higher performance and better reliability of the DBR laser over the DFB laser, with the result that Photodigm DBR lasers are now recognized as the standard of performance for applications such as atom trapping, metrology, and instrumentation, which require high power, narrow linewidth, high reliability, and the ability to lock and remain locked to a specific frequency.

## THE PHOTODIGM DBR LASER

The Photodigm DBR laser starts on a GaAs wafer with multiple epitaxial layers grown in a single growth. Photodigm engineers design the epi using proprietary software and backed by many years of laser design experience. The epi consist of one or more high refractive index quantum wells surrounded by low index cladding layers that will form a waveguide. Following the precision growth of the epi, the laser structure is fabricated with surface features that define a monolithic, single mode index-guided ridge waveguide that runs the entire length of the device. The laser resonator consists of an electrically pumped gain ridge region and a passive DBR ridge region. The gain ridge is designed and etched to a precise depth to operate in a single spatial lasing mode by current injection into the quantum well. The separate DBR region is a wavelength selective Bragg mirror that provides feedback within a narrow spectral bandwidth. By overlapping the reflectivity of the DBR with the gain bandwidth of the epi, the DBR mirror will select the single longitudinal mode with the highest gain, producing a highly stable beam at a precise wavelength. The resonant cavity is defined by the highly reflective DBR mirror on one end, and a cleaved exit facet passivated and anti-reflectivity (AR) coated on the other end. The AR coated exit facet serves as the outcoupler for the diffraction-limited beam.

A characteristic of this design is the surface grating, which is etched into the semiconductor cladding layer above the quantum wells in the passive region of the ridge waveguide. However, the waveguide mode is strongly coupled to the DBR. The mode is periodically reflected at the resonant wavelength of the grating. Longitudinal modes not resonant with the DBR do not experience feedback and are lost. A DBR mirror consists of alternating layers of high and low index materials. In an etched DBR, the grating teeth are the high index material, and the low index grating spaces are filled with low index dielectric. The Photodigm DBR may have as many as 2000 grating teeth over a 500 micron long DBR mirror. The high index contrast of the grating structure results in a resonant reflectivity of the Bragg mirror that can exceed 90%.

## THE DFB LASER

A competing architecture exists to produce a single frequency laser diode, known as the distributed feedback,

триком с низким коэффициентом преломления. DBR-структура от Photodigm может иметь до 2000 зубьев решетки на DBR-зеркале размером 500 мкм. Высокий контраст в коэффициентах преломления становится результатом резонансной отражательной способности Брэгговского зеркала, которая может превышать 90%.

### DFB-ЛАЗЕР

DFB-лазер и DBR-лазер имеют много общего: это, прежде всего, узкая спектральная линия и возможность настройки частоты. В то время как DBR-лазеры имеют Брэгговский отражатель, расположенный отдельно от области усиления, DFB-лазеры имеют структуру с обратной связью, которая состоит из слабоотражающего Брэгговского отражателя с низким контрастом, распределенного вдоль всей длины гребенчатого волновода в области усиления. Отсюда и происходит название лазера с распределенной обратной связью. В отличие от DBR-лазера, структура которого выращивается за один шаг, в DFB-структуре решетка должна располагаться под слоем с высоким показателем преломления, эпитаксиально выращенным поверх решетки для формирования волновода (рис. 3). Разница в создании структур ведет к критическим отличиям между рабочими характеристиками лазеров.

Эпитаксиальный слой DFB-лазера начинается со структуры квантовых ям с высоким коэффициентом преломления, расположенной между двумя слоями с низким коэффициентом преломления. Область усиления в волноводе создается вдоль всей длины лазерной структуры при травлении верхнего слоя. Область решетки создается схожим образом вдоль всей области усиления. Для того чтобы локализовать моду и получить желаемый отклик решетки, слой с низким показателем преломления должен быть выращен поверх слоя с вытравленной в нем решеткой. Также выращивается сильнолегированный верхний защитный слой для ввода тока. Основная черта DFB-лазера – это скрытая дифракционная решетка в глубине структуры.

