

# MAGNETÒMETRE DE BOMBEIG ÒPTIC AMB GUIA MAGNÈTICA D'ELEVADA RESOLUCIÓ ESPACIAL PER A DETECTAR GOTES MAGNÈTIQUES EN UN CANAL MICROFLUÍDIC\*

Marc Jofre,<sup>1,2,3</sup> Jordi Romeu<sup>1</sup> i Luis Jofre-Roca<sup>1</sup>

1. Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. marc.jofre@upc.edu

2. Departament de Recerca i Innovació, Fundació Privada Hospital Asil de Granollers. Granollers.

3. Departament d'Enginyeria Telemàtica, Universitat Politècnica de Catalunya, Castelldefels.

**Resum:** Els sensors quàntics proporcionen una sensibilitat sense precedents per a detectar camps magnètics, fet que els permet ampliar l'abast habitual d'aplicacions i de contextos d'ús de la magnetometria. Moltes aplicacions també requereixen mesures magnètiques d'elevada resolució espacial en recerca biomèdica, monitoratge ambiental i producció industrial. En aquest aspecte, els magnetòmetres de bombeig òptic (OPM) són candidats destacats, però tenen limitacions a l'escala de les partícules magnètiques micromètriques, per exemple, gotes magnètiques. Per tractar aquesta limitació, aquí estudiem els efectes d'afegir una guia magnètica que fa de pont entre micròmetres i mil·límetres a un OPM en miniatura. Aquest instrument s'utilitza per a detectar gotes magnètiques de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a un flux de fins a 25 gotes per segon en un canal microfluídic. La resolució espacial calculada és de 300  $\mu\text{m}$  i la relació senyal-soroll és més gran que 15 dB per a les diferents mides de gota magnètica estudiades.

**Paraules clau:** àtoms de Rydberg, gotes, magnetometria, microfluídica, resolució espacial, sensors, SERF.

## 1. Introducció

Els últims avenços científics i tecnològics estan introduint un gran ventall d'interaccions entre biopartícules i de possibilitats de detecció, que en algun moment ens permetran comunicar-nos amb els organismes i canviaran com interactuem amb ells. La fusió de camps com la nanotecnologia, la biotecnologia i la microfluídica n'és un exemple important. Aquestes combinacions tecnològiques han assolit un punt àlgid en diversos conceptes i marques que avui s'utilitzen en diferents camps de recerca, com el laboratori en un xip [1]. Per exemple, la millora de les tècniques de miniaturització permet integrar un sistema complet en un xip [2-4], incloent-hi la detecció, el processament i les funcions interactives sense fil [5], així com els subsistemes microfluídics i de detecció [6-9].

Per a entrar al món de les interaccions bàsiques sense contacte de partícules, i en especial de les gotes amb partícules magnètiques, que imiten els senyals magnètics de les biopartícules (per exemple, el potencial d'acció de les cèl·lules) [10-12], la combinació de sensors magnètics amb la microfluídica ha resultat ser una unió interessant per a detectar i controlar la funcionalitat de les gotes aprofitant la seva interacció amb corrents fluids [13-16], duent a terme aquestes

funcions sense parts mòbils i generant poc soroll en el procés [17-19].

En aquest sentit, la tecnologia quàntica, junt amb la nanotecnologia, ha obert nous camps de la física i l'enginyeria amb l'objectiu d'aprofitar els efectes de la física quàntica per a aplicacions pràctiques. Mitjançant sistemes quàntics d'estat sòlid, àtoms, ions, molècules i circuits fotònics, es poden dissenyar dispositius macroscòpics, però intrínsecament quàntics per a rebre senyals febles [20-28], és a dir, magnetòmetres de bombeig òptic (OPM, *optically pumped magnetometer*).

