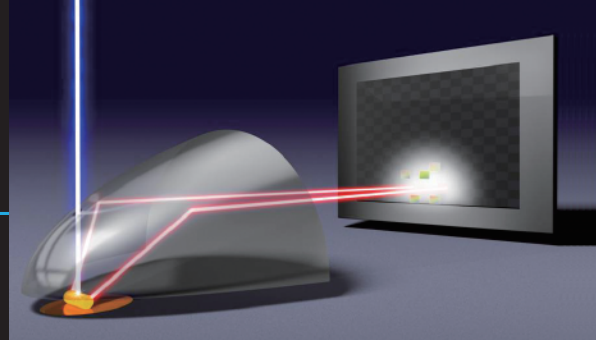


カソードルミネッセンスイメージング分光装置

SPARCはSEMに取付けるナノおよびマイクロフォトニック構造研究用の卓越した感度、操作性および複合機能を持つ高分解能角度分解型カソードルミネッセンスイメージング分光装置です。



SPARCは、SEMに接続し10nmより高い空間分解能でUV、可視光、IRスペクトル範囲を完全にカバーする高空間分解カソードルミネッセンスイメージング分光が行えます。

さらに、SPARCは放出される光の角度分解分光情報も合わせて提供します。組み込まれているピエゾでコントロールされるパラボリックミラーにより高効率な取込の定量測定を行うことができます。SPARCは他に類を見ない独特な組合せの装置です。

カソードルミネッセンス分光装置 ディープ・サブ波長空間分解能の情報

SEMの持つ確実にフォーカスされた電子ビームは、効率的に電子ビームの衝撃位置で双極子放射源のように振舞います。この電子ビームで発生する電場は、UV、可視光、IRスペクトル範囲にわたり、フォトニックモードおよびナノ・マイクロ構造の共振に励起エネルギーを与えます。

これらのモードと共振によって放射される光はSEMの電子ビームコラムと試料の間に設置されるパラボリックミラーにより取込まれます。SEMの電子ビーム径は容易に10nm以下に絞り込まれます。この技術は光学波長の50~100分の1にあたる10nm以下の空間分解能での光学分光を可能にします。

分光分析 光学状態の密度分布の測定

励起状態にある試料から放たれた光は収集され電子ビームの位置毎に分光されます。このようにして試料のエミッション二次元スペクトルマップは取り込まれます。

このマップは局所状態密度 (LDOS) をダイレクトに測定します。LDOSは広範囲の波長で40nm以下の空間分解能にて測定することができます。

SPARCの能力

SPARCはディープ・サブ波長の分解能でナノ・マイクロ構造のフォトニック研究に適した真に独特な分析手法です。

金属質 (プラズモニック、Ag、Au、etc)、誘電体 (SiO₂、Si₃N₄、TiO₂、etc) や半導体 (Si、GaAs、CdTe、etc) のマイクロ・ナノフォトニック構造およびその関連材料の研究に有用です。

共鳴モードスペクトル

モード電磁界分布

導波管モード分散

フォトニック結晶バンド構造

フォトニック結晶キャビティモード

光局在

ナノ構造における光学的ホットスポット

量子ドットからのエミッション

レアアースドープ構造からのエミッション

光学材料の欠陥

光アンテナ放射プロファイル

レーザー、LEDからのエミッションプロファイル

角度分析 運動量分光

SPARCはミラーを通じ放射された光ビームプロファイルを記録するイメージ用CCDカメラを備えています。このプロファイルより試料からの角度分解された放射パターンが得られ、励起位置でのすべての周波数で決められた平面の波長ベクトルを測定する運動量分光を行います。

この技術により、10nm以下のスポットサイズの空間分解能で周期的および非周期的な局所バンド構造が測定されます。

完全なアライメントと高感度測定のための新しいデザイン

カソードルミネッセンス分光の効率的な検出は検出器の位置合わせと取り込まれる感度が重要です。

SPARCの3つの独特な設計の特徴は次の通りです。

取込み角の大きい (1.46 π sr.) ダイヤモンドターニング加工のハーフパラボリックミラーを採用し、広範囲のスペクトルバンド幅に対し、大部分の色収差や球面収差のない操作が行えます。

高精度4軸ピエゾアライメント機構により電子ビームの衝撃位置に集光ミラーの焦点位置合わせを行います。これはスタンダードな定量測定と角度分解CLモードの定量測定を行う上で双方の測定ともに必須な機構です。

測定試料から得られた光は、分光器に光を効率良く導くマルチモードオプティカルファイバーにつなげられます。この配置は分光器のアライメントからミラーシステムのアライメントに分けられ、信頼性の高い光の取込を確実にします。

