

آشنایی با اجزاء داخلی
**SPECTRAL DOMAIN-OPTICAL
COHERENCE TOMOGRAPHY**

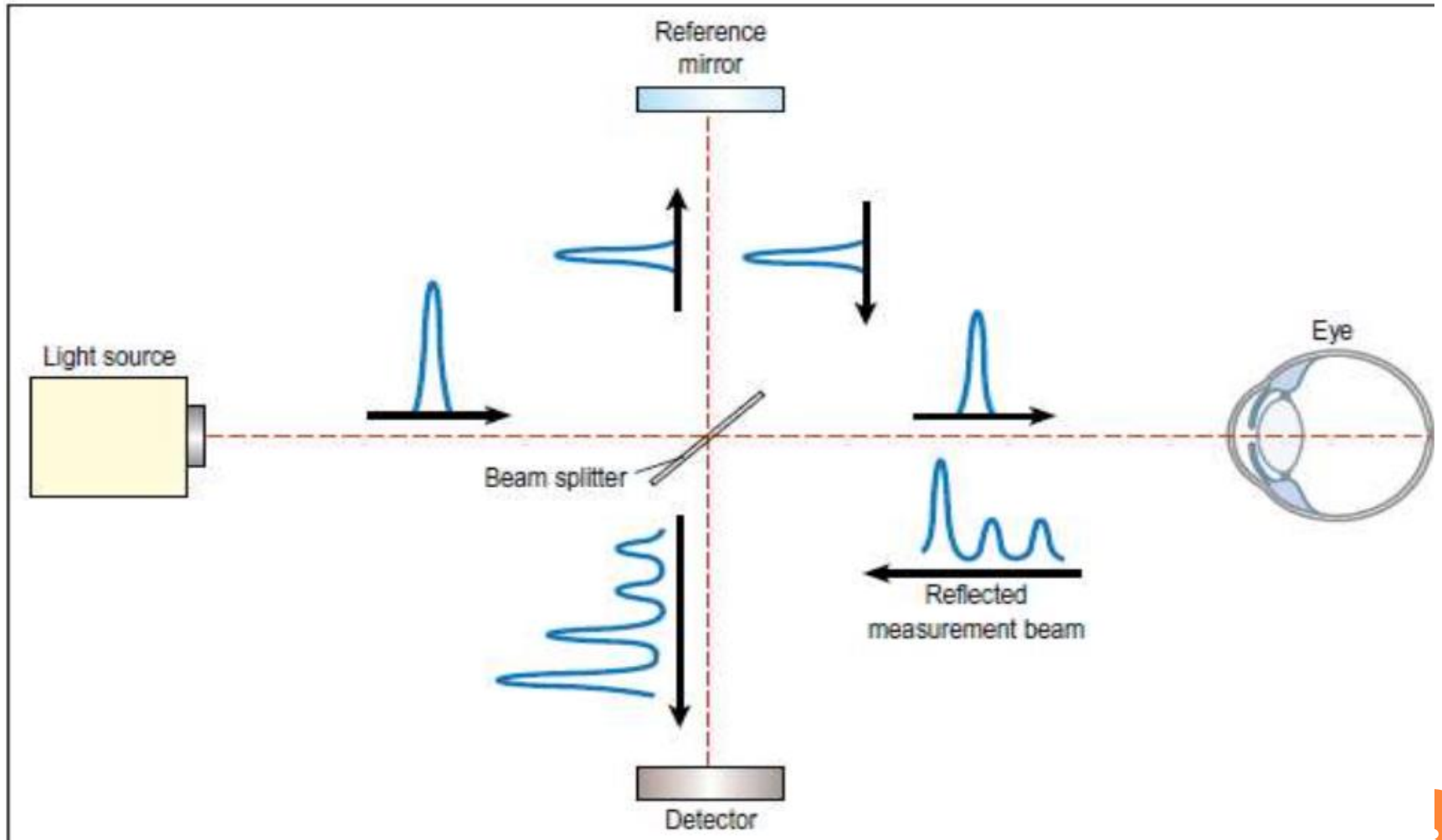
تهیه کننده:

محمد حسین وفائی

مقدمه

- OCT یک روش غیرتهاجمی و غیرتماسی به منظور تصویر برداری با دقت بالا است.
- با استفاده از OCT می توان تصاویر ۲ بعدی و ۳ بعدی تهیه کرد.
- تصویربرداری با استفاده از OCT همانند تصویر برداری با استفاده از صوت است با این تفاوت که بجای صوت از نور استفاده می شود.
- به علت سرعت بالای نور نمی توان زمان بازگشت نور را به سادگی اندازه گرفت. به همین دلیل ابزار خاص مورد نیاز است.

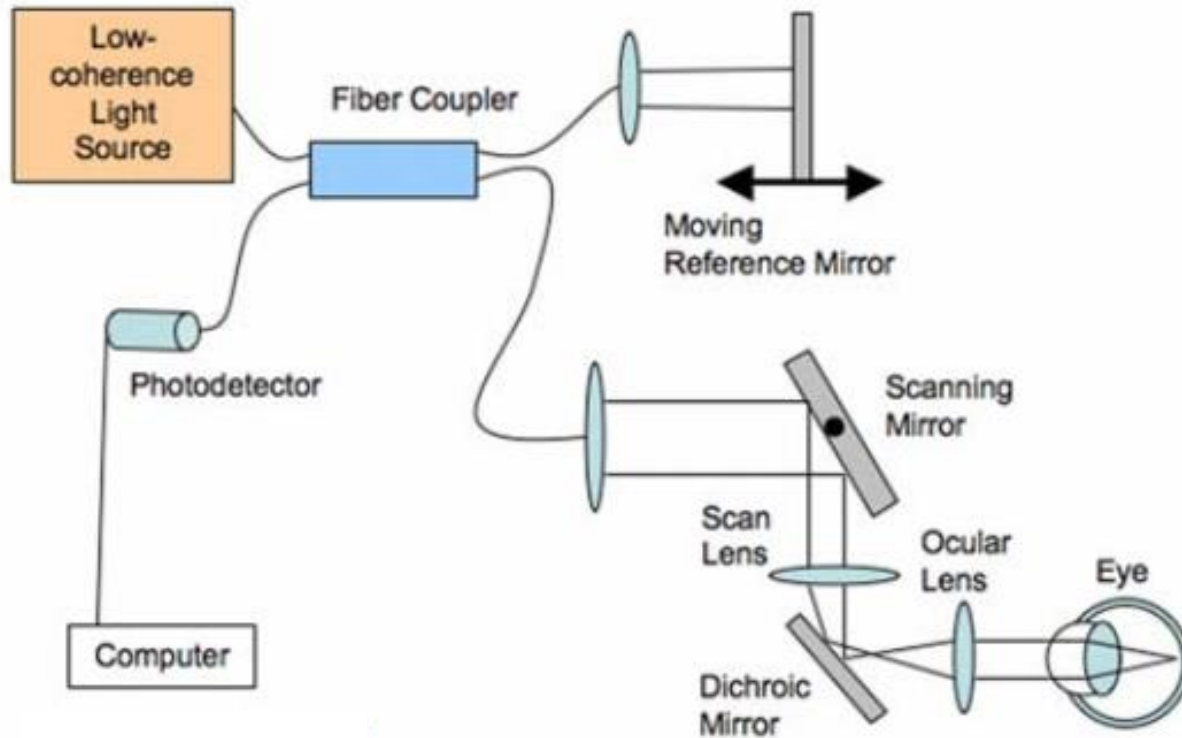
OCT



OCT

- در OCT پرتو نور تولیدی توسط splitter به دو بخش تقسیم می شود. بخش اول به بازوی مرجع (Reference Arm) ارسال می شود و بخش دوم به بازوی نمونه (Sample Arm) ارسال می شود.
- هر دو بخش پرتو نور پس از برخورد، بازگشته و با یکدیگر تداخل می کنند. به منظور دستیابی به اطلاعات مربوط به نمونه لازم است طول مسیر نمونه و مسیر مرجع با هم برابر باشد.
- پرتو نور حاصل از تداخل دو پرتو نور به یک شناساگر (Detector) ارسال شده و در آنجا پردازش می شود.

TIME DOMAIN-OCT (TD-OCT)



