



ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО СВИПИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЛИЗКИХ К ИДЕАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ*

Ш. Лефлер, Keysight Technologies, Inc.**

Перестраиваемые источники лазерного излучения, используемые для измерения параметров оптоэлектронных компонентов оптических сетей, имеют мало общего с перестраиваемыми передатчиками, которые используются в настоящее время для изменения конфигурации оптических сетей. Эта небольшая статья рассматривает проблемы разработки лазерных источников с возможностью свипирования для измерения спектрального ослабления оптических фильтров.

Концепция использования плотного мультиплексирования с разделением по длине волны (DWDM) в коммуникационных оптоволоконных сетях начала применяться с появлением оптических усилителей. Обладая способностью усиливать все длины волн одновременно, усилители устранили потребность в предварительном демультиплексировании и последующем преобразовании каждого канала в электрический сигнал, регенерации сигнала, преобразовании его обратно в оптический сигнал и, наконец, в мультиплексировании всех каналов в один волоконно-оптический кабель.

* Напечатано с разрешения NASA Tech Briefs, v 39, № 9, p. 68-72.

** Keysight Technologies, Inc. – ранее Группа электронных измерений Agilent Technologies.

A WIDE-BAND TUNABLE LASER FOR HIGHLY ACCURATE CONTINUOUS SWEEPS THE CHALLENGE OF DESIGNING A NEARLY IDEAL STIMULUS FOR OPTICAL FILTER MEASUREMENTS

S. Loeffler, Keysight Technologies, Inc.*

Tunable laser sources that are used to characterize photonic components for fiber optic networks have little in common with the tunable transmitters that make today's fiber optic networks reconfigurable. This tech brief discusses the particular challenges of developing a swept source for spectral attenuation measurements of optical filters.

The concept of dense wavelength division multiplexing (DWDM) in fiber optic communication networks gained traction when optical amplifiers became available. Able to amplify an entire wavelength grid at once, they removed the need to first de-multiplex, then convert every channel to an electrical signal, regenerate it, convert it back to an optical signal, and finally multiplex all channels onto a single optical fiber.

Tunable transmitters offered relief to maintenance groups and manufacturing planners dealing with up to 80 different flavors of transmitters: a single transmitter type, programmable to the required channel wavelength at the time of installation, was sufficient to form a DWDM transmission system. Moreover, it could be reprogrammed later – a first step towards reconfigurable add-drop multiplexers.

Tunable laser sources for test and measurement use came into high demand at the massive deployment of DWDM transmission systems. Every multiplexer and demultiplexer had to be validated for its crosstalk isolation, channel wavelengths, bandwidths, uniformity, and polarization dependence. Soon, these tests became limiting to the production capacity of optical component manufacturers, until the first

* Keysight Technologies Inc., formerly Agilent Technologies electronic measurement business.

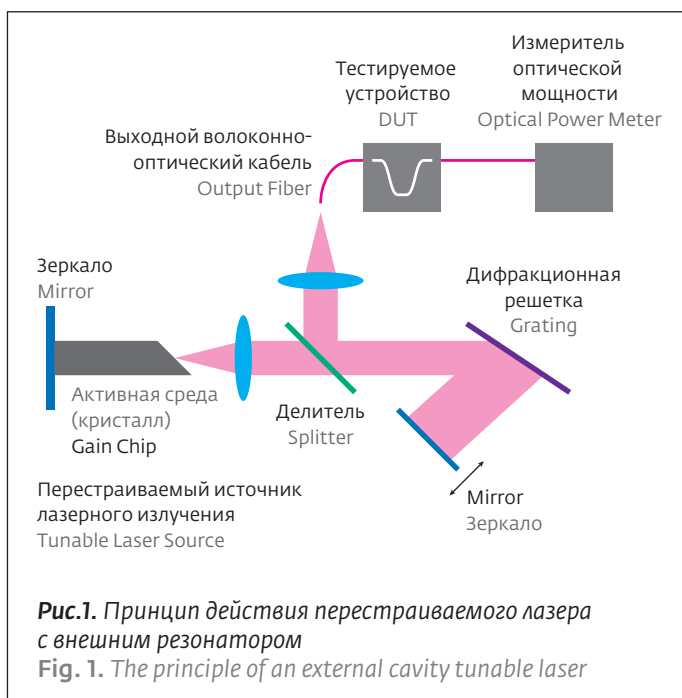
Перестраиваемые передатчики облегчают работу групп технического обслуживания и плановых отделов на производстве, которым приходится сталкиваться с передатчиками, имеющими около 80 разновидностей. Для построения системы передачи DWDM вполне достаточно иметь один передатчик, программируемый в момент установки на нужную длину волны. Кроме того, позже его можно перепрограммировать, а это первый шаг на пути создания перестраиваемых мультиплексоров ввода-вывода.