A més, els materials amb permeabilitat magnètica elevada tendeixen a concentrar línies de flux magnètic. Aquesta propietat pot amplificar el camp magnètic local i millorar la resolució espacial en l'espai entre dues estructures de permeabilitat elevada o concentradors de flux. Aquests ja s'han combinat amb una gran varietat de tècniques de detecció magnètica [29-32].

No obstant això, encara existeixen limitacions per a la detecció de gotes magnètiques en canals microfluídics. D'una banda, hi ha una diferència significativa de dimensions entre les gotes magnètiques i els magnetòmetres atòmics, ja que els magnetòmetres són relativament grans comparats amb les gotes micromètriques. D'altra banda, els sistemes de detecció magnètica perden sensibilitat i integrat del senyal a cau-

\* Aquest article forma part del projecte Articles Mirall de l'Institut d'Estudis Catalans, dins el marc del Pla d'Enfortiment de la Llengua Catalana en el Sistema Universitari i de Recerca de Catalunya, impulsat pel Departament de Recerca i Universitats de la Generalitat de Catalunya. Article original: «Optically pumped magnetometer with high spatial resolution magnetic guide for the detection of magnetic droplets in a microfluidic channel», *New Journal of Physics* (en línia), 25 (30 gener 2023), 013028, <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/acb37a/pdf>>, sota llicència Creative Commons Attribution 4.0, <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>. Traïduït per Òscar Aznar Alemany. Correspondència: marc.jofre@upc.edu

sa de complexos acoblaments entre estructures i dels camps de dispersió, ja siguin de l'instrument de mesura o de l'entorn.

Per tant, aquest estudi proposa una guia magnètica (MG, *magnetic guide*) en un OPM per a permetre una resolució espacial elevada alhora que es manté la sensibilitat per a detectar gotes magnètiques en un canal microfluídic. La MG està basada en una estructura de mànega magnètica que permet transferir el senyal magnètic a distància de manera eficient [33], fet que també és pràctic per a compensar la diferència d'escala entre les gotes magnètiques dels microcanals i els OPM.

Els objectius d'aquest estudi són, doncs: a) desenvolupar un OPM amb una MG de resolució espacial elevada per a detectar gotes magnètiques en canals microfluídics; b) proporcionar els càlculs i la demostració experimental de les capacitats que s'aconsegueixen en combinació amb un instrument de prova, i c) discutir els resultats a fluxos de fins a 25 gotes per segon (got. s<sup>-1</sup>). A aquests efectes, l'article està organitzat de la manera següent. En primer lloc, l'apartat 2 descriu el sistema muntat i el seu principi de funcionament. Després s'analitzen l'abast de la resolució espacial i la sensibilitat en els apartats 3 i 4, respectivament. L'apartat 5 conté les demostracions experimentals del sistema i la discussió dels resultats. Per acabar, l'apartat 6 resumeix l'estudi i ofereix les conclusions.

## 2. Muntatge de l'aparell i principi de funcionament

L'aparell utilitza un OPM amb una MG amb forma de con per a detectar les gotes magnètiques en un canal microfluídic, com es mostra a la figura 1a, que proporciona una resolució espacial elevada, alhora que es manté la sensibilitat magnètica.

La unitat OPM-MG es munta dins d'una cambra de zero gauss i s'hi afegeix un suport de microfluids per a generar les gotes magnètiques i instruments electrònics de control i de lectura controlats per ordinador. La figura 1b mostra el detall dels diferents elements del sistema de prova i les connexions (tant electròniques com de fluids) amb aquest codi de colors: tubs de líquids (blau), línies d'aire (taronja), cables de dades (verd), línia de corrent de la bobina de desmagnetització (groc) i línies de tensió (vermell/negre).