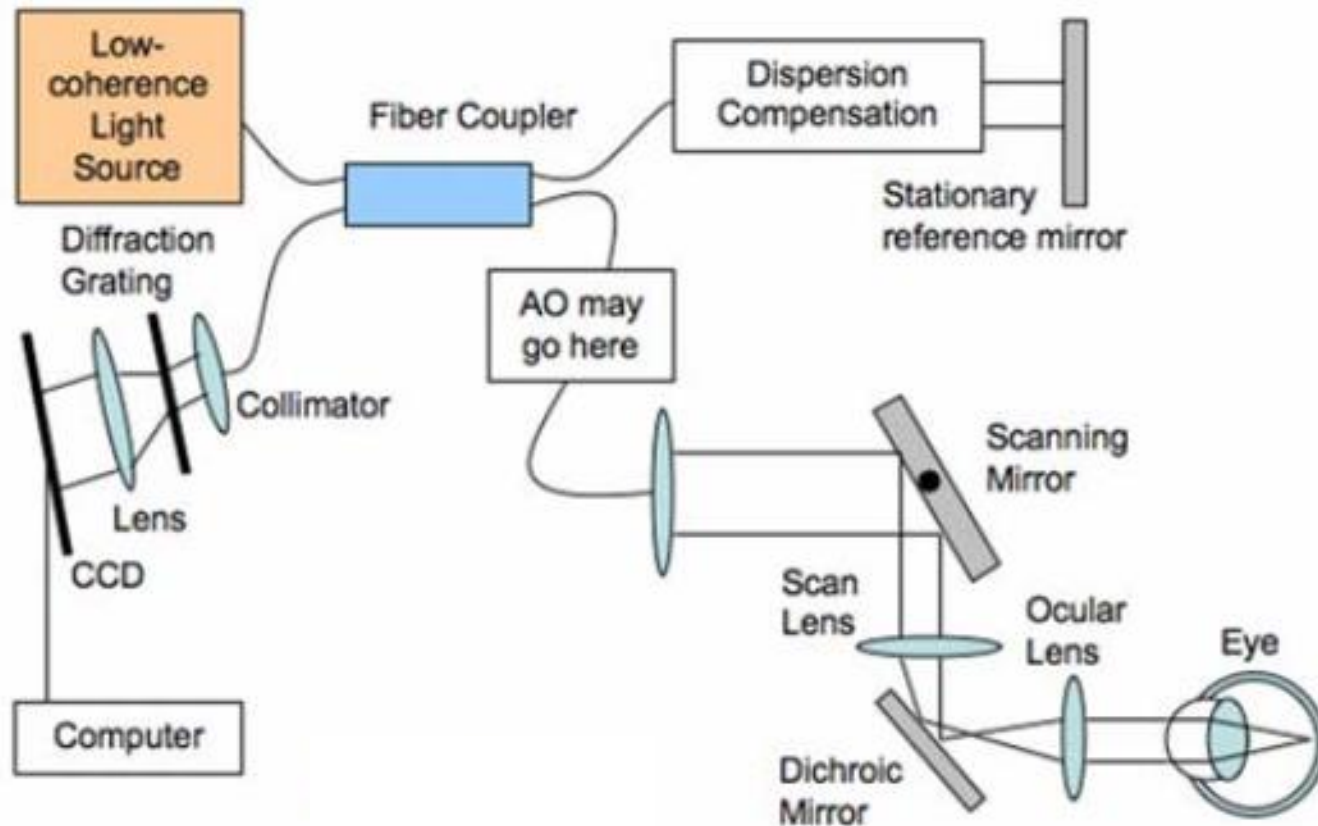
TD-OCT

- در TD-OCT به منظور دستیابی به اطلاعات، بازوی مرجع به اندازه عمق مورد نیاز برای نمونه برداری جابجا می شود.
- به علت حرکت مکانیکی بازوی مرجع، سرعت نمونه برداری و همچنین رزولوشن تصویربرداری محدود است.

FREQUENCY DOMAIN-OCT (FD-OCT)

- به منظور حذف بازوی مرجع متحرک، FD-OCT ها عرضه شدند. در FD-OCT ها بازوی مرجع ساکن است.
- در این دسته از OCT ها به منظور استخراج تصویر از یک طیف سنج (Spectrometer) استفاده می شود. در واقع در این دسته از OCT ها بازوی سومی به نام spectrometer arm وجود دارد.
- پیاده سازی FD-OCT ها به دو روش متفاوت امکان پذیر است:
 - Spectral Domain-OCT (SD-OCT)
 - Swept Source-OCT (SS-OCT)

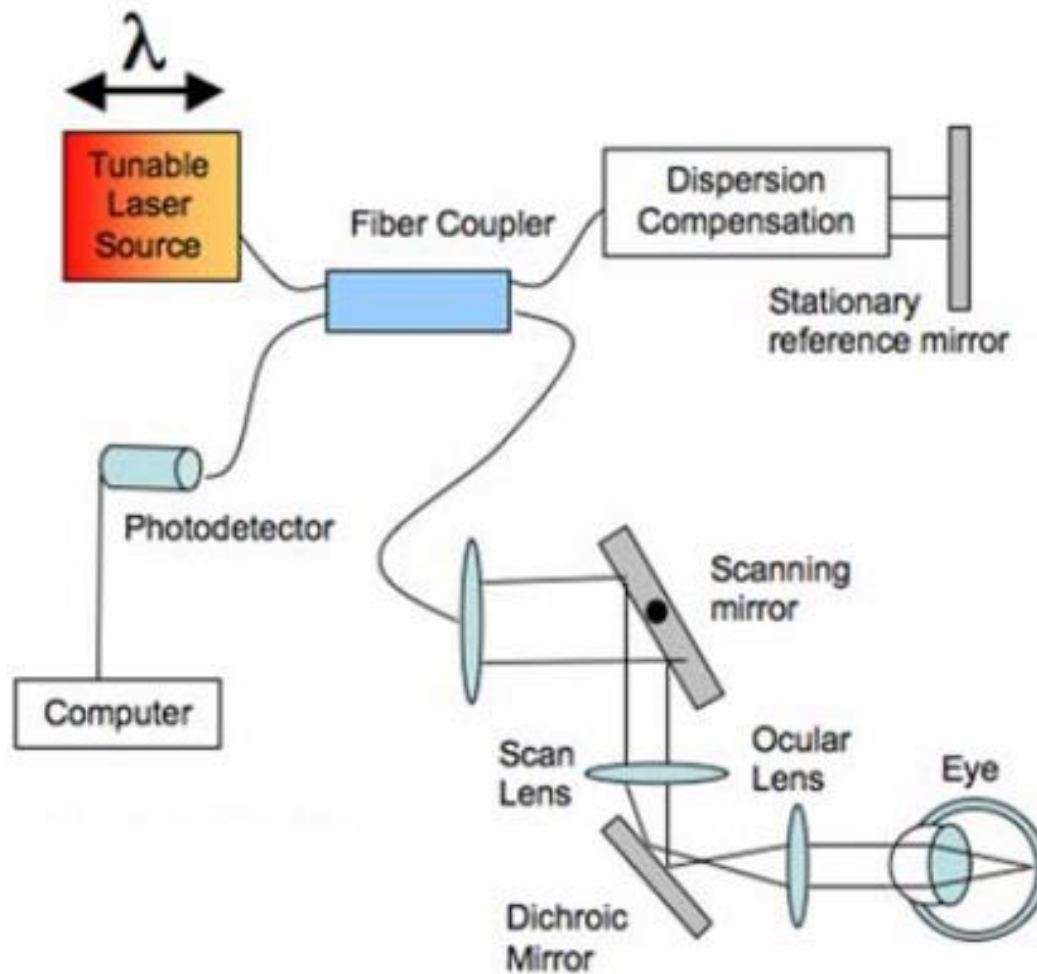
SD-OCT



SD-OCT

- در این دسته از OCT ها از یک منبع نور low-coherence استفاده می شود. منبع نور دارای طول موج مرکزی λ_0 و پهنای باند $\Delta\lambda$ است.
- پرتو نور به دو بخش تقسیم شده یک بخش آن به بازوی مرجع و دیگری به بازوی نمونه هدایت می شود.
- پرتو نور بازگشتی (backscattered beam) از بازوی مرجع و بازوی نمونه با یکدیگر تداخل کرده و به طیف سنج منتقل می شود.
- در طیف سنج، پرتو نور حاصل از تداخل، به طول موج های تشکیل دهنده پرتو تقسیم شده و به یک آشکارساز داده می شود.

SS-OCT

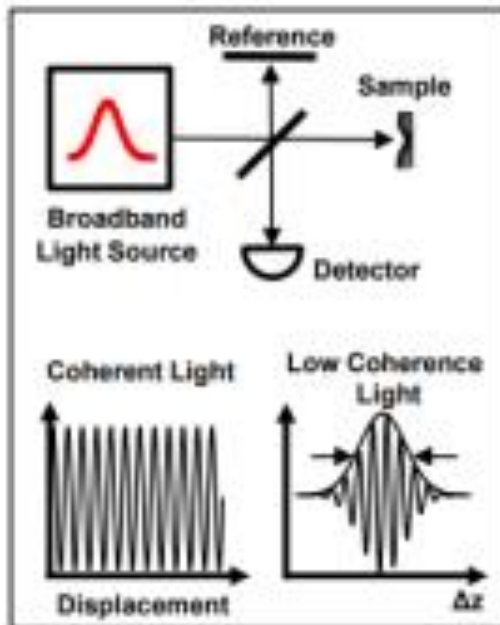


SS-OCT

- در این دسته از OCT ها منبع نور یک لیزر با طول موج مشخص و پهنای باند بسیار کم است. طول موج مرکزی لیزر به سرعت در یک محدوده مشخص sweep می شود.
- پرتو نور به دو بخش تقسیم شده یک بخش آن به بازوی مرجع و دیگری به بازوی نمونه هدایت می شود.
- پرتو نور بازگشتی (backscattered beam) از بازوی مرجع و بازوی نمونه با یکدیگر تداخل کرده و به طیف سنج منتقل می شود.
- در طیف سنج، پرتو نور حاصل از تداخل به یک آرایه photodetector داده می شود.
- به منظور دستیابی به تصویر از یک برد Data Acquisition (DAQ) استفاده می شود. ولتاژ آنالوگ تولید شده بوسیله photodetector به مبدل های آنالوگ به دیجیتال کارت DAQ می شود.
- آرایه دیجیتال تولید شده توسط پردازنده کارت DAQ که عموماً یک FPGA با سرعت پردازش بالا است پردازش شده و A-scan ها تولید می شوند. سپس A-Scan ها به کامپیوتر ارسال می شوند.