SPARCのSEMへの接続

SPARCはSEMの真空試料室の1つのフランジに取付けられます。軽量のオプティカルボードが直接SEMのフランジに接続され、測定試料とSPARCの光学系が同一の振動を受けるプラットフォーム上に載せられます。チタン製高精度ミラーステージは真空試料室内のSEM試料ステージ上に取付けられます。ミラーステージの取付けおよび取外しは通常5分以内で行うことができます。

なお、位置合わせ用のソフトウェアが標準で含まれています。定量CL測定ができるように詳細な取扱説明書が付属されています。

SPARCは主なSEMに接続されます。(注意：取付けられないSEMもございますのでご検討の際には必ずお問い合わせください。) 専用のフランジアッセンブリーがSEMのフランジに合わせ設計されます。SEMとSPARCのソフトウェア用の駆動信号がSEMの外部でx-yスキャン入力インターフェースでつなげられています。

ユーザーフレンドリーな操作性と専用のソフトウェア

カソードルミネッセンス分光は比較的短時間で非常に多くのデータ (x、y波長、感度、角度、偏極) が取得できます。専用のソフトウェアが2極放射マップ、角度発光プロファイル、および、その他データからのクロスカットデータ作成用に供給されています。SPARCはオランダ アムステルダムのFON-Institute AMOL (www.erbium.nl/arcis.html) にて、開発されました。

3つの主な文献

- Angle-resolved cathodoluminescence imaging spectroscopy
T. Coenen, E.J.R. Vesseur, and A. Polman, Appl. Phys. Lett. 99,143103 (2011)
- Plasmonic whispering gallery cavities as optical nanoantennas
E.J.R. Vesseur and A. Polman, Nano Lett. 11,5524 (2011)
- Deep-subwavelength spatial characterization of angular emission from single-crystal Au plasmonic ridge nanoantennas
T. Coenen, E.J.R. Vesseur, and A. Polman, ACS Nano Doi: 10.1021/nn204750d (2012)

* 本仕様および内容は予告なしに変更されることがございます。

測定例

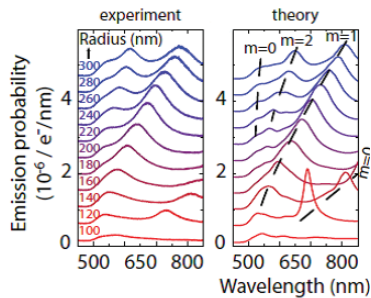
SPARCは光学イメージとディープ・サブ波長空間分解能の情報を持つ運動量分光を行う真の複合分析装置です。

スペクトル、空間および角度分解と感度の実証例

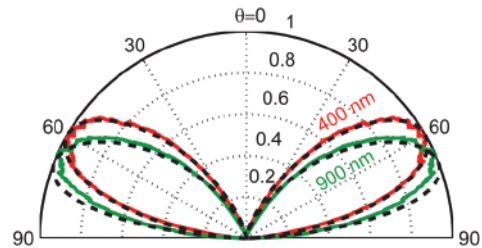
(すべてのデータはFEI社XL-30 FE-SEM、加速エネルギー30KeVにて測定。データご提供元 The Polman group, AMOLF)

CLEミッションスペクトル

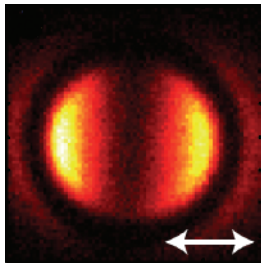
直径（垂直軸の絶対目盛）の異なる共鳴プラズモニックリングキャビティのCLEミッションスペクトルと相当する計算されたスペクトルが良く一致していることが示されています。



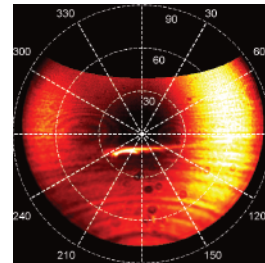
2極放射パターンを反映している2種類の波長(400, 900nm)における単結晶Au表面(遷移放射)の角度放出分布。橙色と緑色で表す実測値と破線で表す理論値が優れた一致を示しています。



Au表面上のプラズモニックリングキャビティ $\lambda=800\text{nm}$ 分極化されたエミッション (イメージサイズ800nm×800nm)

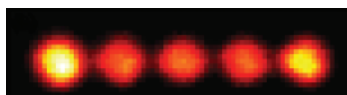


Auナノ粒子のオプティカルYagi-Udaアンテナ $\lambda=500\text{nm}$ における放出方位。右側に向かいエMISSIONの増加が観測されます。