### 2.1. Guia magnètica

La MG es basa en l'òptica de transformació a l'escala de sublongitud d'ona que pot dirigir els camps magnètics de manera eficient [33]. Per a detectar gotes magnètiques en un canal microfluídic, cal ajustar la mida del microcanal a la mida de l'OPM amb una MG cònica [34]. Com es veu a la figura 1a, la MG es compon d'un nucli de ferrita de 5 mm d'alçada (*H*), 3 mm de diàmetre de la base (*DB*) i 0,2 mm de diàmetre a la punta superior (*DS*). El nucli està cobert per una cinta superconductora (Theva Pro-Line 4121 HTS). La

cinta mesura 12 mm d'ample i 80 µm de gruix i es talla de manera que cobreixi els costats laterals del nucli de la MG. La cinta superconductora està ben adherida al nucli per a evitar fuites de flux.

### 2.2. Mòdul de l'OPM

Els OPM depenen de la manipulació d'una propietat quàntica anomenada *spin* (propietat vinculada al moment magnètic d'una partícula i, per tant, a com respon a un camp magnètic), que es va descriure per primer cop als anys vint i trenta del segle passat [35, 36]. En particular, els OPM es basen fonamentalment en la manipulació de l'*spin* atòmic (tant el nuclear com l'electrònic) [37-41].

L'OPM utilitzat és un OPM QuSpin de camp zero de pocs centímetres amb una cel·la de vapor de rubidi de 3 × 3 × 3 mm<sup>3</sup> en règim de transferència de *spin* sense relaxació (SERF, *spin-exchange relaxation-free*) [6, 42-44], com es veu a la figura 1. La sensibilitat típica és de 10 fT √Hz<sup>-1</sup> treballant en un sol eix a un interval de freqüències de 3 a 100 Hz.

En concret, l'OPM és un magnetòmetre de camp zero absolut i la condició òptima (<1 % de no linearitat) és quan el camp de fons és <1 nT. L'OPM té tres parells de bobines de compensació que envolten la cel·la de vapor com un cub (~5 × 5 mm de superfície amb cinc voltes per bobina). Les bobines no creen un camp magnètic del tot homogeni i per això no es poden utilitzar per a produir camps molt grans (haurien de treballar a <200 nT per a no crear gradients forts que provoquessin pèrdues de sensibilitat).

A més, per al calibratge, s'aplica breument un camp magnètic conegut amb les bobines internes per a calibrar la resposta del magnetòmetre. D'aquest procés s'obté un nombre que es multiplica pel senyal de sortida brut, de manera que el senyal de sortida analògic sigui 2,7 V nT<sup>-1</sup> (en el mode per defecte, 1×) i el senyal de sortida digital es presenti en pT. En particular, l'algorisme del nombre de calibratge ve determinat pel fabricant i no pot superar 15,9. Si no es calibra el magnetòmetre, s'atribueix el factor de calibratge 1. En aquest estudi, la qualitat del calibratge va ser de 0,76 a l'eix z, és a dir, que el magnetòmetre estava relativament en bones condicions (<1).

### 2.3. Camp magnètic residual

Per a eliminar el camp magnètic de corrent continu ambient i el soroll, i deixar-lo per sota de les desenes de nT, l'OPM-MG s'emplaça dins d'una cambra de zero gauss de mu-metal, cilíndrica, tancada i de tres capes (ZG-206W/Degauss, Magnetic Shield Corp.) de diàmetre intern (profunditat interna) de 152 mm (381 mm), que disposa d'una bobina de desmagnetització controlada per un equip de desmagnetització (DG, *digital degaussing unit*, Twinleaf).

L'equip DG s'utilitza per a automatitzar el procés de desmagnetització del blindatge magnètic i dels components magnètics de la cambra aplicant un camp magnètic

