QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE · DISSIPATION MONITORING

سامانهٔ اندازه‌گیری QCM-D

اتصال مولکولی، نرمی لایه و جریان مایع را همان لحظه‌ای که رخ می‌دهند ببینید.

نانو فن اوران شریف الکترونیک — SNET · Nano Fan Avaran Sharif Electronic

نرم‌افزار: QCM Tracker 1.1.0 · Windows



۰۱ — مروری بر سامانه

اتصال مولکول‌ها، نرم شدن لایه‌ها و غلیظ شدن مایعات را زنده ببینید.

سامانهٔ QCM-D Tracker تشدید یک کریستال کوارتز 5 MHz را در هوا یا مایع دنبال می‌کند. هر تغییر در فرکانس (Δf) و اتلاف (D) نشان می‌دهد چه مقدار روی سطح نشسته و چقدر نرم است؛ بدون برچسب‌گذاری و بدون انتظار برای نقطهٔ پایان.



تصویر ۱ — نمای کلی سامانه: دستگاه QCM-D و پنل جلویی آن (نمایشگر و کانکتورها).

5 MHz

کریستال کوارتز، تشدید پایه (fundamental)

5

کانال QCM روی یک پورت سریال، با ردیابی هم‌زمان

17.7

ng/cm² جرم به‌ازای هر هرتز در 5 MHz (Sauerbrey)

±1σ

عدم‌قطعیت گزارش‌شده برای هر پارامتر برازش‌شده

بدون برچسب و بلادرنگ (Label-free)

جذب سطحی، اتصال و انعقاد را در حین عبور نمونه پیوسته دنبال کنید؛ بدون تگ، بدون رنگ و بدون سنجش نقطهٔ پایان.

جرم و نرمی با هم

فرکانس بار روی کریستال را نشان می‌دهد؛ اتلاف مشخص می‌کند لایه یک فیلم صلب است یا لایهٔ نرم و آبدار (hydrated).

مبتنی بر فیزیک

هر فریم با مدار معادل Butterworth–Van Dyke برازش می‌شود؛ پس نتایج از یک مدل می‌آیند، نه از پیک‌یابی ساده.

۰۲ — اصل کار

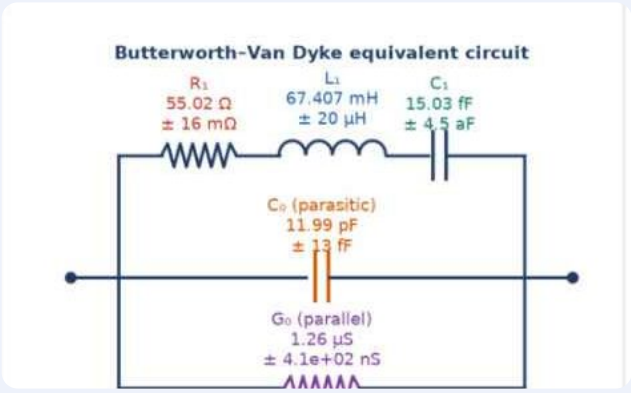
از منحنی تشدید تا نتیجه، در چهار گام

۰۱ · اسکن (Scan)
جاروب درشت در بازهٔ 10 kHz حول 5 MHz تشدید را پیدا می‌کند. پنجره‌های زوم تطبیقی آن را تا ثابت شدن f_0 دقیق‌تر می‌کنند.

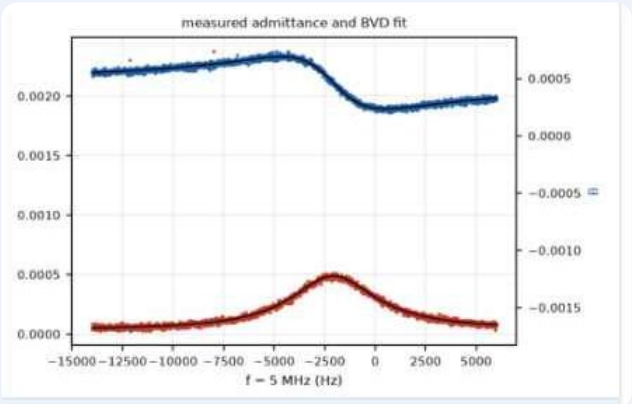
۰۲ · برازش (Fit)
هر فریم با مدار BVD برازش می‌شود: R_1، L_1، C_1 برای کریستال؛ C_0، G_0 و فاز φ برای کابل‌ها و مایع.