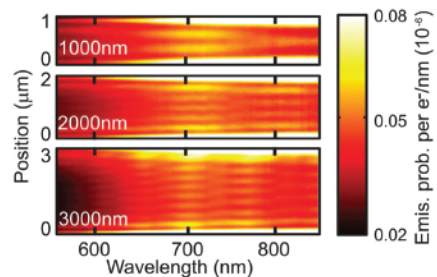
オプティカルYagi-Udaアンテナの $\lambda=600\text{nm}$ 2次元CLエMISSIONマップ

粒径100nmのAu 5粒子のマップ (イメージサイズ200nm×800 nm)



プラズモニック定在波のCL ラインスキャン

Au表面の3種類の異なるキャビティ幅(1000, 2000, 3000nm) のファブリペローキャビティそれぞれのポジションで完全なCLスペクトルが取り込まれています。



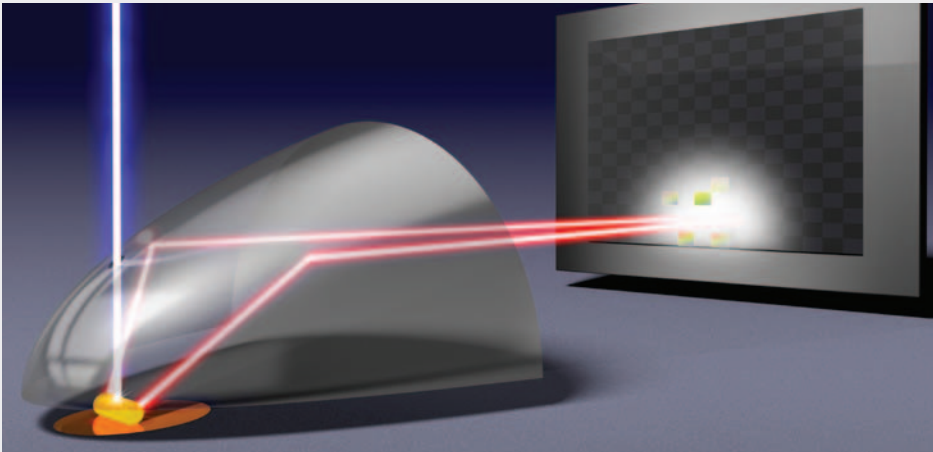
* 本仕様および内容は予告なしに変更されることがございます。

S P A R C

delmic

SPARC

is a cathodoluminescence imaging system for the study of nano- and micro-photonics structures that offers unsurpassed sensitivity, control and versatility.



High-resolution angle-resolved cathodoluminescence imaging spectroscopy

The SPARC system enables spatially-resolved cathodoluminescence (CL) imaging spectroscopy with less than 10 nm spatial resolution over the entire UV-VIS-IR spectral range. In addition, it offers angle-resolved spectroscopy of the emitted radiation. Equipped with a piezoelectrically controlled parabolic mirror alignment stage it enables quantitative measurements with high collection efficiency. No other commercial system offers this unique combination of features.

Cathodoluminescence spectroscopy: deep subwavelength spatial resolution

A scanning electron microscope's tightly focused electron beam effectively behaves like a radiating dipole source at the electron impact position. The electric field generated by the electron beam excites the photonic modes and resonances of a photonic nano and micro-structure over a spectral range spanning the entire UV-VIS-IR spectral range. Optical radiation from these modes and resonances is collected by a parabolic mirror placed between the sample and the electron beam column in the electron microscope. The electron beam can be easily focused to a spot size smaller than 10 nm. This technique enables optical spectroscopy at a spatial resolution smaller than 10 nm, which is 50-100 times smaller than the optical wavelength.

Spectral analysis: measuring the local density of optical states

The collected radiation from the excited sample is spectrally analyzed for every electron beam position. In that way a two-dimensional spectral

map of the object's emission is recorded. This map is a direct measure of the local density of optical states (LDOS). The LDOS can be determined with a spatial resolution of less than 40 nm at virtually any wavelength.