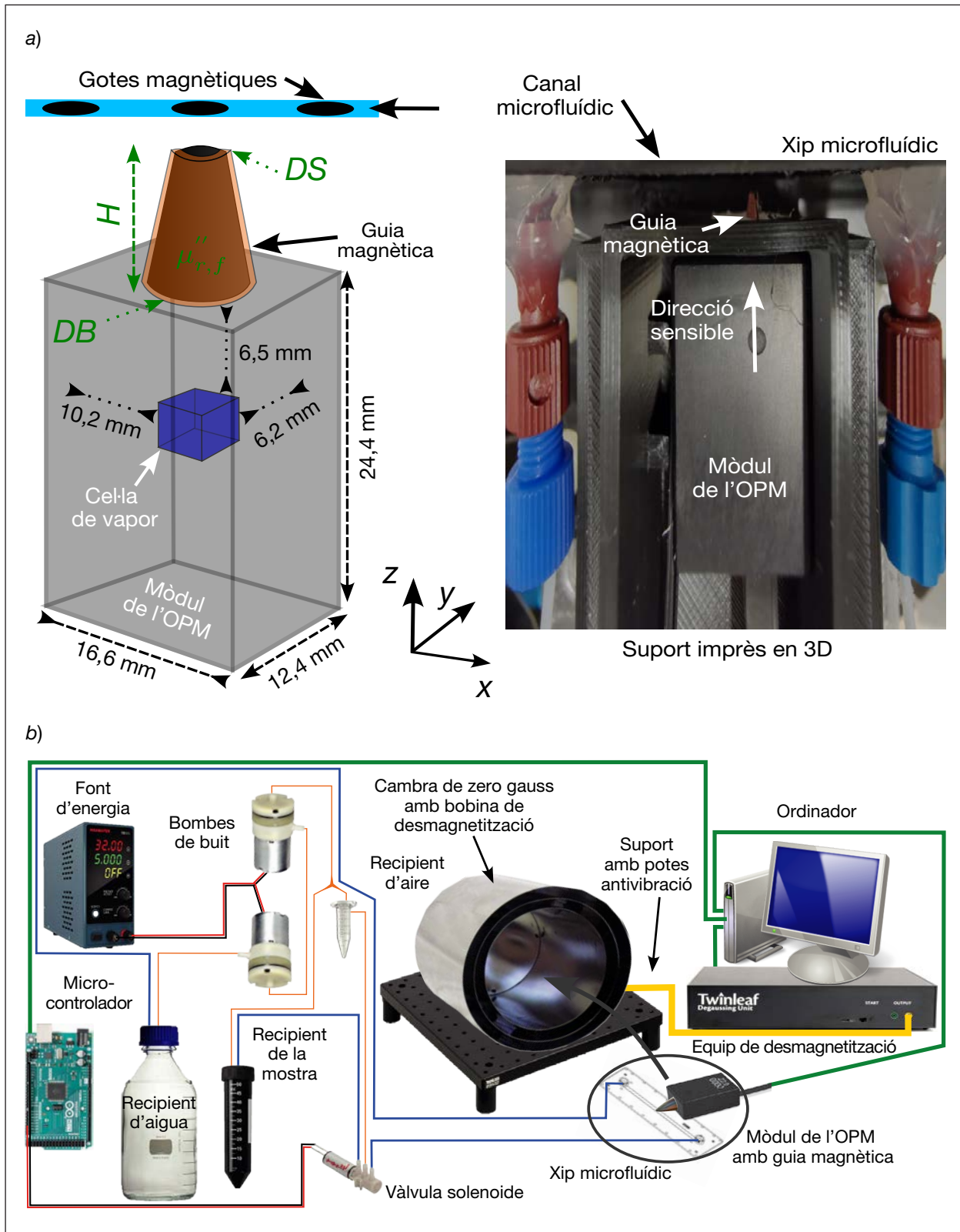


FIGURA 1. Esquema de a) l'OPM amb la guia magnètica cònica (OPM-MG) alineat amb el microcanal, i b) el sistema de prova.  
 FONT: Elaboració pròpia.

oscil·lant que satura el material i llavors es va reduint lentament l'amplitud d'oscil·lació fins a zero. L'equip DG actua en cinc seqüències de polsos de 100 mA, 50 Hz i 5 s per a desmagnetitzar els elements de ferrita. Arribat cert punt, si la desmagnetització és insuficient, el procés intern de bloqueig de l'OPM (que serveix per a detectar el nivell del camp magnètic i autocompensar els camps inferiors a nT) genera un missatge perquè l'usuari redueixi encara més els camps magnètics residuals o l'heterogeneïtat del gradient de camp magnètic, com es detalla a la figura 5b, a l'apartat 4.1.