Учитывая, что DFB-лазер создается для получения обратной связи вдоль всей области усиления, необходимости в использовании торцевых зеркал нет. Однако в случае идеальной симметрии, противоположные отражения на Брэгговской длине волны находятся в антирезонансе, и генерация лазерного излучения не происходит на Брэгговской длине волны. Вместо этого образуются две эквидистантные моды и генерируется излучение около Брэгговской длины волны. Для того чтобы

or DFB, laser. DFB lasers and DBR lasers share many of the same characteristics of narrow linewidth and tunability. Whereas DBRs have a Bragg reflector separated from the gain region, DFB lasers have a feedback structure consisting of a low-contrast, weakly reflecting Bragg reflector distributed along the entire length of the gain ridge, hence the name distributed feedback laser. Whereas the DBR is fabricated on single growth epi, the DFB requires that the grating be buried under a high index layer, epitaxially regrown over the grating, in order to form the waveguide. See Figure 3. This fabrication difference leads to critical distinctions between the operational characteristics of these two architectures.

The DFB epi begins as a high index quantum well structure between two low index cladding layers. The gain ridge is fabricated all along the length of the laser structure by etching the upper cladding. The grating region is similarly fabricated along the entire length of the gain region. In order to confine the mode and produce the desired feedback response of the grating, a lower index cladding layer must be epitaxially regrown over etched cladding layer. Also regrown is a highly doped cap layer for current injection. The characteristic of the DFB is the buried grating.

Because the DFB laser is designed to experience feedback all along the gain ridge, no end mirrors are needed. However, in the perfectly symmetric case, opposing reflections at the Bragg wavelength are anti-resonant, or destructive, and lasing does not occur at the Bragg wavelength. However two modes equally spaced and around the Bragg wavelength are produced, the difference between the two modes being known as the stop band. To achieve single longitudinal mode performance, the laser is fabricated to destroy symmetry. This is typically done by having an anti-reflective coating on one end, which favors one mode over the other, and the laser operates on the favored mode.

### THE DIFFERENCES BETWEEN DBR LASERS AND DFB LASERS

The distinguishing difference between the two architectures is the location of the grating within the epitaxial structure. The DBR uses a high index contrast, high reflectivity surface

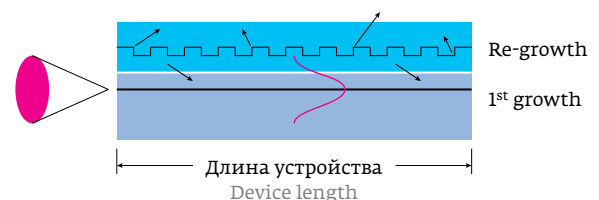


Рис. 3. Диаграмма поперечного сечения структуры DFB-лазера  
Fig.3. Schematic drawing of the DFB laser architecture



получить одиночную продольную моду, лазер создается с нарушением симметрии. Оно достигается с помощью антиотражающего покрытия на одном конце, которое выбирает одну из двух мод, на ней и работает лазер.

### РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ DBR И DFB-ЛАЗЕРАМИ

Главное отличие между двумя лазерами – это расположение решетки в эпитаксиальной структуре. DBR-лазер использует высокоотражающую поверхностную дифракционную решетку, DFB-лазер имеет скрытую дифракционную решетку в глубине структуры с низкой отражательной способностью. Изготовление лазеров этих типов начинается с тщательного изготовления подложки с эпитаксиальным слоем, которое опирается на сложные техники изготовления полупроводниковых структур методами травления, литографии и химического осаждения из газовой фазы. Однако после изготовления гребенчатого волновода и дифракционной структуры, для изготовления DFB-лазерной структуры необходимо сделать еще один шаг дальнейшего выращивания эпитаксиальной структуры для получения решетки с распределенной обратной связью с низким показателем преломления.

Процесс вторичного роста в GaAs/AlGaAs материалах для лазерных диодов между 740 нм и 1083 нм достаточно сложен. Al и GaAs способны реагировать с кислородом. Эпитаксиальный поверхностный слой подвергается атмосферному окислению и контаминации в процессе создания DFB-лазера во время первого и второго шагов выращивания структуры. Влияние этих явлений на производительность лазера было тщательно исследовано в институте Пауля Друде в Германии в 2001 году [1]. Они обнаружили увеличение внутренних потерь в результате вторичного роста структуры примерно в 2 раза в устройствах на квантовых ямах из GaAs (822 нм) и InGaAs (986 нм). Коэффициент усиления лазеров на AlGaAs также падал в два раза, а для лазеров на InGaAs увеличивался. Увеличение в коэффициенте усиления в устройствах на 986 нм было связано с последующим шагом терморелаксации, который не имел никакого влияния на устройства на 822 нм. Исследователи заключили, что низкая производительность устройств, изготавливаемых с шагом вторичного роста эпитаксиальной структуры, связана с остаточной контаминацией во вторичных структурах, которая создает дефектные состояния. Эти состояния могут вести себя как безызлучательные центры рекомбинации. Более низкая концентрация дефектов в структуре DBR-лазеров становится результатом более высокой