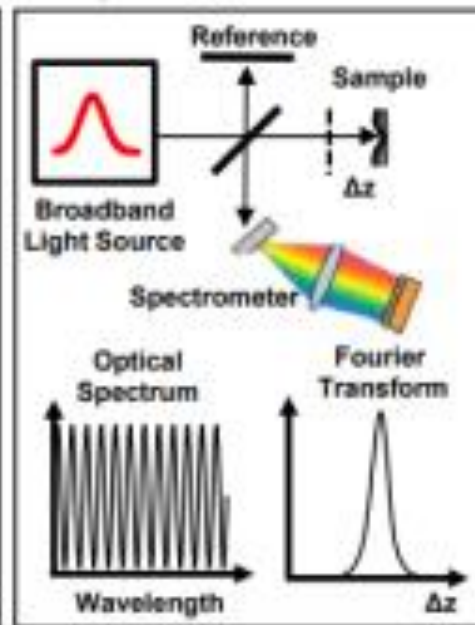
OCT انواع

Time-Domain OCT

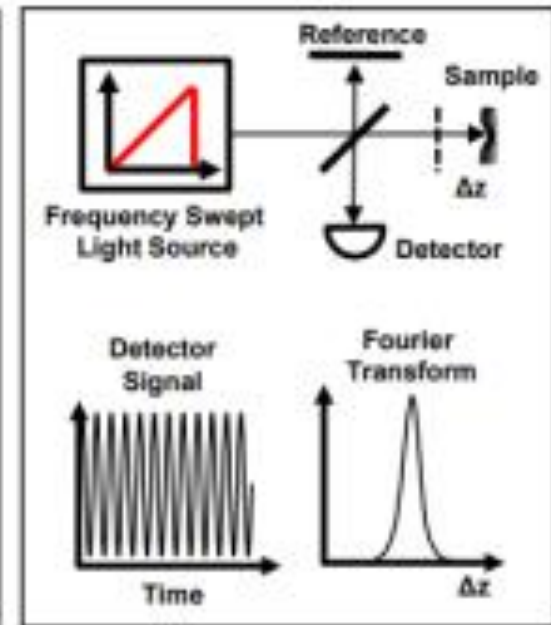


Fourier-Domain OCT

Spectral-Domain OCT

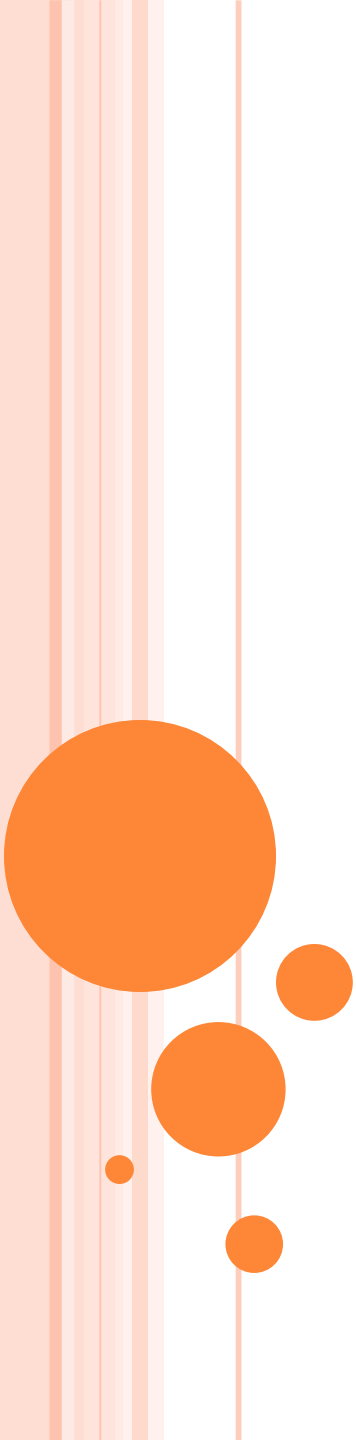


Swept-Source OCT



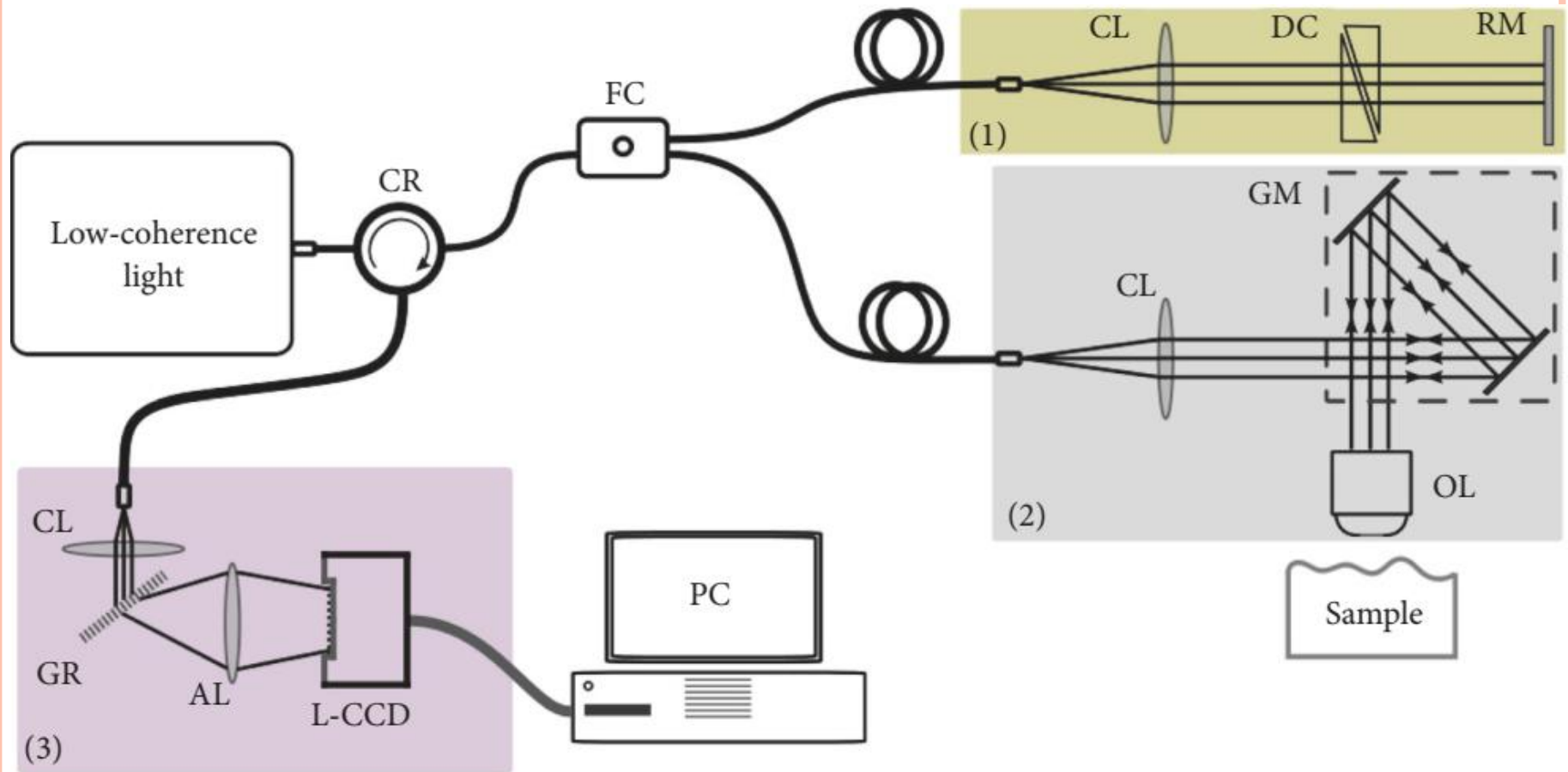
مقایسه SS-OCT و SD-OCT

- SS-OCT نیازمند منبع نور پیشرفته با پهنای باند کم است که طول مرکزی در آن با سرعت بالا جاروب می شود. هزینه این منبع نور بسیار بیشتر از منبع نور مورد نیاز در SD-OCT است.
(\$ 5,000 ~ 6,000 vs. \$ 20,000 ~ 30,000)
- به علت سرعت اسکن بالاتر SS-OCT، تعداد A-scan های بدست آمده در یک ثانیه، در هنگام استفاده از SS-OCT بسیار بالاتر است.
- به علت استفاده از طول موج بزرگتر، عمق تصویر برداری (imaging depth) در SS-OCT بالاتر است.
- رزولوشن محوری (axial resolution) و پایداری فاز (phase stability) در SD-OCT ها بالاتر است.
- از آنجا که پهنای باند پرتو نور در SS-OCT کمتر است، بازوی طیف سنج در SS-OCT پیچیدگی کمتری نسبت به SD-OCT دارد.



SPECTRAL DOMAIN-OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

SD-OCT



CL: collimating Lens
 DC: dispersion compensator
 RM: reference mirror
 GM: galvanometer mirror
 CR: fiber circulator
 FC: fiber coupler

OL: objective lens
 AL: infrared achromatic lens
 L-CCD: line CCD camera
 GR: transmission grating
 PC: personal computer

(1) Reference arm
 (2) Sample arm
 (3) Spectrometer

LIGHT SOURCE

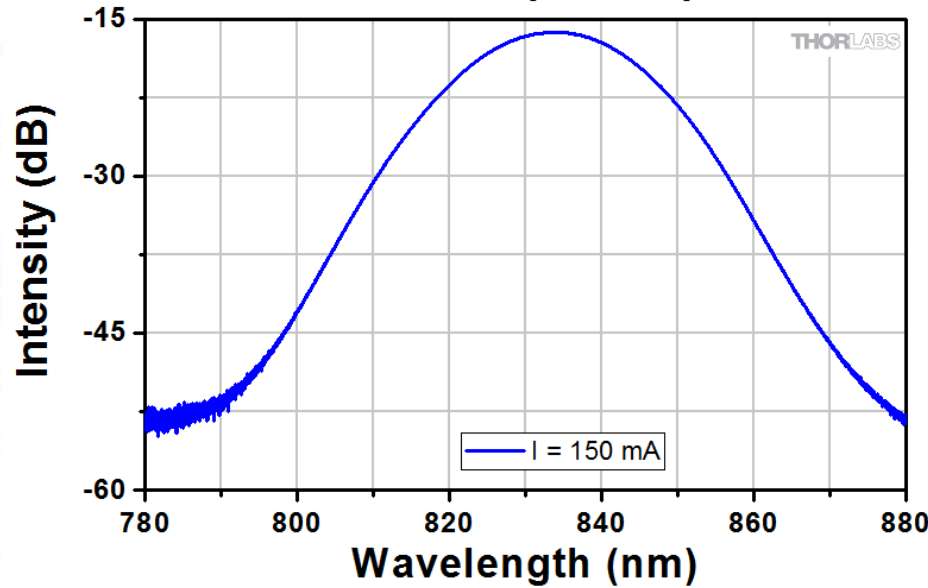
- نیاز به منبع نور low coherence است. طول موج مرکزی منبع نور برابر λ_0 و پهنای باند آن برابر $\Delta\lambda$ است.
- axial resolution طبق رابطه زیر محاسبه می شود:
$$l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$
- به منظور دستیابی به رزولوشن مطلوب لازم است پهنای باند و λ_0 به صورت همزمان تعیین شوند.
- حداکثر عمق تصویربرداری از رابطه $z_{max} = \frac{N\lambda_0^2}{4\Delta\lambda}$ محاسبه می شود. که N تعداد پیکسل دوربین CCD است.
- بین عمق تصویربرداری و رزولوشن trade off وجود دارد.
- در SD-OCT ها از superluminescent Diode (SLD) به عنوان منبع نور استفاده می شود.