L'amplitud màxima de camp magnètic de fons a la qual l'OPM pot funcionar és d'aproximadament 50 nT a causa de les bobines internes. La primera limitació del camp residual ve determinada per la relació senyal-soroll (SNR, *signal-to-noise ratio*) dels convertidors de digital a analògic que controlen el camp de compensació. La segona limitació és l'heterogeneïtat del camp creada per les bobines internes, que amplia la ressonància de camp zero i, consegüentment, disminueix la capacitat del sensor.

#### 2.4. Estructura mecànica

Es va construir un suport mecànic per a l'OPM-MG mitjançant impressió 3D amb polímer d'àcid polilàctic i 0,1 mm de resolució. El suport permet posicionar l'OPM-MG al centre de la cambra de zero gauss i mantenir els tubs microfluídics separats del mòdul de l'OPM amb separadors. Els cables i tubs entren i surten de la cavitat com es mostra a la figura 2a. El suport no cobreix completament el mòdul de l'OPM per a permetre una convecció tèrmica adequada. A més, el suport mecànic permet alinear la punta de la MG amb el centre del canal microfluídic, com es mostra a la figura 2b.

Per a acabar, la cambra de zero gauss es munta en un suport amb potes antivibració que redueixen el soroll causat per les vibracions mecàniques de l'entorn, amb un aïllament de més de 20 dB.

#### 2.5. Generació de les gotes magnètiques i microfluídica

Les gotes magnètiques es componen d'òxids de ferro minúsculs (1-20 μm), en concret, magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), a una concentració de 10<sup>5</sup> partícules/ml en aigua. Per a aquesta mida de partícula i a aquesta concentració al microcanal, la relació de bloqueig 0,01-0,2 és baixa, hi ha més d'un ordre de magnitud de diferència entre la mida de les partícules i la mostra està prou diluïda perquè les partícules ocupin la secció transversal del microcanal de manera homogènia. Les gotes es generen amb una vàlvula microfluídica de tot o res controlada activament i modulada a fluxos de 5-25 got. s<sup>-1</sup> [45]. Per a aquestes freqüències de gotes, l'interval de llargada de les gotes magnètiques no se superposa dins del microcanal i el seguit de gotes cau dins de l'amplada de banda de detecció de l'OPM.

A més, el suport microfluídic funciona amb dues bombes de buit controlades per tensió connectades en sèrie (la sortida de la bomba 1 va a l'entrada de buit de la bomba 2) i la sortida es reconnecta al suport de la mostra per a assegurar la resuspensió contínua de les partícules magnètiques i evitar la deposició (ja que les partícules són més denses que l'aigua). En tot el sistema, els elements microfluídics estan connectats amb tubs PEEK de 125 μm ID, com es mostra a la figura 2c, junt amb les connexions elèctriques.

D'aquesta manera, les gotes magnètiques circulen a un flux de 4,5 μl min<sup>-1</sup> a través d'un canal microfluídic de 56 mm de llarg i amb una secció transversal quadrada de 100 × 100 μm, fet pel qual el flux és de règim laminar amb un nombre de Reynolds baix (*Re* = 0,46). A més, el canal microfluídic seleccionat per a les mesures és el d'un microxip produït comercialment amb poli(metracrilat de metil) de qualitat òptica. Per tant, amb aquest microxip la distància des de la punta de la MG fins al centre del microcanal és de 225 μm, que és quan la punta està en contacte amb la cara superior del xip microfluídic, pels 175 μm del gruix de la coberta i els 50 μm que són mitja alçada del microcanal.