SPARC capabilities

The SPARC system offers a truly unique method to investigate photonic nano- and micro- structures at deep-subwavelength resolution. It can be used to study metallic (plasmonic, Ag, Au, etc.), dielectric (SiO₂, Si₃N₄, TiO₂, etc.) and semiconductor (Si, GaAs, CdTe, etc.) micro- and nano-photonics structures and serves to investigate:

resonant mode spectra
modal field distributions
waveguide modal dispersion
photonic crystal band structure
photonic crystal cavity modes
localization of light
optical hot spots in nanostructures
emission from quantum dots
emission from rare-earth-doped structures
defects in optical materials
optical antenna radiation profiles
emission profiles from lasers, LEDs

Angular measurements: momentum spectroscopy

The SPARC system is also equipped with an imaging CCD camera that records the optical beam profile emitted from the mirror. From this profile the angle-resolved radiation pattern from the sample can be derived, enabling momentum spectroscopy: measuring the in-plane wave vector of light at every frequency and excitation position. Using this

technique the local band structure of periodic and aperiodic structures can be determined with a spatial resolution less than 10 nm.

SPARC: new design for perfect alignment and high sensitivity

Efficient detection of the cathodoluminescence emission places stringent demands on the alignment and sensitivity of the collection and detection system.

The three unique design features of the SPARC system are:

The diamond-turned half-parabolic mirror has a very high collection angle (1.46 π sr.) and operates without major chromatic and surface aberrations over a large spectral bandwidth.

A 4-axis piezoelectric precision alignment system is used to align the focus of the collection mirror with the impact position of the electron beam. This is essential to perform quantitative measurements both in standard and angle-resolved CL modes.

Light that is collected from the sample is coupled to a multimode optical fiber that efficiently guides it to a spectrometer. This configuration separates the alignment of the mirror system from the alignment of the spectrometer and ensures a reliable high-yield collection system.

SPARC integration with SEM

The SPARC system is mounted on one of the flanges of the vacuum sample chamber of a scanning electron microscope (not included). A light-weight optical board is directly mounted on the SEM flange, ensuring that sample and SPARC optics are on the same vibrational platform. The titanium precision mirror stage is mounted onto the sample stage of the SEM inside the vacuum chamber. Mounting and unmounting the mirror stage can be done within five minutes. Special software for alignment is included. Detailed instructions for calibration are provided to enable quantitative CL measurements.

The SPARC system can be combined with almost any SEM. A dedicated flange assembly is designed corresponding to the SEM flange geometry. Driving signals for the SEM and SPARC software are interfaced with the external x-y scan input of the SEM.

User-friendly operation, dedicated analysis software

Cathodoluminescence spectroscopy provides very large data sets (x, y, wavelength, intensity, angle, polarization) in a relatively short period of time. Dedicated software is provided to make two-dimensional radiation maps, angular radiation profiles and other cross cuts through the data.

The SPARC system is based on the instrument developed at the FOM-Institute AMOLF in Amsterdam, the Netherlands (www.erbium.nl/arcis.html).

Three key publications are:

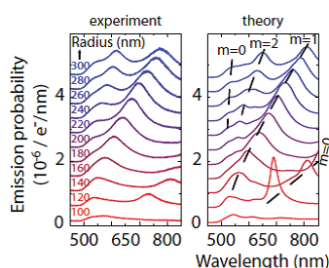
- Angle-resolved cathodoluminescence imaging spectroscopy
T. Coenen, E.J.R. Vesseur, and A. Polman, Appl. Phys. Lett. 99, 143103 (2011)
- Plasmonic whispering gallery cavities as optical nanoantennas
E.J.R. Vesseur and A. Polman, Nano Lett. 11, 5524 (2011)
- Deep-subwavelength spatial characterization of angular emission from single-crystal Au plasmonic ridge nanoantennas
T. Coenen, E.J.R. Vesseur, and A. Polman, ACS Nano DOI: 10.1021/nn204750d (2012)

EXAMPLE MEASUREMENTS

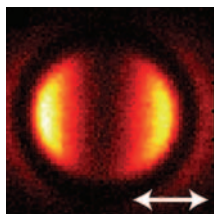
Demonstrating spectral, spatial and angle-resolved sensitivity.

SPARC is a truly versatile instrument that enables optical imaging and momentum spectroscopy at deep-subwavelength resolution

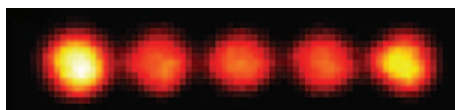
CL emission spectra from resonant plasmonic ring cavities with different diameters (note the absolute scale on the vertical axis) and the corresponding calculated spectra, showing good agreement



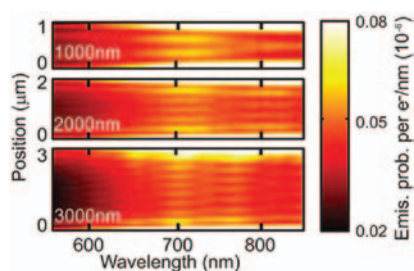
Spatially-resolved polarized emission at $\lambda=800$ nm from a plasmonic ring cavity on a Au surface, showing a dipolar mode (image size 800 x 800 nm)