۰۳ · ردیابی (Track)
Δf و $D = 1/Q$ با خطای 1σ دنبال می‌شوند. اسپایک‌ها حذف می‌شوند و کانال مرجع اثر دما و bulk را برمی‌دارد.

۰۴ · تحلیل (Analyse)
پاسخ زمانی، جرم Sauerbrey، چگالی–گرانروی، FWHM و سینتیک اتصال. خروجی جدول و نمودار.



تصویر ۲ — مدار معادل زندهٔ یک کریستال در هوا، با مقادیر برازش‌شده و عدم‌قطعیت 1σ.



تصویر ۳ — رسانایی G و سوسپتانس B (نقطه‌ها) با برازش مدل (خط‌ها) برای تشدید به‌شدت میرا.

چرا مدار معادل؟
برازش کل طیف ادمیتانس شاخهٔ حرکتی کریستال (R_1، L_1، C_1) را از عناصر پارازیتی کابل و مایع (C_0، G_0، φ) جدا می‌کند. Δf و D از مدل به دست می‌آیند و هرکدام نوار خطا دارند.

خواندن سیگنال‌ها

Δf (Hz)	جابه‌جایی تشدید. با بارگذاری جرم یا مایع روی کریستال کاهش می‌یابد.
D (×10⁻⁶)	اتلاف، $D = 1/Q$: انرژی تلف‌شده در هر چرخه. با لایه‌های نرم، ویسکوز یا آبدار افزایش می‌یابد.

Δm (ng/cm²)	جرم Sauerbrey: Δm = −C·Δf / n با C = 17.7 ng·cm⁻²·Hz⁻¹ در 5 MHz. فقط برای فیلم‌های نازک و صلب معتبر است؛ در مایع، Δf و D را با هم بخوانید.

۰۳ — سامانه

دستگاه، سنسور، سیالات و نرم‌افزار — یک جریان کار

Sensor stage → Instrument → QCM Tracker → Results

مرحله‌ها: کریستال‌ها در فلوسل ← دستگاه (جاروب و ثبت G(f) و B(f)) ← QCM Tracker (برازش، ردیابی، تحلیل) ← نتایج (نمودار، جدول، سینتیک).

دستگاه (Instrument)

هر کریستال را در عرض تشدیدش تحریک می‌کند و در هر نقطهٔ فرکانسی رسانایی G و سوسپتانس B را برمی‌گرداند. سه کانکتور کریستال (QCM 1–3) با نشانگرهای توان، داده و وضعیت.

پایهٔ سنسور و فلوسل‌ها

تا سه کریستال در فلوسل‌های آب‌بندی‌شده روی یک صفحهٔ پایه، به‌صورت سری به یک خط پسماند.

سیالات (Fluidics)

پمپ سرنگی نمونه و بافر را با نرخ جریان کنترل‌شده به فلوسل‌ها می‌رساند.

نرم‌افزار QCM Tracker

اسکن، برازش، ردیابی و تحلیل هر کانال به‌صورت بلادرنگ — روی داده زنده یا فایل ذخیره‌شده.

طرح کانال‌ها (Channel plan)

CH1, CH2, CH3: active · CH4: optional (reference) · CH5: optional

یک پورت سریال، اندازه‌گیری به‌صورت متوالی. یک کریستال مرجع فقط‌بافر را می‌توان از بقیه کم کرد.

اتصال به روش دلخواه

خواندن از پورت سریال در حالت دستور (command mode؛ نرم‌افزار پنجرهٔ جاروب را تعیین می‌کند) یا حالت جریانی (streaming mode)، یا بازکردن فایل ذخیره‌شده با فرمت `.txt` `.csv` `.npz` .

- پورت COM سریال، به‌طور پیش‌فرض 115,200 baud
- خطوط پاسخ: `f,R,X` · `f,|Z|,phase` · `f,G,B`
- واحد فرکانس و نشانگر پایان قابل انتخاب
- الگوی دستور جاروب قابل ویرایش



Fig. 4 — Scan 5 MHz: data-source settings.