Массовая потребность в измерительных перестраиваемых источниках лазерного излучения возникла с началом широкого распространения систем передачи DWDM. В каждом мультиплексоре и демультимплексоре надо измерять подавление перекрестных помех, длины волн каналов, полосы пропускания, равномерность и зависимость от поляризации. Очень быстро эти тесты превратились в фактор, ограничивающий производство оптических компонентов. Но позже появились первые перестраиваемые свипирующие лазеры, которые подняли производительность достаточно высоко, чтобы удовлетворить потребность телекоммуникационной индустрии в широкополосном оборудовании.

Такие лазеры в сочетании с несколькими измерителями мощности могут одновременно тестировать все порты демультимплексора за одно свипирование по длине волны. Если нужно, контроллер поляризации добавляет возможность измерения зависимости потерь, длины волны и смещения моды TE/TM планарных устройств от поляризации.

Возникает вопрос – разве не может перестраиваемый передатчик (TTL), стоимость которого гораздо меньше, чем стоимость настольного лабораторного перестраиваемого лазера, справиться с этой работой? Начнем с того, что к измерительным перестраиваемым лазерам применяются совершенно иные критерии оптимизации по сравнению с перестраиваемыми передающими лазерами. Давайте рассмотрим общую схему перестраиваемого лазера, показанную на рис.1.

Как и все лазеры, перестраиваемый лазер состоит из активной среды и резонатора, в качестве которого чаще всего используется внешний резонатор. Настройка выполняется путем изменения состояния резонатора. Наш пример демонстрирует широко распространенную конструкцию Литтмана-Меткальфа [см. лит-ру], в которой длина резонатора и угол дифракции



sweeping tunable lasers boosted production capacity far enough to satisfy the telecom industry's hunger for bandwidth.

Combined with multiple power meters, such lasers test all de-multiplexer ports at a time in one wavelength sweep. If required, a polarization controller adds the capability to measure polarization dependent loss, wavelength and TE/TM mode shift of planar devices.

But wait – couldn't tunable transmitter lasers (TTL) do the job at a much lower price than desktop tunable lasers?

Well, tunable lasers for test and measurement purposes follow different optimization criteria than tunable transmitter lasers. Let us take a quick look at the generic tunable laser design shown in Figure 1.

Like every laser, tunable lasers consist of a gain medium and a resonator, most often an external cavity. They are tuned by changing the cavity's resonance condition. Our example shows the widely used Littman-Metcalf configuration [1], where the resonator length and the diffraction angle of the grating are tuned by rotating the mirror around the Pivot point such that there are no phase jumps in the resulting output light. A fraction of the optical power leaves the cavity through a beam splitter and is collimated into an optical fiber which connects to the device under test (DUT). Like TTLs, most tunable lasers are equipped with polarization maintaining fiber (PMF) that ensures a well-defined state of polarization. A keyed optical connector and PMF come

решетки настраиваются путем поворота зеркала так, чтобы не было фазовых скачков в результирующем выходном луче. Часть оптической мощности выходит из резонатора через делитель луча и коллимируется в оптоволоконный кабель, подключенный к тестируемому устройству. Подобно лазерам TTL, большинство перестраиваемых лазеров оснащено волокном, сохраняющим поляризацию проходящего излучения (PMF), что обеспечивает определенное состояние поляризации. Оптический разъем с ключом и PMF полезны в схемах с открытым оптическим каналом и в тестах планарных устройств. Завершает схему тестирования измеритель оптической мощности. Любая детерминированная зависимость оптического тракта от длины волны компенсируется путем нормализации во время эталонного измерения без тестируемого устройства. Для этого требуется хорошая воспроизводимость мощности и длины волны во время свипирования.