grating. The DFB uses a low index contrast, low reflectivity buried grating. Both architectures begin with carefully designed epitaxial wafers. Both rely on sophisticated semiconductor fabrication techniques of etching, lithography, and chemical vapor deposition. However, following the precise fabrication of the ridge waveguide and grating structure, the DFB must undergo a further epitaxial regrowth step to produce the low index contrast distributed feedback grating prior to metallization. By contrast, the DBR is finished with a simple CVD dielectric to encapsulate the device and prepare it for metallization.

Regrowth in the GaAs/AlGaAs materials system used for laser diodes between 740 nm and 1083 nm is a difficult process. Al and GaAs are reactive with oxygen. In DFB fabrication, the epi surface is exposed to atmospheric oxidation and contamination during ridge and grating processing between the first and second growth steps. The effect on device performance was studied in detail on broad area lasers by researchers at the Paul Drude Institute and reported in a 2001 paper (1). They found an increase in the internal losses by a factor of approximately 2 in both GaAs (822 nm) and InGaAs (986 nm) quantum well devices as a result of the regrowth. The gain coefficient of the AlGaAs lasers also dropped by a factor of 2, while it increased for the InGaAs lasers. The increase in the gain coefficient in the 986 nm devices was attributed to a subsequent annealing step, which had no effect on the 822 nm devices. These researchers concluded that the lower performance in the regrown devices was due to the fact that residual contamination of the regrown interface forms defect states what act as non-radiative recombination centers. Lower defect levels in the regrowth-free DBR laser results in higher powers and improved reliability when compared to DFB lasers. Photodigm DBR lasers typically have lower threshold currents, higher slope efficiencies, and rated power levels two to three times higher than competing DFBs at the same wavelength. Multiple users have reported narrower linewidths for DBR lasers as compared to DFB lasers. While studies have not been performed to determine why this is the case, Photodigm believes that this is due to defects in the epi that arise from regrowth. Cavity length, operating power, and fabrication details may also result in higher noise in DFBs over DBRs.

The regrowth problem has led to significant efforts to fabricate DFB lasers that do not require regrowth. DFB lasers using lateral gratings over the ridge waveguide have been proposed (2) and are commercially available, but to date, they have only been shown to deliver low power levels (<25 mW), and thus are not competitive with DBR lasers in the near IR band.

Another major difference between the two architectures relates to mode selection. As fabricated, the DBR laser operates only at the single longitudinal mode that has the

мощности излучения и увеличивает надежность по сравнению с DFB-лазерами.

Типичные DBR-лазеры от Photodigm имеют более низкий пороговый ток и уровни номинальной мощности, в три раза превышающие мощности DFB-лазеров на одной и той же длине волны. Большое количество пользователей подтвердили, что у DBR-лазеров более узкая спектральная ширина по сравнению с DFB-лазерами. Компания Photodigm уверена, что причиной этому дефекты в эпитаксиальной структуре, которые появляются в результате процесса вторичного роста.

Проблемы, возникающие из-за процесса вторичного роста эпитаксиальной структуры, привели к многочисленным попыткам создавать DFB-лазеры без этого шага. Были предложены DFB-лазеры, использующие боковые горизонтальные решетки вместо гребенчатых волноводов [2]. Они стали доступны на рынке, но до сегодняшнего времени, продолжают работать только на мощностях до 25 мВт и поэтому не способны конкурировать с DBR-лазерами в ближней ИК-области.

Другим существенным различием между двумя лазерными структурами является селекция мод. DBR-лазер работает только на одиночной продольной моде, которая обладает наивысшим уровнем усиления в области наложения кривой отражательной способности Брэгговского отражателя и полосы усиления эпитаксиальной структуры. Когда ток проходит через область усиления волновода, тот испытывает нагрев, приводящий к последующему сдвигу красной области полосы усиления. Пассивная DBR-область устройства имеет фиксированную спектральную отражательную способность. Так как работа лазера настраивается с помощью изменения тока или температуры, длина волны моды генерируемого лазерного излучения будет монотонно меняться, если кривая усиления эпитаксиальной структуры сдвинется. Однако спектральная отражательная способность DBR-решетки не меняется, так как ток не течет через нее. Во время сдвига моды генерируемого лазерного излучения она сдвигается к части DBR с более низкой отражательной способностью. В итоге, другая мода выбирается с помощью DBR-зеркала, и эта новая мода будет усиливаться. Таким образом, настройка длины волны является детерминированной и предсказуемой.