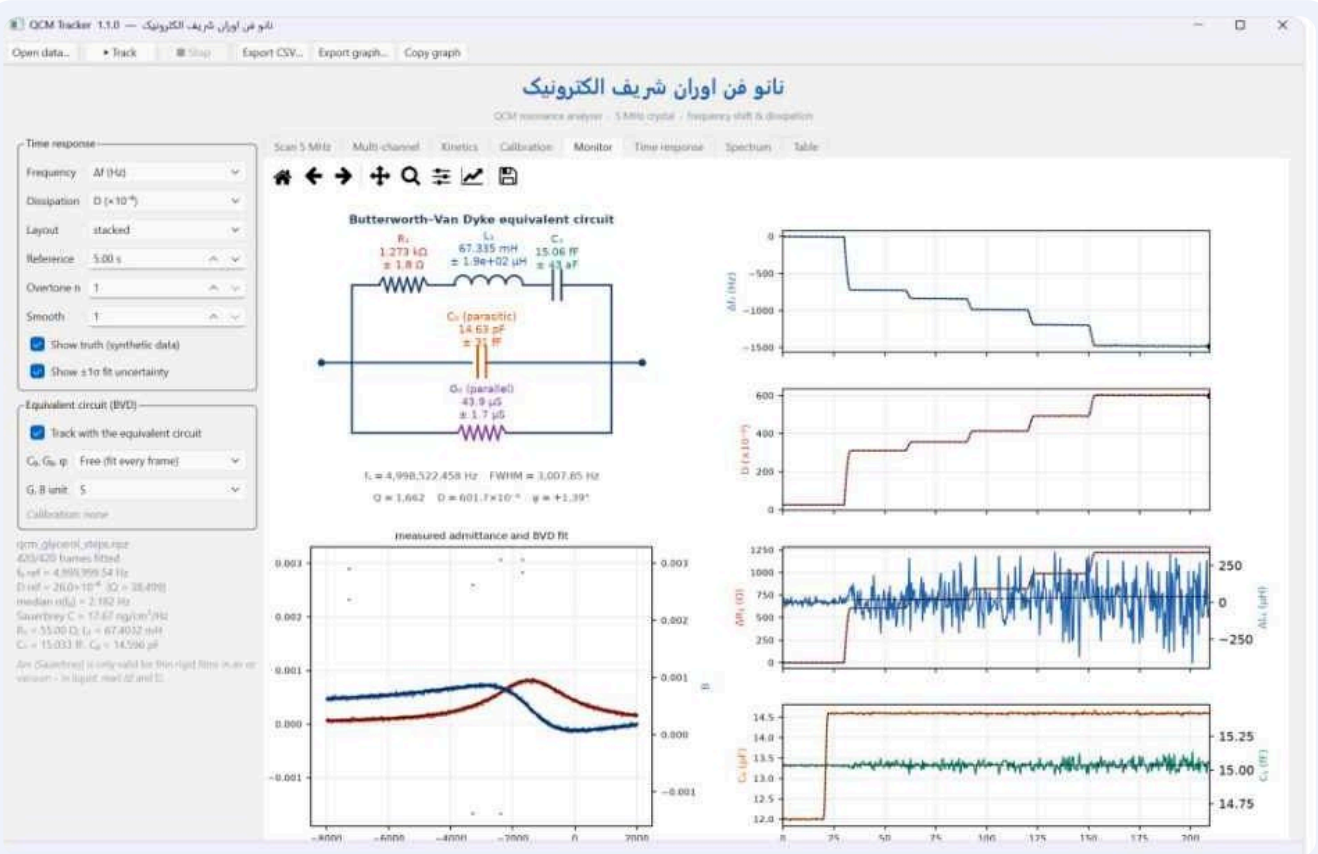
تصویر ۴ — Scan 5 MHz: تنظیمات منبع داده (data source).

`SWEEP 2 4995000 5005000 501` ← `SWEEP {ch} {start} {stop} {n}`

۰۴ — نرم‌افزار QCM Tracker

هشت فضای کار. یک تصویر روشن.

برنامهٔ مستقل ویندوز: مدار، طیف و پاسخ‌های زمانی در کنار هم، و هر مقدار برازش‌شده همراه با عدم‌قطعیتش.



تصویر ۵ — QCM Tracker 1.1.0، فضای کار Monitor: مدار معادل، برازش ادمیتانس و چهار ردّ زمانی (Δf، ΔR₁/ΔL₁، C₀/C₁، D) روی دادهٔ پله‌های گلیسرول.

Scan 5 MHz
یافتن تشدید با جاروب درشت و زوم تطبیقی.

Multi-channel
تا پنج QCM هم‌زمان، هرکدام با مدار مخصوص خود.

Kinetics
برازش سراسری Langmuir ۱:۱: ka، kd، KD، Rmax و رتبه‌بندی.

Calibration
مرجع هوا و آب، ذخیره و بارگذاری به‌صورت JSON.

Monitor
شمای زندهٔ مدار، برازش ادمیتانس و ردهای کلیدی.

Time response
Δf، Δm، D، Q و FWHM بر حسب زمان.

Spectrum
G و B اندازه‌گیری‌شده با مدل برازش‌شده، فریم به فریم.