Диапазон свипирования зависит от способности лазера сохранять моду в широком диапазоне длин волн без перехода на другую моду – что называется "скачком моды". Скачки моды во время свипирования проявляются в виде нестабильности длины волны и оптической мощности. Такие скачки могут сделать измерения недостоверными, поскольку скачки моды носят беспорядочный характер и не повторяются. Для эффективного тестирования свипирование по длине волны должно быть быстрым и точным. Отличным показателем является погрешность длины волны менее пяти пикометров для времени измерения в несколько секунд.

Разработчики контрольно-измерительного оборудования используют точно документированные схемы лазерных резонаторов, которые теоретически позволяют затягивать моды на большие расстояния до пределов, определяемых дисперсионными элементами резонатора, а именно активной средой и коллиматором. Способность лазера затягивать моды отражает точность механической юстировки во время сборки прибора. Кроме того, разброс механических параметров, вибрация и акустические резонансы дают свой вклад в характер зависимости длины волны от времени и скорости от длины волны. И хотя дополнительные элементы резонатора могут скомпенсировать разброс механических параметров и вибрацию, они повышают стоимость и сложность прибора,

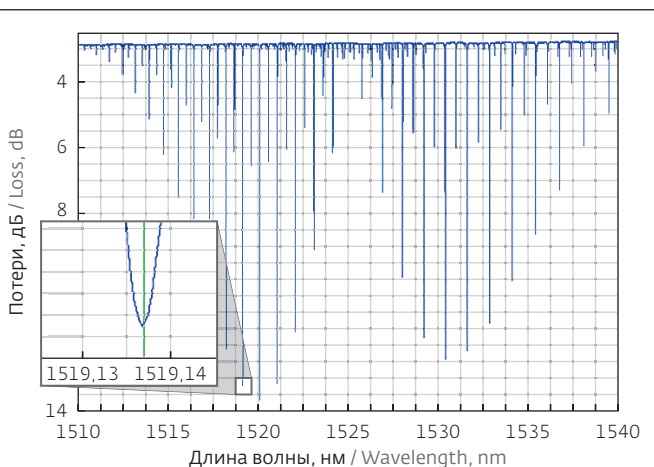


Рис.2. Спектр поглощения $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ (на вставке: форма одной линии поглощения, 5 пм/дел)

Fig. 2. $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ absorption spectrum (Inset: shape of a single absorption line, 5 pm/div)

in handy with open beam setups and planar device tests. An optical power meter completes the test setup. Any deterministic wavelength dependency in the optical path is removed by normalizing against a reference measurement without the DUT. This requires good power and wavelength repeatability while sweeping.

The **sweep range** is influenced by a tunable laser's ability to maintain a laser mode across a wide wavelength range without allowing a different laser mode to come up – an effect called "mode hop". Mode hops during a sweep appear in the form of a discontinuity in wavelength and optical power. They can render a measurement unusable, because mode hops are sporadic, and not repeatable. For an efficient test method, wavelength sweeping has to be both fast and accurate. Measurement times of a few seconds and wavelength uncertainties of less than five picometers are state of the art.

A number of well-documented laser cavity designs are used by test equipment designers that theoretically enable mode pulling over a wide distance, to the limits determined by dispersive elements in the cavity, namely the gain medium and collimator lenses. The laser's mode pulling capability will then reflect how precisely the mechanical alignment was done during the instrument assembly. Also, mechanical tolerances, vibrations and acoustic resonances inject variations to the wavelength-over-time profile, and to the velocity-over-wavelength profile. While additional actors in the cavity can compensate for tolerances and vibrations, they add

поскольку требуют прецизионного управления во время свипирования.

Кроме того, **диапазон свипирования** перестраиваемого лазера ограничивается полосой активной среды: серийно выпускаемые перестраиваемые лазеры достигают диапазона настройки около 200 нм, что эквивалентно 13% от их центральной длины волны.

Для свипирующих измерений многопортовых устройств, таких как демультиплексоры DWDM, используются синхронно запускаемые измерители мощности. Погрешность измерения длины волны зависит от точности запуска по отношению к реальной длине волны перестраиваемого лазера. Проверенный способ достижения высокой точности измерений заключается в том, чтобы делать выборки длины волны синхронно с выборками измерителя мощности во время свипирования лазера. Многие производители предлагают детекторы, которые обеспечивают считывание длины волны в режиме реального времени.