LIGHT SOURCE



LIGHT SOURCE

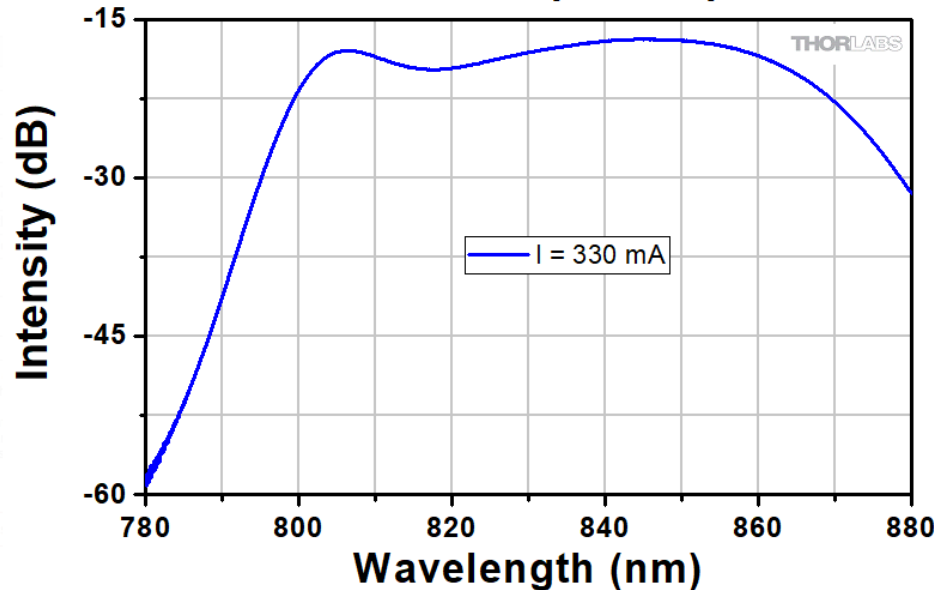
SLD830S-A10 Optical Spectrum



○ توزیع توان طیفی منبع نور اثر بسیار مهمی در کیفیت عملکرد OCT دارد.

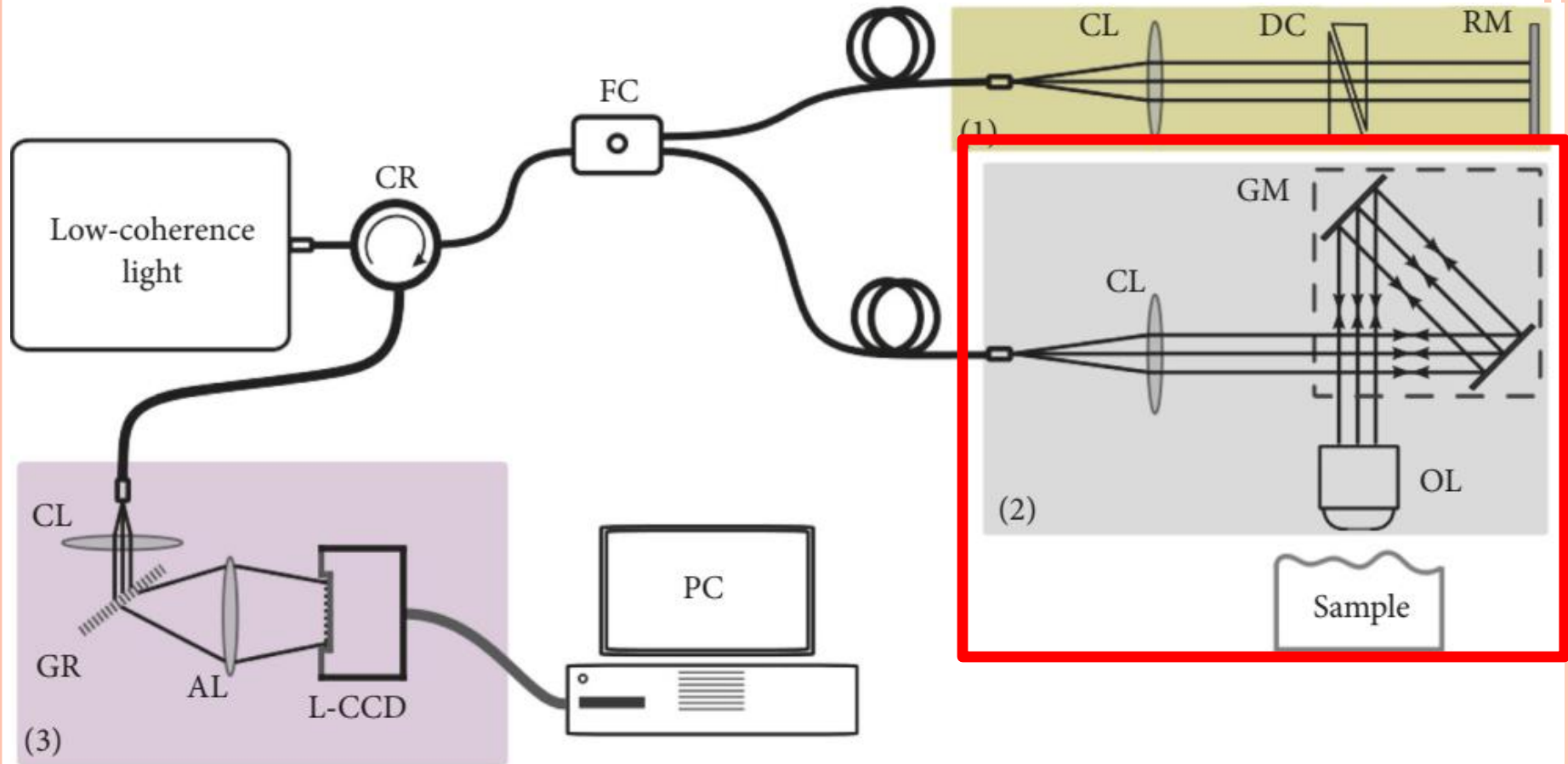
○ بهترین حالت توزیع گوسی است.

SLD830S-A20W Optical Spectrum



○ هرچقدر توزیع از حالت گوسی ایده آل فاصله داشته باشد، رزولوشن دستگاه از رزولوشن مورد انتظار کمتر می شود.

SAMPLE ARM



CL: collimating Lens
 DC: dispersion compensator
 RM: reference mirror
 GM: galvanometer mirror
 CR: fiber circulator
 FC: fiber coupler

OL: objective lens
 AL: infrared achromatic lens
 L-CCD: line CCD camera
 GR: transmission grating
 PC: personal computer

(1) Reference arm
 (2) Sample arm
 (3) Spectrometer

SAMPLE ARM

○ طراحی بازوی نمونه با توجه به رزولوشن عرضی (lateral resolution) مورد نظر، حداکثر میدان دید (field of view) مطلوب و پهنای باند منبع نور انجام می شود.

○ بازوی نمونه از چهار جزء تشکیل شده است:

- موازی کننده (Collimator)
- آینه های گالوانومتریک (Galvanometric Mirrors)
- تجهیزات اپتیکی واسط
- Objective Lens

SAMPLE ARM → COLLIMATOR

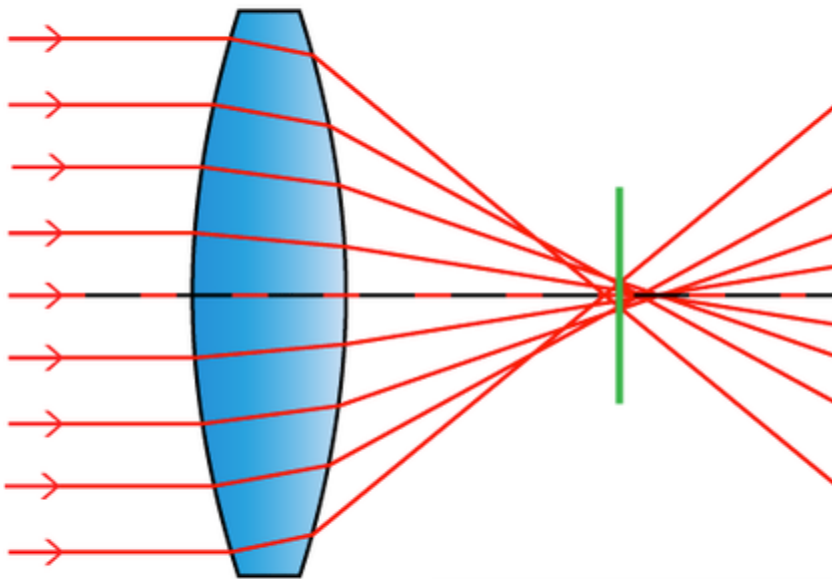
- از یک عدسی (یا تعدادی عدسی) تشکیل شده است.
- در جهت مستقیم، این عدسی پرتو نور دریافتی از فیبر را موازی کرده و به سطح آینه می تاباند.
- در جهت معکوس، این عدسی وظیفه دارد که پرتو نور بازگشتی از نمونه را متمرکز کرده و به خارج از بازوی نمونه انتقال دهد.