Table
همهٔ نتایج به‌صورت عددی، آمادهٔ خروجی CSV.

آنچه می‌بینید را تنظیم کنید

شمارهٔ اورتون (overtone)، هموارسازی، زمان مرجع، چیدمان stacked یا overlaid، نوارهای عدم‌قطعیت ±1σ و انتخاب واحد برای هر محور.

با خودتان ببرید

جدول‌ها به CSV و نمودارها به PNG، SVG یا PDF صادر می‌شوند، یا نمودار را مستقیم در گزارش و اسلاید کپی کنید.

۰۵ — کاربردها · گرانروی و خون

مایعاتی که غلیظ می‌شوند. خونی که لخته می‌شود.

گرانروی (Viscosity) از پله‌های گلیسرول

آب، سپس گلیسرول ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، هر ۳۰ ثانیه یک پله. با افزایش حاصل‌ضرب گرانروی–چگالی، Δf پله‌پله کاهش و D و R_1 هم‌زمان افزایش می‌یابند؛ پلکانی تمیز که رابطهٔ Kanazawa–Gordon آن را به $\eta\cdot\rho$ تبدیل می‌کند.

تصویر ۶ — Δf، D، $\Delta R_1/\Delta L_1$ و C_0/C_1 در ۲۰۰ ثانیه.

−1,500	602	1.27
Δf, Hz	D, $\times 10^{-6}$	R_1, kΩ

انعقاد خون (Hemostasis) در لحظه

یک قطره خون در ثانیهٔ ۳۰ می‌نشیند و Δf یکباره حدود 1,500 Hz افت می‌کند. با تشکیل لخته، فیلم ضخیم و سفت می‌شود: Δf به حدود −2,100 Hz می‌رسد، D از ≈600 به ≈1,030 $\times 10^{-6}$ بالا می‌رود و پهنای تشدید به FWHM ≈ 5.2 kHz می‌رسد. تشکیل لخته از ≈150 تا 220 ثانیه.

تصویر ۷ — افت در ثانیهٔ ۳۰؛ تشکیل لخته از ≈150 تا 220 ثانیه.

−2,100	1,033	2.20
Δf, Hz	D, $\times 10^{-6}$	R_1, kΩ

مستقیم بخوانید: زمان شروع (onset)، سفتی لخته (سطح Δf و D) و پهن‌شدگی قلهٔ تشدید (FWHM). یک کنترل بدون لخته را روی کانال دوم اجرا کنید تا کنار هم مقایسه شوند.

لیپوپروتئین · LDL

به‌صورت لایهٔ نرم، ضخیم و آبدار جذب می‌شود: تغییر اتلاف زیاد به‌ازای هر هرتز، تا حدی برگشت‌پذیر با شست‌وشو.

لیپوپروتئین · HDL

فیلم کوچک، چگال و صلب: شبیه Sauerbrey، تقریباً بدون تغییر اتلاف، با سینتیک سریع‌تر.

۰۶ — کاربردها · کشف دارو

کاندیداها را بر اساس شدت و مدت اتصال رتبه‌بندی کنید.

سه کاندیدای آنتی‌بادی روی CH1–CH3 و کنترل بدون آنتی‌ژن روی CH4. تزریق‌های تک‌چرخه از ۱ تا ۱۰۰ نانومولار، سپس 1,500 ثانیه تفکیک (dissociation). یک برازش سراسری ۱:۱ Langmuir برای هر کاندیدا KD، kd، ka و Rmax را برمی‌گرداند.

تصویر ۸ — Δf− اصلاح‌شده با مرجع (نقطه‌ها) و برازش (خط)؛ پنل‌های ۱ تا ۳ همان CH1 تا CH3 (کاندیداهای A تا C) هستند.

Candidate	KD fitted	KD true	ka ($M^{-1}s^{-1}$)	kd (s^{-1})	t½	Rmax (Hz)
A · CH1	0.62 nM	0.5 nM	1.96×10^{5}	1.21×10^{-4}	95.6 min	30.9
B · CH2	10.3 nM	10 nM	9.64×10^{4}	9.94×10^{-4}	11.6 min	29.2
C · CH3	90.6 nM	100 nM	5.19×10^{4}	4.70×10^{-3}	2.5 min	28.6

رتبه‌بندی درست، با نوار خطا

KD برازش‌شده برای همهٔ کاندیداها در محدودهٔ ۲۵٪ مقدار واقعی است و ترتیب A > B > C حفظ می‌شود. هر پارامتر عدم‌قطعیت خود را دارد.