Небольшие отклонения от равноудаленных точек на шкале длин волн могут быть компенсированы алгоритмами линеаризации. Остаточная погрешность, как правило, невелика, но она может стать заметной, если измерение состоит из нескольких сканирований. Это случается, например, при использовании некоторых методов измерения поляризации или при объединении в измерителе мощности нескольких диапазонов чувствительности.

Более устойчивого повышения точности измерений можно добиться за счет лучшей настройки линейности. Она минимизирует разброс последовательных свипирований и более равномерно распределяет выборки длины волны. И хотя управлять шаговым двигателем может быть достаточно просто, достичь плавного и непрерывного перемещения с высокой линейностью может быть очень нелегко. С другой стороны, все типы линейных или поворотных приводов требуют позиционирования с очень высоким разрешением, что тоже не просто. Достичь высокой линейности в пределах ± 1 пм можно за счет применения высоколинейного шагового привода дифракционной решетки и субпикометрового разрешения реального времени по длине волны. На центральной длине волны 1550 нм эта величина приближается к значению $\pm 0,6 \cdot 10^{-6}$, т.е. к уровню точности измерителя длины волны среднего класса, измеряющего длину волны в статике.

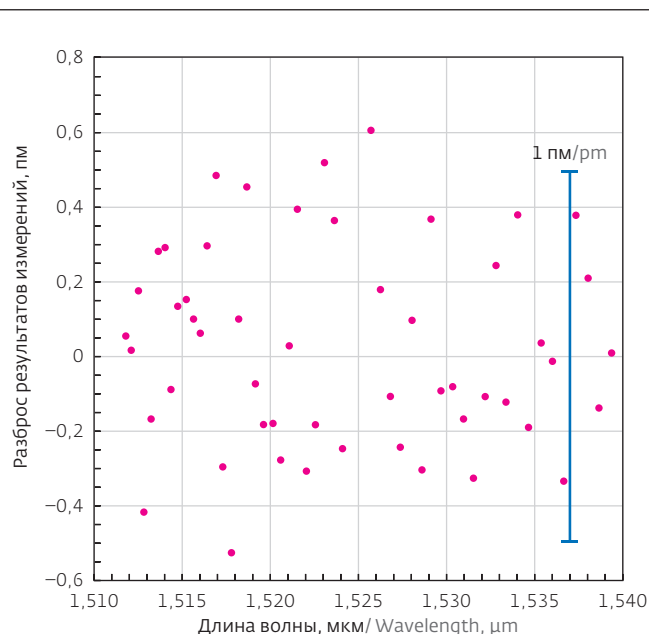


Рис.3. Результаты измерения длины волны центральной линии поглощения $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$

Fig. 3. Deviation between the measured and known wavelengths of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ absorption lines in picometers

cost and complexity to the instrument design as they need to be precisely controlled during the sweep.

How **wide** a tunable laser can sweep is also limited by the bandwidth of the gain medium: commercially available tunable lasers reach a tuning range in the neighborhood of 200 nm, equivalent to 13% of their center wavelength.

Swept-wavelength measurements of multiport devices like DWDM de-multiplexers rely on synchronously triggered power meters. The accuracy of the wavelength scale depends on the precision of the trigger with respect to the tunable laser's actual wavelength. A proven concept to achieve highly accurate measurements is to take wavelength samples synchronously to the power meter samples while the laser sweeps. Most vendors offer detectors that provide a real-time wavelength reading.

Small deviations from equidistant wavelength points can be compensated by linearization algorithms. The residual uncertainty might be small, but it can become noticeable when multiple sweeps contribute to the test, such as with some polarization measurement methods or when multiple power meter sensitivity ranges are combined.

A more sustainable improvement in measurement accuracy can be reached by better tuning linearity in the first place; it minimizes the variation between subsequent sweeps, and positions wavelength

На рис.2 показаны типичные результаты измерений, выполняемые обычно для подтверждения точности настройки длины волны свипирующих перестраиваемых лазеров. В роли тестируемого устройства выступает газовая ячейка, заполненная ацетиленом ($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$) под малым давлением. Узкая полоса перестраиваемого лазера упрощает определение центральной длины волны линий поглощения.