SAMPLE ARM → COLLIMATOR

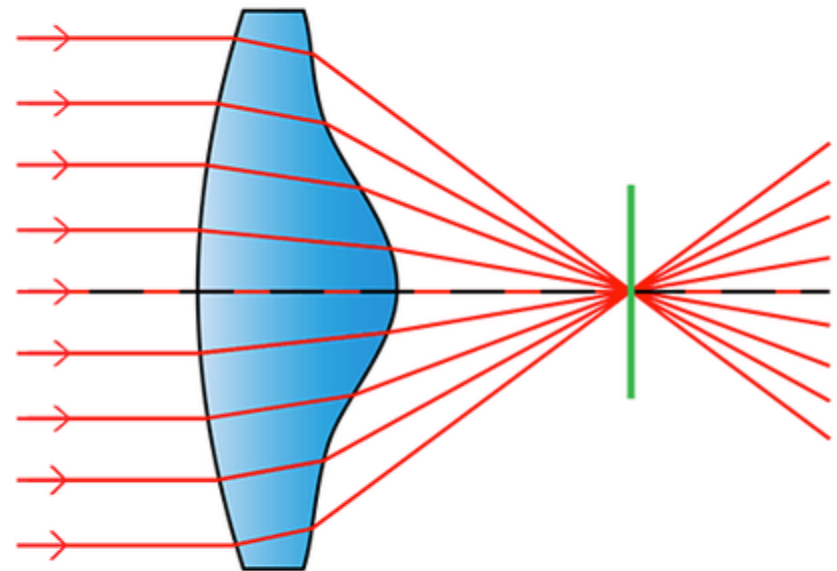
- بهترین عدسی مورد استفاده، عدسی aspherical است.
- موقعیت نسبی عدسی و فیبر نوری وارد شده به بازوی نمونه بسیار مهم است. در عمل لازم است نقطه کانونی عدسی منطبق بر وسط دهانه فیبر نوری باشد.
- در عمل از پکیج های آماده استفاده می شود که دارای یک یا چند عدسی aspherical بوده و ورودی فیبر نوری توسط سازنده با عدسی هم راستا شده است.
- کانکتور ورودی پکیج باید به فرم angled physical contact (APC) باشد.
- علاوه بر این، کل بدنه پکیج باید دارای پوشش antireflection (AR) باشد.

SAMPLE ARM → COLLIMATOR

Lens with
Spherical Aberration



Aspherical Lens



SAMPLE ARM → COLLIMATOR

- ▶ Collimation/Coupling Package with Aspheric Lens Element
- ▶ Diffraction-Limited Performance at 1310 nm
- ▶ Broadband AR Coating: 1050-1600 nm



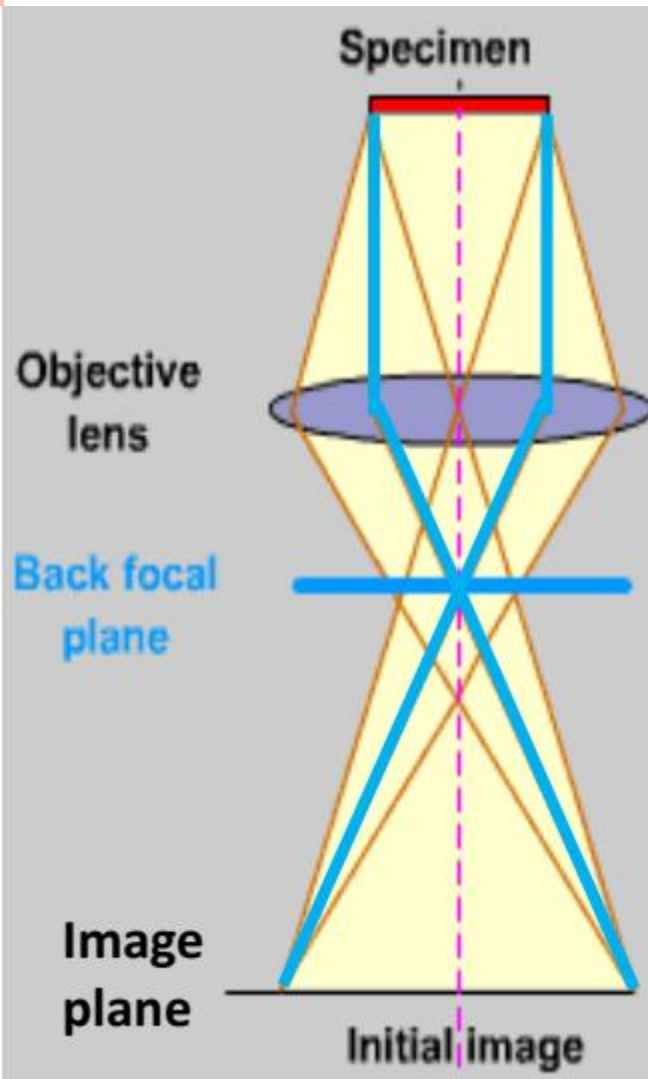
SAMPLE ARM → GALVANOMETRIC MIRRORS

- به منظور اسکن نمونه از دو آینه استفاده می شود. زاویه این دو آینه با استفاده از دو سرو موتور به سرعت تغییر داده می شود تا کل سطح مقطع نمونه بررسی شود.
- با استفاده از این دو آینه امکان تصویر برداری دو بعدی و سه بعدی فراهم می شود.
- آینه های مورد استفاده باید به صورت galvanometric باشند تا اولاً اسکن سریع نمونه با رزولوشن بالا امکان پذیر باشد و ثانیاً امکان کنترل دقیق موقعیت آنها فراهم باشد.
- آینه ها نباید لرزش و خطا داشته باشند؛ به همین دلیل از یک سیستم کنترل زاویه حلقه بسته دقیق به منظور کنترل زاویه آینه ها استفاده می شود.

SAMPLE ARM → GALVANOMETRIC MIRRORS

- اندازه آینه پارامتر مهمی است. اگر آینه بزرگ باشد سرعت اسکن کاهش می یابد و اگر کوچک باشد، ممکن است بخشی از پرتو نور شناسایی نشود.
- موقعیت نسبی آینه ها باید بگونه ای تنظیم شود که در هنگام اسکن، برخوردی بین آینه ها رخ ندهد.

SAMPLE ARM → GALVANOMETRIC MIRRORS



○ موقعیت نسبی آینه ها نسبت به هم باید به صورتی تنظیم شود که back-focal plane of the objective در نقطه میانی فاصله بین دو آینه قرار گیرد.

SAMPLE ARM → GALVANOMETRIC MIRRORS

- ▶ For Beam Diameters up to 10 mm
- ▶ Choice of Dielectric or Metallic Mirror Coating
- ▶ Easy Integration into OEM Systems
- ▶ Analog Control Electronics



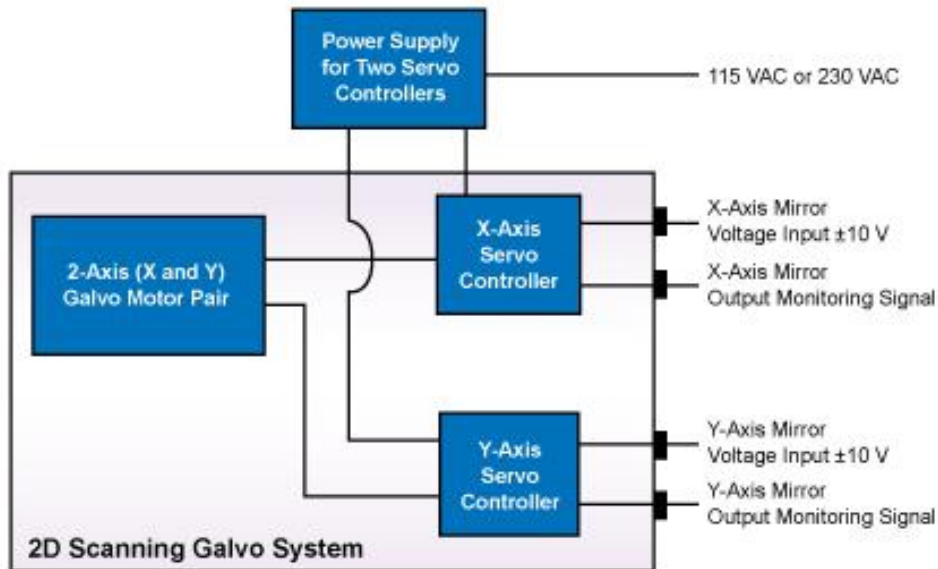
GVS012
Galvo Scanning System
with Silver-Coated Mirrors



GVS112
Dual-Axis Motor/Mirror Assembly
with Gold-Coated Mirrors
(Drivers Not Shown)