چرا کانال کنترل؟

CH4 آنتی‌ژن ندارد. کسر کردن آن اثر جریان، bulk و دما را حذف می‌کند، پس آنچه برازش می‌شود اتصال اختصاصی است.

۰۷ — چندکاناله و اطمینان

تا پنج کریستال، یک مرجع، بدون حدس و گمان.

کانال‌ها به‌صورت متوالی روی یک پورت سریال جاروب می‌شوند و پنجرهٔ جاروب هر کانال تشدید خودش را دنبال می‌کند. یک کریستال مرجع فقط‌بافر اثر دما، bulk و جریان مشترک میان همهٔ کریستال‌ها را حذف می‌کند.

تصویر ۹ — روی‌هم‌گذاری چندکاناله پس از کسر مرجع: ΔD(t)، Δf(t)، مسیر ΔD–Δf و ΔR₁(t) برای کاندیداهای A، B و C.

تصویر ۱۰ — لایهٔ سلولی: دارویی که اکتین را مختل می‌کند (در ۳۰۰ ثانیه) سلول‌ها را نرم می‌کند؛ پس از washout (در ۱٬۳۰۰ ثانیه) بهبود نسبی رخ می‌دهد.

ساخته‌شده برای اطمینان

- **پارازیت‌های هر کانال** در خط پایهٔ مایع برازش می‌شوند و سپس ثابت نگه داشته می‌شوند.
- **حذف اسپایک (Spike rejection)** در هر فریم، حباب و پرش‌های ناگهانی را از ردها دور نگه می‌دارد.
- **نوارهای 1σ±** روی هر منحنی نشان می‌دهند تا چه حد می‌توان به آن اعتماد کرد.
- **کالیبراسیون هوا و آب** به‌صورت JSON ذخیره و در اجرای بعد بارگذاری می‌شود.
- **تست‌های خودکار** برازش، اسکن، سینتیک، مدیریت چندکاناله و رابط کاربری را پوشش می‌دهند.

۰۸ — مشخصات فنی

اطلاعات فنی (Technical data)

سنسور	کریستال کوارتز 5 MHz پایه؛ شمارهٔ اورتون n برای نتایج نرمال‌شده قابل انتخاب.
اسکن فرکانس	مرکز و پنجرهٔ قابل تنظیم (پیش‌فرض 10 kHz حول 5 MHz)، پیش‌فرض ۵۰۱ نقطه، زوم تطبیقی، تکرار پیوستهٔ اختیاری.
کانال‌ها	تا ۵ QCM روی یک پورت سریال (CH1–CH3 فعال، CH4–CH5 اختیاری)؛ متوالی یا streaming؛ کسر کانال مرجع.
رابط	پورت COM سریال، پیش‌فرض 115,200 baud؛ خطوط پاسخ · `f,G,B` · `f,R,X` · `f,|Z|,phase` ؛ فایل‌های `.txt` `.csv` `.npz`.
مدل	Butterworth–Van Dyke: R₁، L₁، C₁، C₀، G₀، φ — پارازیت‌ها آزاد در هر فریم یا ثابت از کالیبراسیون.
خروجی‌ها	Δf، Δm، D، Q، FWHM، ΔR₁، ΔL₁، گرانروی–چگالی؛ ka، kd، KD، Rmax، زمان ماندگاری (residence time).
عدم‌قطعیت	1σ روی پارامترهای برازش‌شده، به‌صورت نوار روی ردها؛ حذف اسپایک در هر فریم.
کالیبراسیون	کریستال در هوا و در آب؛ پارامترها به‌صورت JSON ذخیره و بارگذاری می‌شوند.

خروجی گرفتن	جدول‌ها CSV؛ نمودارها PNG، SVG یا PDF؛ کپی نمودار به کلیپ‌بورد.
نرم‌افزار	QCM Tracker 1.1.0 برای ویندوز — نصب‌کننده، فایل اجرایی مستقل و بستهٔ MSIX.
کریستال نمونه	R_1 = 55 Ω, Q_air ≈ 38,500 (FWHM ≈ 130 Hz), L_1 = 67.4 mH, C_1 = 15.0 fF, C_0 ≈ 12 pF in air

تماس با ما

QCM-D را به آزمایشگاه خود بیاورید. درخواست دمو زنده، پیش‌فاکتور یا برگهٔ فنی کامل بدهید. کاربرد خود را برای ما بفرستید تا در راه‌اندازی اولین اندازه‌گیری کمکتان کنیم.

SNET · نانو فن اوران شریف الکترونیک

SNET · نانو فن اوران شریف الکترونیک