На рис.3 приведено сравнение результатов измерений длины волны центральной линии поглощения $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ с ее известным значением, согласно протоколу NIST SRM 2517a. Измерение выполнялось при скорости свипирования 200 нм/с с помощью перестраиваемого лазера Keysight 81606A и измерителя оптической мощности Keysight N7744A. Результаты обладали высокой воспроизводимостью и почти не зависели от выбранной скорости и направления свипирования. Этот перестраиваемый лазер рассчитан на оптимальную линейность свипирования и работает с отслеживанием длины волны.

Еще один параметр резонатора перестраиваемого лазера – уровень **спонтанного излучения источника** (SSE). SSE представляет собой некогерентный свет с широким спектром излучения, который не соответствует условиям резонанса и снижает селективность резонатора. Измерительные перестраиваемые лазеры должны обладать достаточной выходной оптической мощностью, чтобы компенсировать потери в схеме тестирования и иметь высокое значение отношения сигнала к SSE, чтобы измерять параметры оптических фильтров с малыми перекрестными помехами и хорошим подавлением в полосе ослабления. На рис.4 показано влияние SSE на измерение полосового фильтра DWDM. Одну и ту же величину измеряли с помощью двух перестраиваемых лазеров разного типа. Синяя линия соответствует измерениям, полученным с помощью простого перестраиваемого лазера с малогабаритным резонатором, имеющим такую же выходную мощность и уровень SSE, как и перестраиваемый передающий лазер. Красная линия соответствует измерениям, полученным перестраиваемым лазером с более сложной конструкцией резонатора. Этот лазер обладает меньшей на 2 дБ выходной мощностью и очень низким уровнем спонтанного излучения. С целью лучшей наглядности обе кривые были совмещены на одном графике, для этого значения в обеих сериях измерений были

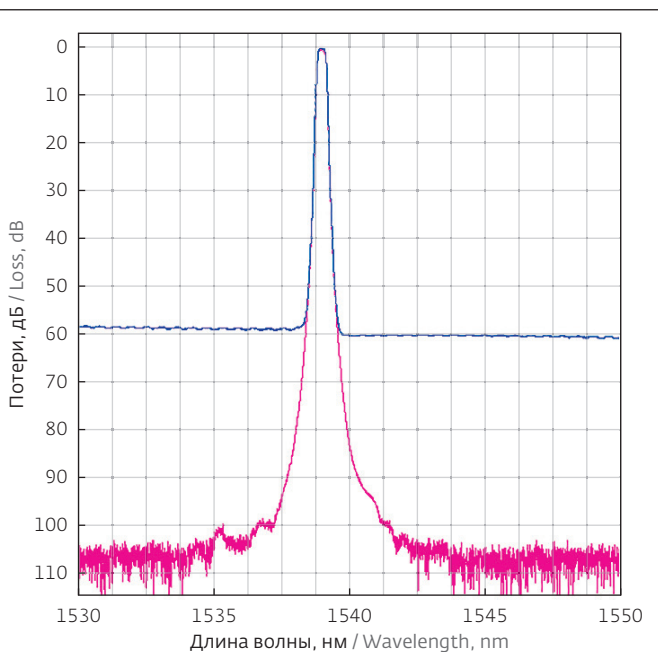


Рис.4. Измерение фильтра DWDM с помощью двух разных перестраиваемых лазеров
Fig. 4. DWDM filter measured with two different tunable lasers

samples more evenly. While a stepping motor might be straight-forward to control, a smooth, highly linear and continuous movement is hard to achieve. On the other hand, all types of linear or rotational drives require position encoding to an extremely fine resolution, which is a challenge, too. A tuning nonlinearity of less than ± 1 pm can be achieved by combining both: a highly linear grating drive and real-time, sub-picometer wavelength resolution. At a center wavelength of 1550 nanometers, this gets close to ± 0.6 ppm, the accuracy level of a mid-range wavelength meter that measures static wavelength.

Figure 2 shows a measurement commonly performed to prove the wavelength accuracy of sweeping tunable lasers; a gas cell filled with Acetylene ($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$) under low pressure serves as test device. The narrow bandwidth of the tunable laser makes it easy to determine the center wavelength of the absorption lines.