DFB-лазер работает на двух эквидистантных модах около Брэгговской длины волны решетки. Для того чтобы лазер работал на одной моде, необходимо, как уже говорилось ранее, убрать симметрию. Это достигается, как правило, с помощью антиотражающего покрытия, наносимого на

highest gain within the overlap of the reflectivity curve of the Bragg reflector and the gain bandwidth of the epi. As current is passed through the gain ridge, the gain ridge will experience heating with a consequent red shift of the gain bandwidth. The DBR region, being passive, remains with fixed spectral reflectivity. As the laser is tuned by varying current or temperature, the wavelength of the lasing mode will monotonically change as the gain curve of the epi shifts. However, the spectral reflectivity of the DBR grating does not change, since no current flows through it. As the lasing mode shifts, it moves to a lower reflectivity part of the DBR. Eventually, another mode becomes favored by the DBR mirror, and this new mode will grab the gain. The laser will hop to the new mode and retrace the tuning curve. Away from the discontinuity of the mode hop, the wavelength tuning is deterministic and predictive.

As fabricated, the DFB laser operates with two modes, each equally spaced from the Bragg wavelength of the grating. This is not useful. To achieve single mode operation, symmetry must be destroyed, usually by an AR coating on one facet. The spectral gap around the missing mode is known as the "stop band," where the laser will not operate. Because the grating and the gain region both experience heating due to increasing current injection, both will tune monotonically without a mode hop for a long range. Eventually, however the gain is reduced sufficiently that the laser becomes unstable, and a new mode appears. The initial laser conditions, consisting of a finely tuned combination of antisymmetry, facet reflectivity, epi gain bandwidth and grating bandwidth are no present. The laser will mode hop across the stop band, resulting in a spectral exclusion zone.

Users of DFB and DBR lasers will experience significantly different behaviors during laser operation. With increasing current, a DBR will tune monotonically with approximately a 0.002 nm/mA characteristic slope. On reaching a mode hop, the DBR laser will predictably blue shift and retrace the normally occurring red shift. Typically mode hops occur with a free spectral bandwidth of to 0.15 nm, depending of the specific device. See Figure 4 for a typical tuning curve of a DBR, showing the deterministic mode hop behavior. The DFB will tune monotonically with a similar characteristic slope. However, due to the concurrent shift of the epi and the grating reflectivity, the free spectral range of the DFB will be much higher than the DBR. This can be 2-3 nm for the DFB as it red shifts across its operating range. The mode hop free tunability in a DFB is generally higher than in a DBR, and this is often cited as a clear advantage of the DFB over the DBR. However, when it occurs it is not deterministic, and it does so in such a manner that it leaves a gap in the tuning range. As a result of this behavior, DFB lasers as produced are often heavily "binned" as to mode hope behavior, and the end user is offered multiple

одном из торцов. Спектральное окно вокруг пропавшей моды называется полосой затухания, на этой полосе лазер не будет излучать. Учитывая, что область решетки и область усиления испытывают нагрев из-за инжекции заряда, обе эти области будут монотонно настраиваться без скачка в моде на большом диапазоне. В итоге с уменьшением усиления лазер становится нестабильным, и появляется новая мода.