GHS003
Heatsink



SAMPLE ARM → OBJECTIVE LENS

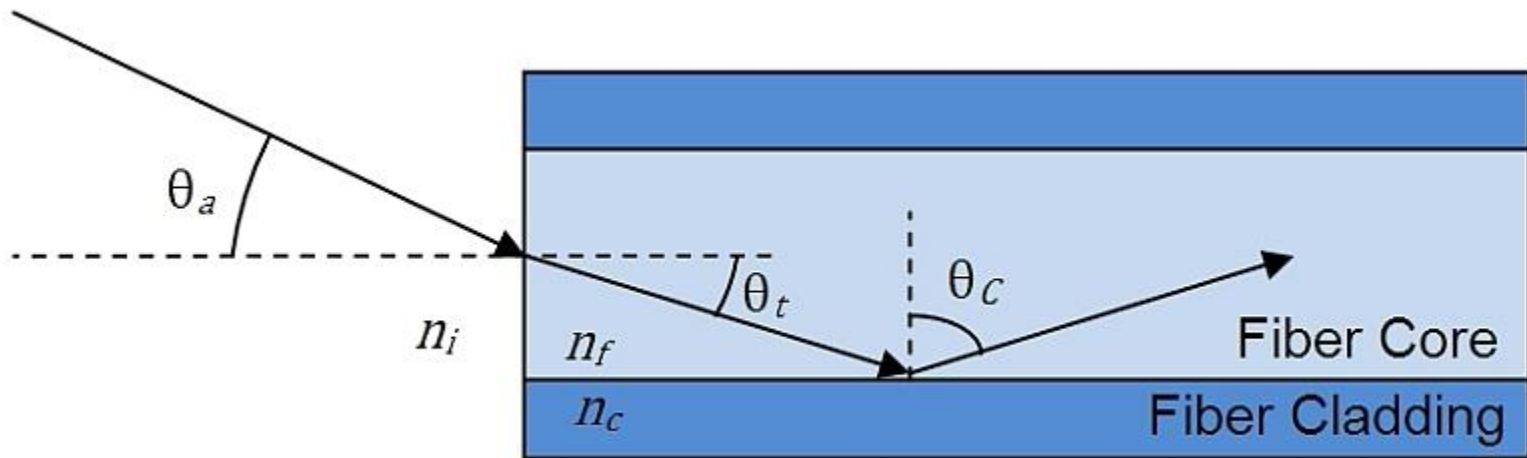
- در OCT معمولاً lateral resolution و حداکثر میدان دید، وابسته به نوع Objective lens است. lateral resolution برابر است با قطر توده نور متمرکز شده در فاصله کانونی عدسی و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\delta x = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{f}{r_0} = \frac{2\lambda}{\pi NA}$$

- بنابراین به منظور داشتن lateral resolution بالا لازم است Numerical Aperture (NA) عدسی بالا باشد. که البته با افزایش NA، Depth of focus (DOF) کاهش می یابد.

$$DOF = b = \frac{4\lambda}{\pi NA^2}$$

NA



$$NA = n_i \sin \theta_a$$

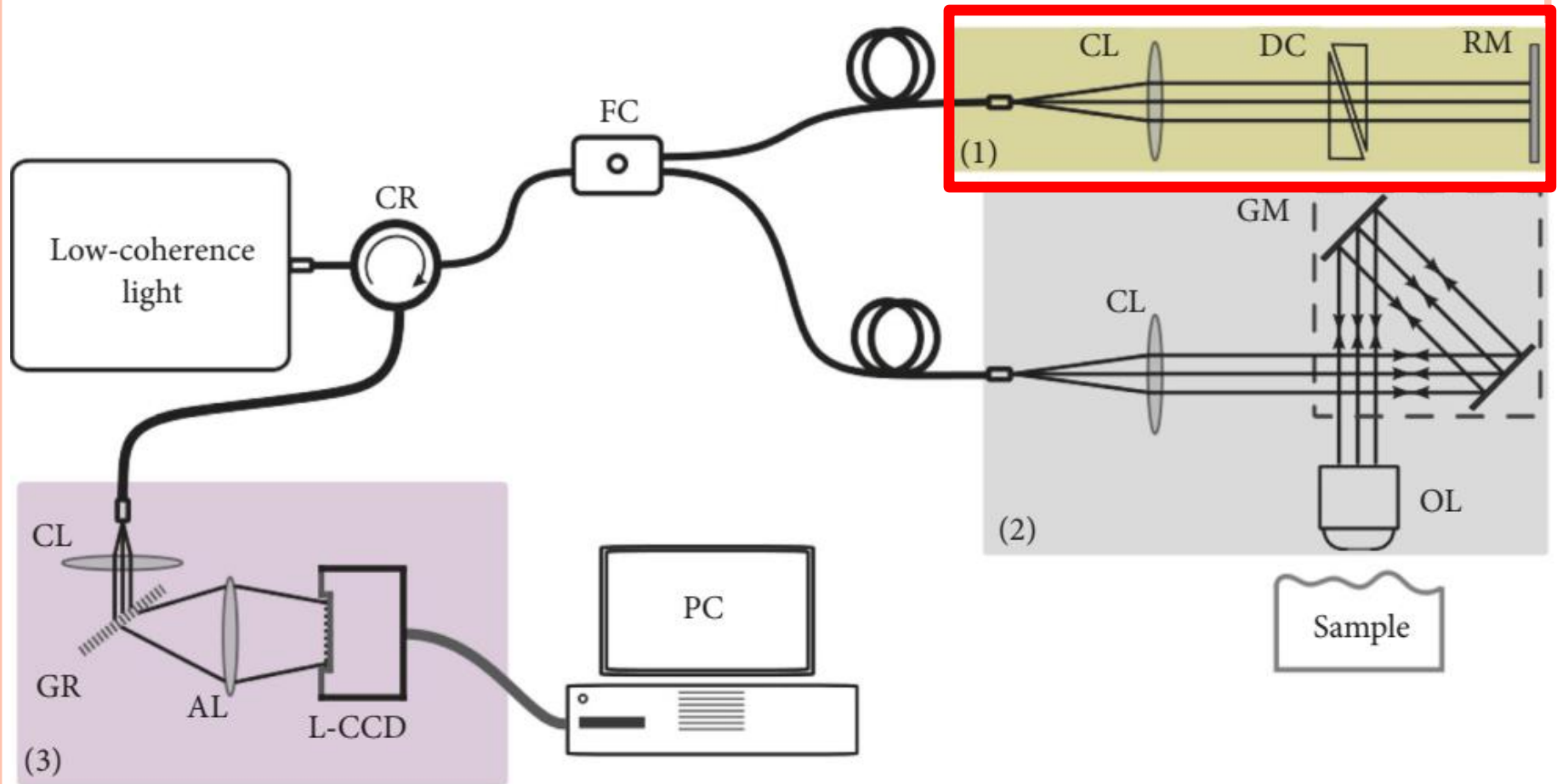
SAMPLE ARM → OBJECTIVE LENS



LSM54-1050

Key Specifications ^{a,b}	
Wavelength Range	950 to 1150 nm
Effective Focal Length	54 mm
Lens Working Distance	64 mm
Field of View, Maximum	18.8 x 18.8 mm ²
Field of View, Diffraction Limited	18.0 x 18.0 mm ²
Spot Size Plot, 1050 nm (Two-Axis Scan)	
Transmittance	
Mounting Threads (External)	M25 x 0.75

REFERENCE ARM



CL: collimating Lens
 DC: dispersion compensator
 RM: reference mirror
 GM: galvanometer mirror
 CR: fiber circulator
 FC: fiber coupler

OL: objective lens
 AL: infrared achromatic lens
 L-CCD: line CCD camera
 GR: transmission grating
 PC: personal computer

(1) Reference arm
 (2) Sample arm
 (3) Spectrometer

REFERENCE ARM

- از نظر ساختار کاملاً شبیه بازوی نمونه است با این تفاوت که بجای objective lens از Dispersion Compensating (DC) استفاده می شود تا هزینه کاهش یابد.
- در بازوی مرجع بجای نمونه از یک آینه استفاده می شود. پرتو نور به آینه تابیده شده و بازمی گردد.
- لازم است طول بازوی نمونه با طول بازوی مرجع برابر باشد. در عمل بازوی مرجع بر روی یک micromanipulator قرار می گیرد تا طول آن قابل تنظیم باشد.
- این بازو از سه جزء تشکیل شده است:
 - Collimator
 - Dispersion Compensating
 - آینه مرجع

REFRECENE ARM → DISPERSION COMPENSATOR

از آنجا که در بازوی نمونه به علت استفاده از objective lens، همواره مقداری dispersion وجود دارد از DC استفاده می شود تا همان میزان dispersion را در بازوی مرجع نیز ایجاد کند. معمولاً هر سری از DC ها از نظر dispersion رفتاری شبیه رفتار یک objective lens مشخص دارند.

Dispersion Compensators for Scan Lenses

- ▶ Anti-Reflection Coated, Bulk Glass Compensators Designed for Thorlabs Scan Lenses
- ▶ First and Second Order Dispersion Compensation
- ▶ Mounted in Lens Tubes with SM Threading for Easy System Integration



LSM03DC-VIS
18.9 mm Thick H-ZLAF52 Glass
for LSM03-VIS Scan Lens



LSM02DC
18.5 mm Thick N-SF8 Glass for
LSM02 and LSM02-BB Scan Lenses



LSM54DC1
37.2 mm Thick N-F2 Glass for
LSM54-850 Scan Lens

REFERECE ARM → GOLD MIRROR

- ▶ Average Reflectance >96% from 800 nm to 20 μm
- ▶ Round and Square Mirrors Available
- ▶ Packages of 10 Rounds at a Discounted Price



PF20-03-M01
Ø2"



PF10-03-M01
Ø1"



PF03-03-M01
Ø7 mm



PF07-03-M01
Ø19 mm



PF05-03-M01
Ø1/2"



PFSQ05-03-M01
1/2" x 1/2"