In Figure 3 we compare the measured center wavelength of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ absorption lines with their known values, according to NIST SRM 2517a. The measurement was acquired at 200 nm/s sweep speed with a Keysight 81606A tunable laser and an N7744A optical power meter. The result is repeatable and mostly independent from the chosen sweep speed and sweep direction. This tunable laser has been designed for optimal sweep



нормированы. Спонтанное излучение компактного лазера в полосе пропускания затухает, превосходящую развязку фильтра в полосе ослабления. В отличие от этого, красная кривая ограничена лишь собственным шумом измерителя мощности в полосе ослабления.

Селективность лазера можно повысить двумя способами. Один из них заключается в том, чтобы внутри резонатора установить дополнительные перестраиваемые фильтры (блокирующие нежелательные моды лазера и спектральный шум). Другой – с помощью конструкции самого резонатора, которая должна быть решена таким образом, чтобы позволить излучению многократно проходить сквозь оптическую решетку. В общем случае работа активного кристалла на большом электрическом токе гарантирует концентрацию большой энергии в нужной моде лазера и сравнительно меньшей энергии в спонтанном излучении. Ограничивающие факторы включают рассеяние мощности в активной среде и ее влияние на температурную стабильность лазера, а также ускоренное старение при приближении тока лазера к предельному значению.

Хотя применение перестраиваемых передающих лазеров для измерения характеристик оптических компонентов выглядит привлекательно из-за их высокой оптической мощности, малой стоимости и небольшого размера, они обладают целым рядом существенных недостатков. Настройка за пределы сетки DWDM поддерживается редко, но все же нужна для обеспечения правильной формы фильтров на границах сетки. Современные TTL не поддерживают прецизионные измерения со свипированием по длине волны в пределах всей сетки DWDM, которые очень важны для эффективного тестирования с высоким разрешением. И, наконец, перестраиваемые передатчики имеют такие уровни SSE, которые не позволяют измерять развязку в полосе ослабления оптических полосовых и режекторных фильтров. Точно свипирующие в широком диапазоне лазеры с внешними резонаторами отвечают всем этим требованиям, и их погрешность близка к погрешности настольных измерителей длины волны.

ЛИТЕРАТУРА

Karen Liu, Littman M.G. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers. – Opt. Lett., 1981, v.6, p.117–118 (doi: 10.1364/OL.6.000117).

linearity and operates under closed-loop wavelength control.

The amount of **source spontaneous emission** (SSE) of a tunable laser is another property of its cavity design. SSE is spectrally broad incoherent light and represents energy that escapes the resonance condition, thus reducing the laser cavity's selectivity. Tunable lasers for measurement applications must have enough optical output power to compensate for losses in the test setup, and a good signal-to-SSE ratio to enable the evaluation of optical filters with low crosstalk or good stop band isolation. Figure 4 demonstrates the effect of SSE on the measurement of a DWDM band pass filter. The same measurement was performed with two different tunable laser types. The blue line represents a simple but mechanically compact cavity design – with output power and SSE level similar to a tunable transmitter laser, while the red line represents a more complex cavity design that combines 2 dB less output power with a very low spontaneous emission level. Both curves have been normalized for better comparison. The compact tunable laser's spontaneous emission in the pass band masks the filter's excellent isolation in the stop band. In contrast, the red curve is only limited by the power meter's noise floor in the stop band.

Selectivity can be increased by additional tunable filters inside the cavity – filters that block undesired laser modes and spectral noise – or by cavity designs that let the laser light pass the optical grating multiple times per roundtrip. Generally, operating the gain chip at high electrical current ensures there is more energy concentrated in the desired laser mode and relatively less energy in the spontaneous emission. Limiting factors include the power dissipation of the gain medium and its impact on the thermal stability of the laser, as well as accelerated aging when the laser current gets close to the operating limits.

While the use of tunable transmitter lasers for optical component measurements is appealing due to their high optical power, low cost and small form factor, they fall short in several important disciplines. Tuning beyond the limits of the DWDM grid is rarely supported yet required to ensure filter shapes are good at the edge of the grid. Highly accurate swept-wavelength measurements spanning the entire DWDM grid, and essential for effective high resolution testing, are not available from today's TTLs. Finally, tunable transmitters have SSE levels that prevent exploring the stop band isolation of optical band pass filters and notch filters. Widely and accurately sweeping external cavity lasers satisfy all these requirements, and reach a measurement accuracy level close to that of bench top wavelength meters.