### 3. Resolució espacial i anàlisi de la transferència de flux magnètic

La MG concentra el camp magnètic i el transfereix cap a l'OPM. Per tant, la densitat de flux magnètic efectiva detectada per l'OPM és significativament major que si no hi hagués la MG.

Agafant la gota magnètica com a punt d'origen, que és l'equivalent a un dipol magnètic, el camp magnètic disminueix molt de pressa amb la distància segons  $d^3$ . En canvi, si es posa el punt d'origen a la punta (o al punt més alt) d'una MG cilíndrica amb l'OPM a la seva base (part inferior), aleshores el camp magnètic de l'eix z obeeix  $B_z = \frac{(\mu_0 \mu_r' m)}{2\pi r^2 (l_s + l_a)}$ , on  $r$  és el radi del nucli ferromagnètic,  $\mu_0$  és la permeabilitat magnètica del buit,  $\mu_r'$  és la permeabilitat relativa real,  $l_s$  i  $l_a$  són la distància i la llargada de la font i de l'espai d'aire, respectivament, i  $m$  és el moment magnètic [33]. És a dir, les capacitats de resolució espacial i de transferència de camp magnètic es poden ajustar mitjançant el disseny de la forma i la mida de la MG.

Per tant, en aquest apartat descrivim l'anàlisi de la interacció de quatre paràmetres rellevants per al disseny de la MG cònica. L'anàlisi s'ha dut a terme amb computacions numèriques de camps magnetoestàtics [47], utilitzant coordenades cilíndriques i solucionant el potencial vector magnètic [48]. A més, s'ha imposat la condició de contorn que l'energia que entra per la superfície superior de la MG és la mateixa que l'energia que surt per la part inferior [33], per al cas sense pèrdues magnètiques. En els càlculs, s'ha utilitzat com a permeabilitat relativa real del nucli de ferrita  $\mu_r' = 5 \times 10^4$  i s'ha considerat que la cinta superconductora és del tot diamagnètica ( $\mu_r'_{sc} = 0$ ). Els càlculs s'han dut a terme amb un ordinador de 32 GB de RAM i 6 processa-