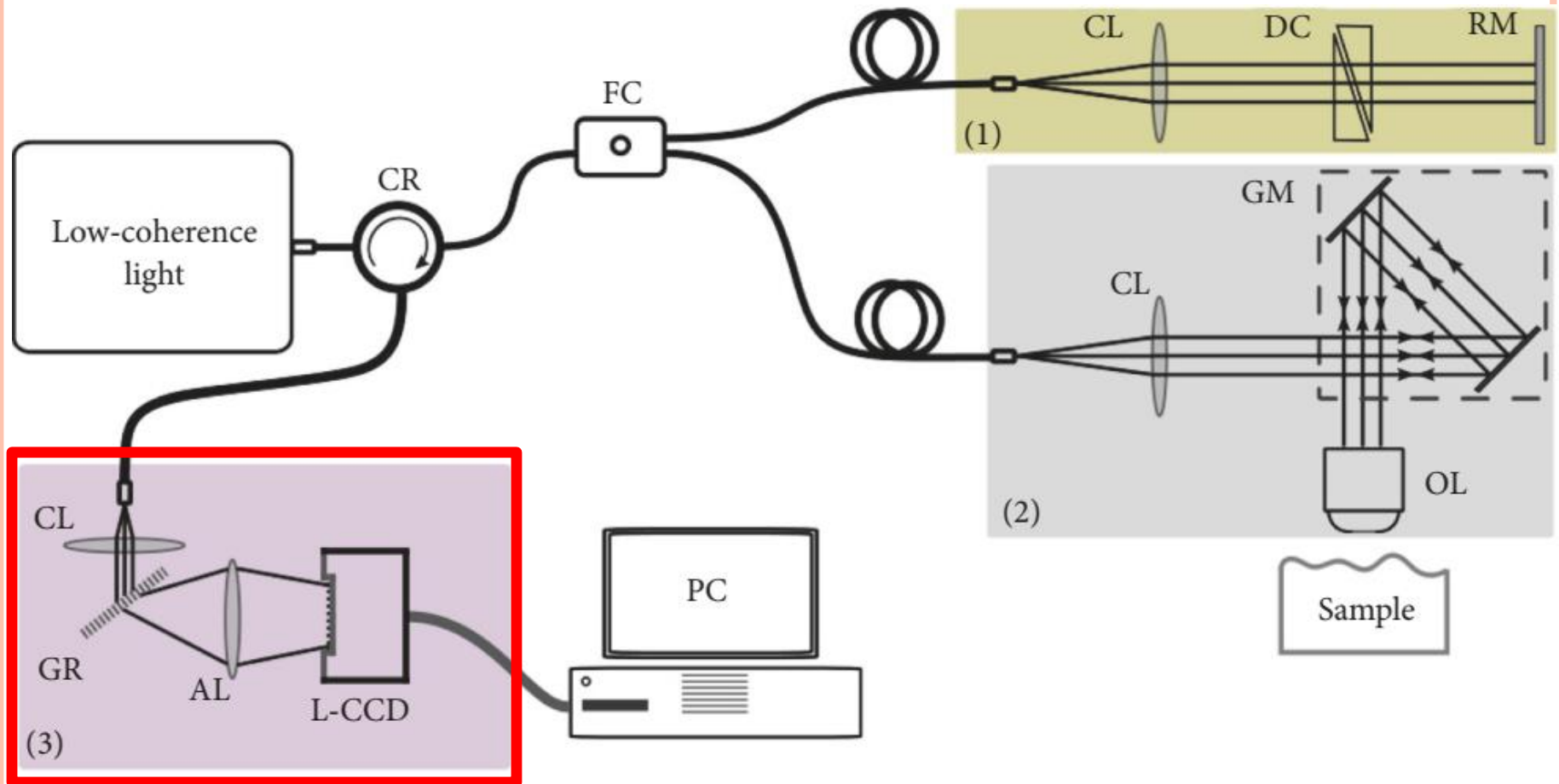


PFSQ10-03-M01
1" x 1"



PFSQ20-03-M01
2" x 2"

SPECTROMETER ARM



CL: collimating Lens
 DC: dispersion compensator
 RM: reference mirror
 GM: galvanometer mirror
 CR: fiber circulator
 FC: fiber coupler

OL: objective lens
 AL: infrared achromatic lens
 L-CCD: line CCD camera
 GR: transmission grating
 PC: personal computer

(1) Reference arm
 (2) Sample arm
 (3) Spectrometer

SPECTROMETER ARM

○ پرتو نوری بازگشتی از بازوی مرجع و بازوی نمونه در coupler با یکدیگر ترکیب شده و با استفاده از فیبر نوری به این بازو منتقل می شود.

○ این بازو از پنج جزء تشکیل شده است:

- Single Mode Fiber

- Collimator

- Diffraction Grating (DG)

- یک عدسی (یا تعدادی عدسی)

- Line detector

○ پرتو نور دریافت شده توسط فیبر نوری توسط collimator موازی سازی شده و سپس به DG منتقل می شود. در DG، پرتو نور به مولفه های تشکیل دهنده خود تفکیک شده و هر مولفه با زاویه متفاوتی به عدسی تابیده می شود.

SPECTROMETER ARM

- عدسی، مولفه های نوری تفکیک شده را به ناحیه فعال دوربین CCD خطی تصویر می کند.
- مشخصات این بازو تاثیر قابل توجهی در axial resolution و maximum depth دستگاه OCT دارد.
- در واقع پارامترهای زیر تاثیر قابل توجهی در عملکرد OCT دارد:
 - میزان تفکیک کنندگی DG
 - عملکرد عدسی تصویر کننده پرتوها بر روی دوربین
 - اندازه پیکسل دوربین

SPECTROMETER ARM → COLLIMATOR PACKAGE

Fixed Focus Collimation Packages: FC/APC Connectors

- ▶ Mates with FC/APC Connectors
- ▶ Simplifies Collimation of Output from Single Mode Fiber
- ▶ Collimated Beam Diameters Ranging from 0.63 mm to 4.05 mm
- ▶ Models Aligned at 13 Key Wavelengths from 405 nm to 4.55 μm



Fixed Focus Collimators Contain
One Factory-Aligned Aspheric Lens



F240APC-A
543 nm, Focal Length: 7.86 mm
Shown with Patch Cable



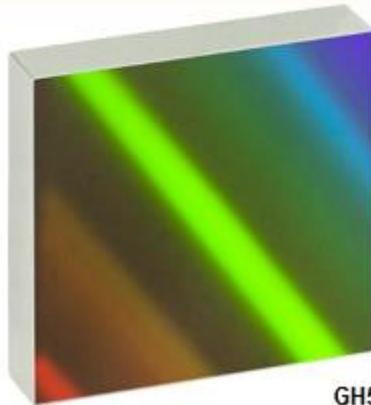
F220APC-1064
1064 nm, Focal Length: 11.17 mm

SPECTROMETER ARM → OPTICAL GRATING

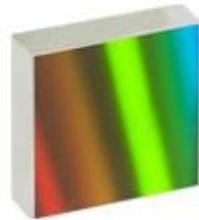
- در هنگام انتخاب DG باید به طول موج مرکزی و پهنای باند آن دقت شود.
- بازدهی DG در محدوده طول موج کاری آن باید مد نظر قرار گرفته شود.
- دو نوع DG به صورت رایج وجود دارد:
 - holographic grating
 - Blazed grating
- holographic grating کارایی بهتری در کل رنج طول موج کاری خود ارائه می دهد و در اکثر OCT ها مورد استفاده قرار می گیرد.

SPECTROMETER ARM → OPTICAL GRATING

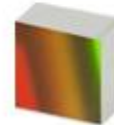
- ▶ Free from Random Spacing Errors
- ▶ Optimized for the UV and Visible Spectrum
- ▶ 45% to 65% Efficiencies