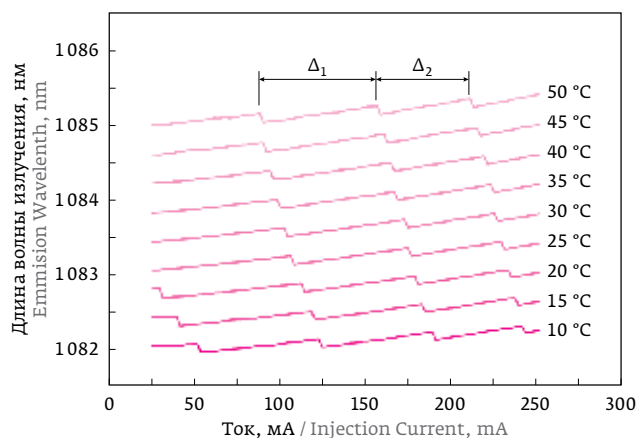
Пользователи DFB-и DBR-лазеров получают заметное различие в поведении выходных характеристик во время работы лазеров. С увеличением тока DBR-лазер будет перестраиваться монотонно с примерным наклоном характеристики в 0,002 нм/мА. Как правило, скачок в моде происходит при области дисперсии до 0,15 нм, в зависимости от устройства. На рис. 4 показана типичная кривая перестройки DBR-лазера. Видно, детерминированное поведение скачка моды. DFB-лазер перестраивается с похожей характеристикой. Если учесть отражательную способность решетки и сопутствующий сдвиг эпитаксиальной структуры, то область дисперсии DFB-лазера будет намного выше, чем у DBR-лазера. Это может быть 2-3 нм для DFB-лазера при сдвиге в красную область. Как правило, настройка скачка моды в DFB-лазерах выше, чем в DBR-лазерах, что часто считают за преимущество одних перед другими. Но, когда происходит скачок, то для DFB-лазеров он не является детерминированным. И при этом в диапазоне перестройки остается провал. В результате такого поведения, производители DFB-лазеров зачастую предлагают выбрать вариант лазера с заранее известным поведением скачка моды.

Высокие плотности тока в лазерных диодах, превышающие несколько А/см<sup>2</sup>, вызывают старение материала области усиления. Со старением материала происходит увеличение тока, а это ведет к сдвигу в красную область кривой усиления. Так как решетка DBR-лазера изготавливается в пассивной области гребенчатого волновода, спектр отражательной способности DBR остается фиксированным. Когда полоса усиления эпитаксиальной структуры сдвигается значительно в красную область, и мода, генерируемая лазером, не является больше модой с самым высоким усилением, происходят изменения. В результате новая мода на более короткой длине волны подхватывает усиление и становится генерирующей модой. Лазер испытывает скачок моды в голубую коротковолновую область спектра, который возвращает длину волны предыдущей моды, обеспечивая непрерывную перестройку в определенном диапазоне. Этот

"variants." These variants are selected for specific mode hop behavior.

This non-deterministic mode hop behavior relates to what Photodigm calls the "fatal mode hop" often encountered with seemingly well-behaved DFB lasers used in applications requiring locking to a specific wavelength, as in rubidium resonance. High current densities in laser diodes, exceeding several thousand amps/cm<sup>2</sup>, cause aging of the gain medium. As the gain medium ages, the current increases, which leads to a red shift of the gain curve. Because the grating in a DBR laser is fabricated in the passive region of the ridge waveguide, the reflectivity spectrum of the DBR remains fixed. When the gain bandwidth of the epi red-shifts sufficiently so that the lasing mode is no longer the highest gain mode, a new, shorter wavelength mode will grab gain and become the lasing mode. The laser experiences a blue shift mode hop that will retrace the wavelength of the previous mode, providing continuous tunability within a well defined range. The actual range will depend on multiple design and fabrication characteristics.

The DFB follows a different path. Because current flows through both the grating and the quantum wells, both age at similar rates, red shifting as they age. Because the reflectivity bandwidth of the grating is less than the gain bandwidth of the epi, eventually the grating reflectivity



**Рис. 4.** Типичная кривая перестройки DBR-лазера от компании Photodigm: С увеличением тока и последующим нагревом устройства, длина волны излучения лазера сдвигается в красную область спектра. В итоге, мода с большим усилением сдвигается в коротковолновую область спектра. Как следствие, настройка длины частоты лазера является детерминированной  
**Fig. 4.** Typical tuning curve of a Photodigm DBR laser. With increasing current, the wavelength of the laser red shifts as the device heats up. Eventually a blue shift occurs to a higher gain mode. As a result the tuning is deterministic, and a specific wavelength can also be achieved

диапазон будет зависеть от конкретного дизайна устройства и процесса его изготовления.

В DFB-лазерах ток течет одновременно через решетку и квантовые ямы. Поэтому они стареют с одинаковой скоростью, при этом происходит сдвиг в красную длинноволновую область. Учитывая, что полоса отражательной способности решетки меньше, чем полоса усиления эпитаксиальной структуры, к определенному времени отражательная способность решетки падает до такой степени, что мода лазерной генерации перестает оставаться модой с наибольшим усилением. К сожалению, пока не найден механизм для того, чтобы вернуть генерацию лазерного излучения на более короткие длины волн. Происходит скачок в моде через полосу затухания до более длинной волны излучения, в результате чего появляется некая дискретность в диапазоне перестройки лазера [3] (рис 5). Когда, например, резонансная линия рубидия попадает в этот провал в перестройке длины волны, лазер начинает работать неэффективно.

### КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

DFB- и DBR-лазеры являются на данный момент наиболее распространенными типами высоко-мощных одночастотных полупроводниковых лазеров. Оба типа предлагают высокую эффективность работы и выдающуюся стабильность частоты, благодаря чему они находят широкое применение в метрологии. Невзирая на большое количество сходств, структуры DFB- и DBR-лазеров значительно отличаются между собой, что влияет на их качество работы в различных научных приложениях.

За последнее время DBR-лазеры от Photodigm продемонстрировали отличные рабочие характеристики, особенно в приложениях, требующих использования одночастотного излучения высокой мощности в строго определенном спектральном диапазоне. Отличительная черта в структуре DBR-лазеров, созданных в компании Photodigm, – отдельная пассивная область DBR. Это определило успех и преимущество DBR-лазеров компании Photodigm над DFB-лазерами.

### ЛИТЕРАТУРА

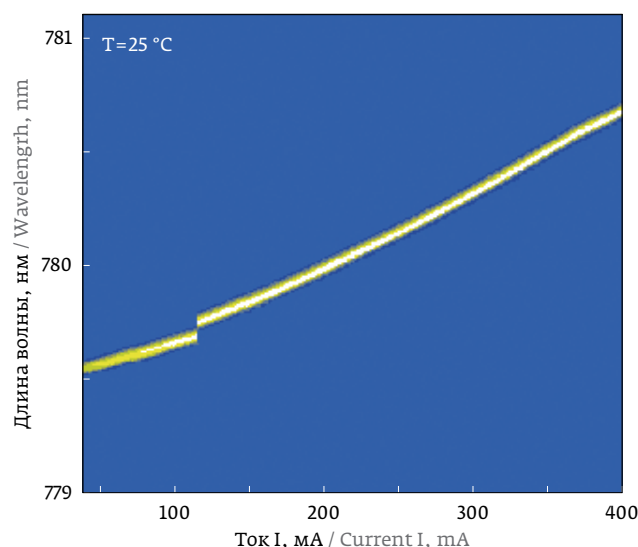
1. Wassermeier M., Hey R., Horicke M., Wiebicke E. – *Semicond. Sci. Technol.* 16: L40-L43.
2. Tiberio R., Chapman P.F. – *Electronics Letters*, 1994, v.30, v.1058–1060.
3. Klehr A., Wenzel H., Brox O., Erbert G., Nguyen T-P., Trankle G. High power DFB-lasers for D1 and D2 rubidium absorption spectroscopy and atomic clocks. – *Proc. of SPIE*, 2009, 7230: 723011-1-8. doi:10.1117/12.805858.

falls so that the lasing mode is no longer the highest gain mode. However, there is no mechanism to bring back lasing at a shorter wavelength. The laser mode hops across the stop band to a longer wavelength, leaving a discontinuity in the tunable range of the laser (3). See Figure 5. When, for example, the rubidium resonance line falls within that tunability gap, the laser has reached its effective end of life, a victim of the "fatal mode hop."

### SUMMARY

DFB and DBR laser are the two most common forms of high power single frequency semiconductor lasers in use for scientific instruments today. They both offer high efficiency and remarkable spectral purity, thus enabling many metrologic instruments. Despite their many similarities, the two architectures exhibit distinct behaviors that impact how they will perform in specific applications.

Photodigm DBR lasers have been shown in multiple applications to provide high power, high reliability, low noise, low linewidth, and stable operating characteristics for long lifetimes. The single growth epi and separate passive DBR region, which distinguish Photodigm DBR lasers from competitive DFB lasers, are the primary reasons for their success.



**Рис. 5.** Типичная кривая перестройки DFB-лазера: с увеличением тока и последующим нагревом устройства, длина волны излучения лазера сдвигается в красную область спектра. В итоге мода с большим усилением сдвигается в красную область спектра, оставляя провал в диапазоне перестройки лазера [3]

**Fig. 5.** Typical tuning curve of a DFB laser. With increasing current, the wavelength of the laser red shifts as the device heats up. Eventually a red shift occurs to a higher gain mode, leaving a gap in the tuning range. This is a fatal mode hop if the desired wavelength exists within the gap [3]