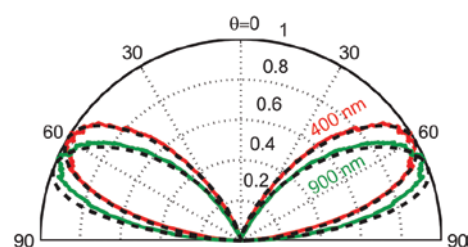
2D CL emission map at $\lambda=600$ nm from an optical Yagi-Uda antenna composed of five 100-nm-diameter Au particles (image size 200 x 800 nm)



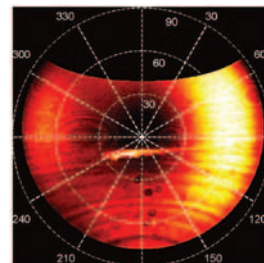
CL line scan of plasmonic standing waves in Fabry-Perot cavities on a Au surface with three different cavity widths (1000, 2000, 3000 nm), a full CL spectrum is taken at every position



Angular emission distribution from a single-crystal Au surface (transition radiation) at two different wavelengths (400, 900 nm), reflecting a dipolar radiation pattern, experiment (color) and theory (dashed lines) are in excellent agreement



Directional emission at $\lambda=500$ nm from a Au nanoparticle optical Yagi-Uda antenna excited at the left-outmost particle, with emission observed towards the right.



All measurements are taken using a 30 keV electron beam in an FEI XL-30 field-emission SEM.

All pictures courtesy of the Polman group, AMOLF.

It enables studies at the frontiers of optical science

SPARC

Specifications & options

Mirror assembly

- Titanium precision translation/rotation stage with mirror mount
- Piezoelectric stepper motors with computer-controlled drivers:
 - x, y accuracy < 10 nm; θ , φ accuracy < 1 μ rad
- Diamond-turned Al-coated half-parabolic precision mirror, collection angle 1.46π sr, surface roughness < 20 nm

Optical analysis system

- Lightweight optical board in light-tight enclosure with SEM mounting assembly
- High-quality coated mirrors and achromat lens (400-1700 nm)
- Electrically controlled flip mount for remote switching between imaging and angular CL modes
- Filter holder with filters for angle-resolved measurements (50 nm band pass)
- Polarization analyzer
- Fiber coupling assembly

Spectrometer/detectors

- Computer-controlled fiber-coupled Czerny-Turner optical spectrometer with 3 custom interchangeable gratings
- Thermoelectrically cooled ultraviolet-visible Si CCD array detector ($\lambda=400-900$ nm) and/or thermoelectrically cooled infrared InGaAs CCD array detector ($\lambda=900-1700$ nm)
- Photomultiplier tube for ultra-fast alignment and video-rate CL mapping ($\lambda=300-900$ nm)
- 1024 x 1024-pixel thermoelectrically cooled CCD camera system for angle-resolved CL acquisition

Data acquisition

- Spectroscopy mode
 - 1D and 2D hyperspectral imaging
 - Dwell time per e-beam position: 1 μ s – 1 s
 - Spectral resolution: < 1 nm
- Angle-resolved mode
 - Angular collection range: up to 1.46π sr
 - Angular resolution: < 10 mrad
 - Spectral resolution: depending on filter band width (typically: 50 nm)

- Simultaneous acquisition of secondary electron and cathodoluminescence signals
- Measurement of polarization-resolved spatial and angular distributions

Hardware

- Design of a dedicated flange assembly for integration with the SEM
- Computer for spectrometer grating control, read-out of CCD detectors and imaging CCD camera, interfacing with SEM x-y external input, controlling mirror stage, and read-out of PMT.
- Drivers and power supplies for piezoelectric stepper motors, spectrometer, CCD detectors, CCD imaging camera, PMT.

Software / data analysis

- Control and alignment of mirror stage
- Plotting 1D and 2D spectral images, crosscuts through spatial and angular data, comparison with SEM images, plotting angular radiation distributions

All specifications are subject to change and may vary depending on SEM type. Please inquire whether your SEM is suitable for fitting with a SPARC system.

We aim
to customize.

Contact Delmic

Please contact us for inquiries about availability.

E-mail us or call [Sander den Hoedt](mailto:info@delmic.com).

(e) info@delmic.com
(t) +31 6 28961267
(w) www.delmic.com

We are always interested in your comments and suggestions.