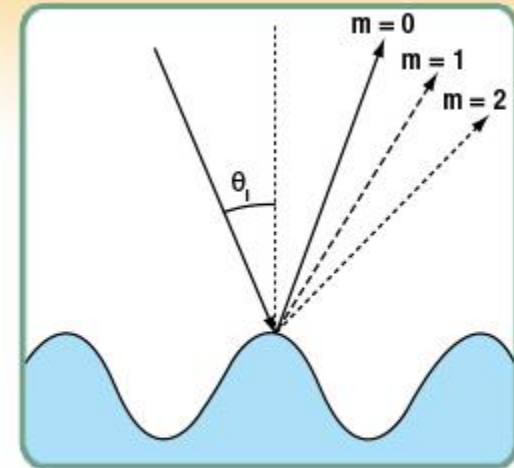
GH50-12V



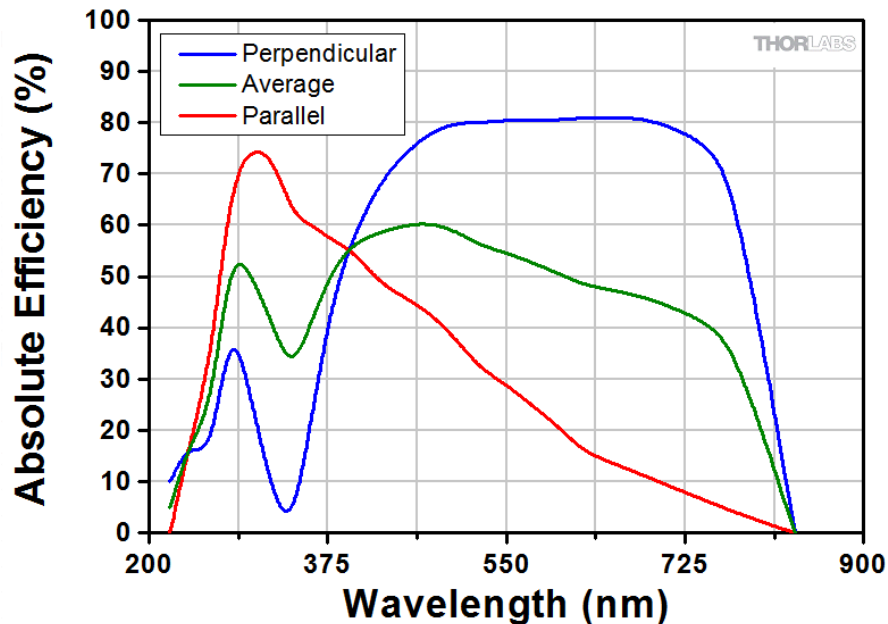
GH25-06U



GH13-06U



Visible Holographic Grating: 2400 Grooves/mm



SPECTROMETER ARM → LENS

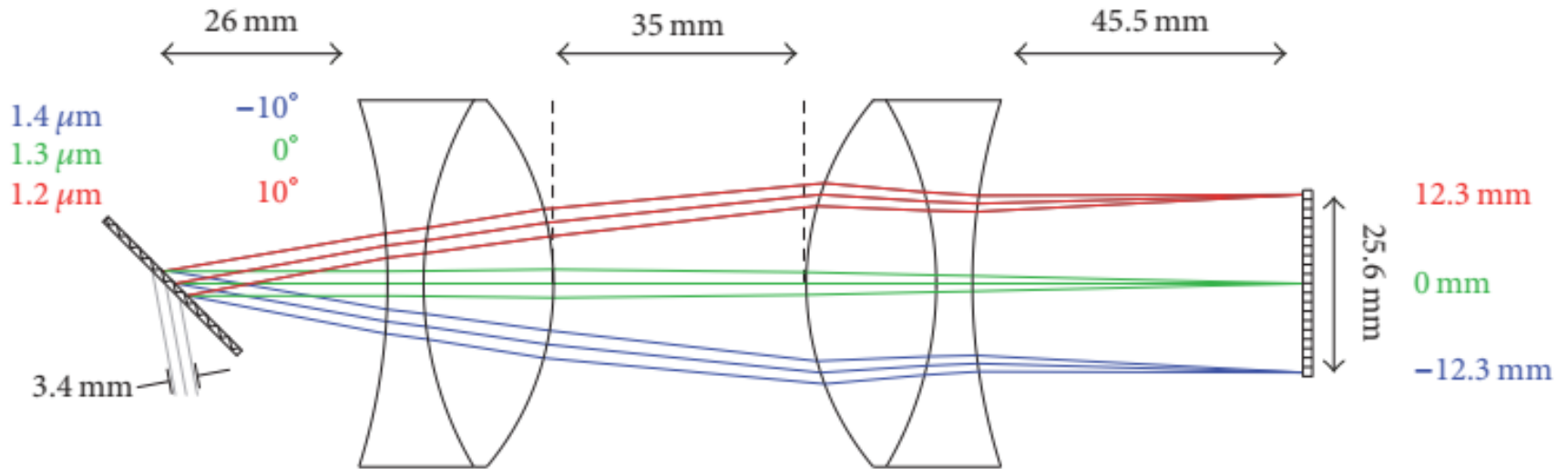
- عدسی استفاده شده در این قسمت به عنوان یک scan lens مورد استفاده قرار می گیرد. کلیه پرتو نورهای تولید شده توسط DG با زاویه های مختلف، وارد عدسی شده و در نقطه متفاوتی از detector تصویر می شود.
- دوربین CCD باید در نقطه کانونی عدسی قرار گیرد. بدین ترتیب اثر هر کدام از مولفه های نوری در یک قسمت خاص از دوربین نگاشت می شود.
- فاصله کانونی عدسی باید بگونه ای انتخاب شود که محدوده طول موج مورد نظر به طور کامل در دوربین تصویر شود. پهنای باند واقعی OCT برابر با محدوده طول موجی است که در این قسمت بر روی دوربین نگاشت می شود.
- اگر فاصله کانونی خیلی بزرگ باشد، عمق قابل دستیابی افزایش می یابد اما رزولوشن محوری کاهش می یابد.

SPECTROMETER ARM → LENS

- اگر فاصله کانونی کوچک باشد، قسمتی از پیکسل ها هیچ پرتو نوری دریافت نمی کنند. در نتیجه عمق نمونه برداری کاهش می یابد.
- پارامتر مهم دیگر، اندازه نسبی spot size پرتو نور ایجاد شده بر روی دوربین و اندازه پیکسل دوربین است. اگر spot size کوچکتر از اندازه پیکسل باشد مشکلی ایجاد نمی شود.
- spot size پرتو نور نسبت مستقیم با فاصله کانونی عدسی داشته و نسبت عکس با قطر پرتو نور موازی شده دارد.
- در عمل معمولاً از دو عدسی استفاده می شود که به صورت plossl compound قرار می گیرند.

SPECTROMETER ARM $\rightarrow$ LENS

Plossl compound



SPECTROMETER ARM → LENS

- ▶ Achromatic Performance with AR Coating for 400 - 700 nm
- ▶ Multi-Element Design Minimizes Spot Size
- ▶ Custom Achromatic Optic Available



AC508-180-A
f = 180 mm, Ø2"



AC254-080-A
f = 80 mm, Ø1"



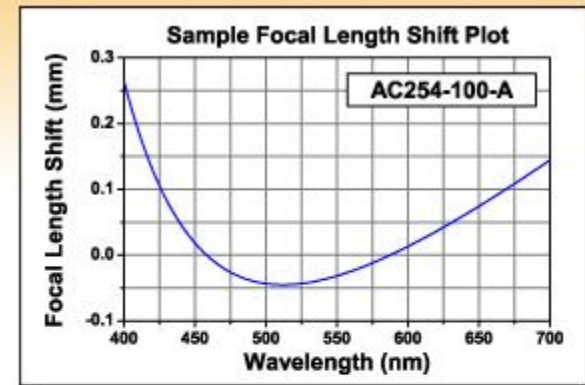
AC127-050-A
f = 50 mm, Ø1/2"



AC080-016-A
f = 16 mm, Ø8 mm



AC060-010-A
f = 10 mm, Ø6 mm



SPECTROMETER ARM → CCD

- عموماً عامل محدودیت نرخ اسکن در SD-OCT ها محدود بودن نرخ اسکن خط در دوربین است.
- علاوه بر این به منظور دستیابی به axial resolution مطلوب لازم است محدوده طیفی که توسط دوربین پشتیبانی می شود با باند طیفی منبع نور مطابقت داشته باشد. در غیر اینصورت پهنای باند کاهش می یابد.
- زاویه واگرا شدن مولفه های نور از DG نسبت خطی با طول موج آن مولفه ها ندارد. به عبارت دیگر، خروجی DG یک پاسخ غیرخطی نسبت به طول موج است. به همین دلیل قبل از انجام عملیات سری فوریه لازم است یک resampling برای داده ها انجام شود که طی آن داده ها از فضای λ به فضای k منتقل شوند.

SPECTROMETER ARM → CCD



**SENSORS
UNLIMITED**

FEATURES

- 91,911 lps for 1024 pixels at 12 bits
- Integrate-while-read snapshot acquisition
- Wavelength response over 0.8 μm to 1.7 μm with flat QE for 1.05 and 1.31 μm OCT
- 25 μm pixel pitch with aperture heights of 25 μm (defined by on-chip mask) or 500 μm
- 12-bit base Camera Link® compatible output and control

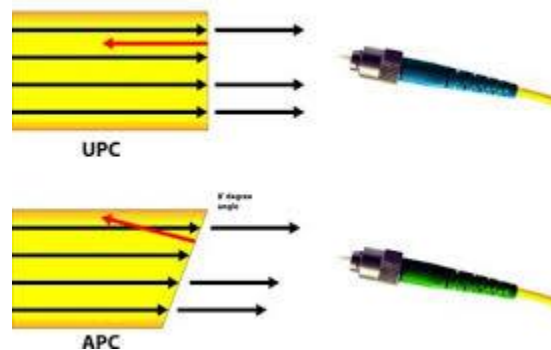
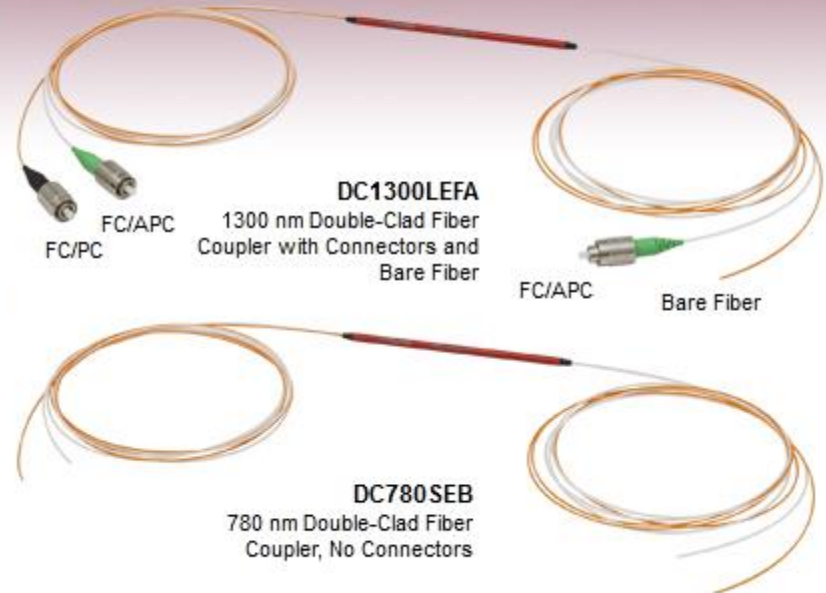
OPTICAL FIBER, CIRCULATOR, COUPLER

- به منظور منتقل کردن پرتو نور از یک قسمت به قسمت دیگر لازم است از single mode fiber استفاده شود. کانکتور اتصال تمام فیبرها باید از نوع APC باشد.
- به منظور مجزا کردن پرتو نور تولیدی منبع و ارسال آن به بازوهای نمونه و مرجع نیاز به coupler می باشد. همچنین به منظور برهم نهی پرتو نور بازگشتی از بازوی نمونه و مرجع نیاز به coupler است.
- اگر پرتو نور در محدوده طول موج مرئی نباشد به منظور قابل رویت شدن پرتو نور می توان یک لیزر رنگی به پرتو نور اضافه کرد. لذا به منظور انتقال پرتو نور برهم نهی شده به بازوی طیف نگار، نیاز به یک Circulator است.

FIBER COUPLER

2x2 Double-Clad Fiber Couplers

- ▶ Wideband Double-Clad Fiber Couplers for 530 nm, 780 nm, 1060 nm, or 1300 nm
- ▶ Ideal for OCT or Confocal Microscopy Applications
- ▶ Single Mode Core Insertion Loss: ≤ 0.5 dB
- ▶ At Least 60% Multimode Inner Cladding Transfer



CIRCULATOR

OCT Broadband Fiber Optic Circulator

- ▶ Polarization Independent
- ▶ 1280-1400 nm Operating Wavelength Range
- ▶ SMF-28e+ Fiber Pigtails with FC/APC Connectors