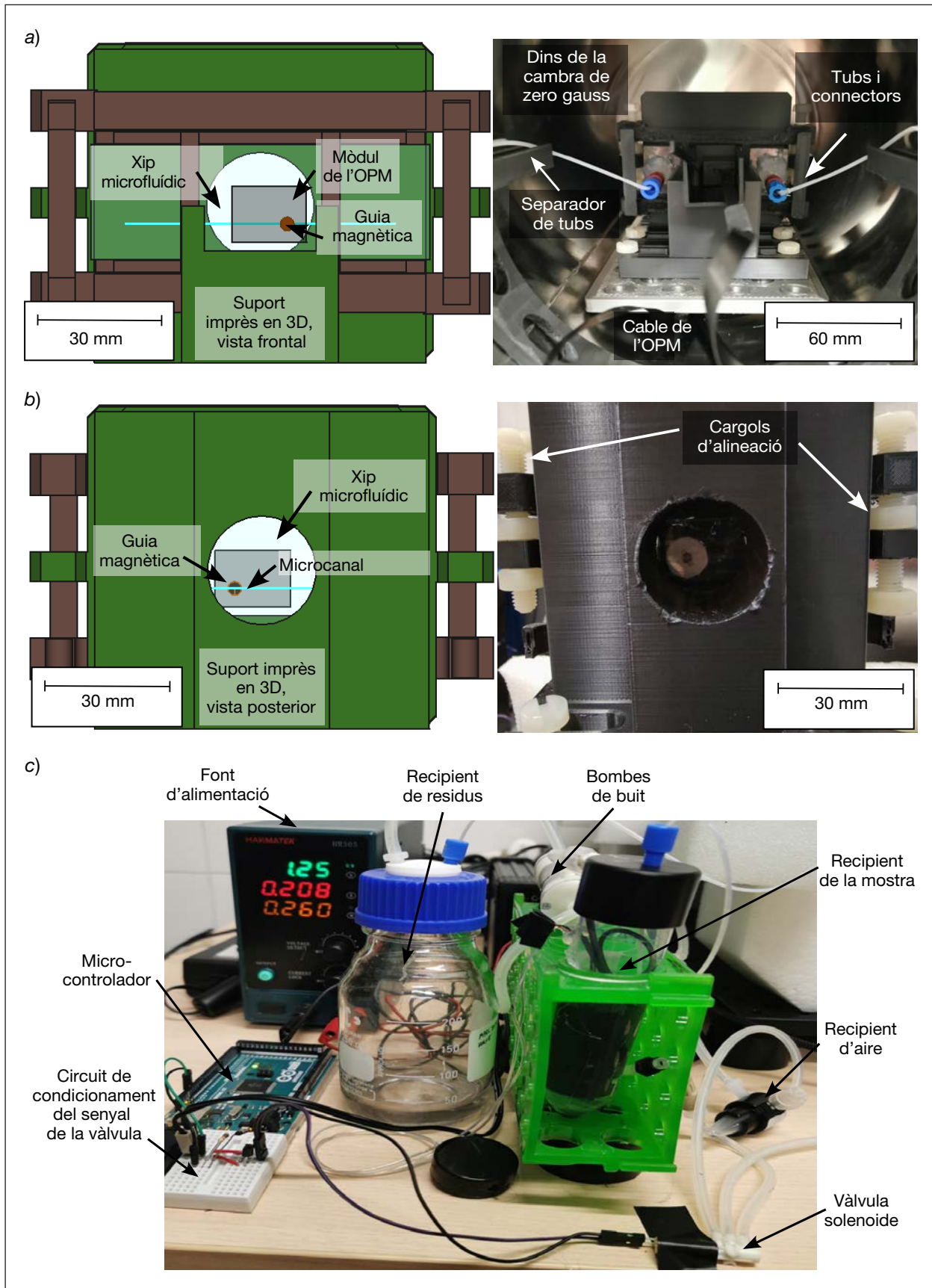


FIGURA 2. Esquema i prototip de l'estructura que conté l'OPM-MG i el xip del canal microfluídic. a) Dins de la cambra de zero gauss, b) ampliació del sistema d'alineació del microcanal i c) muntatge del sistema microfluídic.

FONT: Elaboració pròpia.

dors i5 Core executant Jupyter Lab amb Python 3.9.10. Per a acabar, el càlcul no té en compte els efectes del gradient magnètic sobre l'OPM perquè són negligibles en aquest estudi, com es veu a l'apartat 4.1.

Amb aquestes condicions, el càlcul permet optimitzar el guany i la resolució espacial de la MG. En primer lloc, el guany està relacionat amb la capacitat de la MG de concentrar i transferir el camp magnètic al llarg de la MG. En aquest sentit, el guany es computa com el senyal a l'OPM amb MG comparat amb el senyal quan es posa la cèl·lula de vapor de l'OPM junt al punt d'origen magnètic sense MG. En segon lloc, la resolució espacial s'extreu dels camps magnètics resultants, en escanejar la posició del punt d'origen, com l'amplada a mitjana alçària (FWHM, *full width at half maximum*) per a la profunditat (en la direcció z, calculat com la distància fins a la punta de la MG) i l'am-

plada (en la direcció x, tenint en compte la distància d'un costat a l'altre, paral·lela a la superfície superior de la MG).

Llavors, per una banda, a la figura 3a es mostra que el guany amb la MG augmenta des de 24 dB fins a 32 dB amb el DB de la MG, mentre que la resolució espacial disminueix lleugerament fins a arribar a 300  $\mu\text{m}$ . D'altra banda, a la figura 3b es mostra que, escanejant la H de la MG, el guany augmenta lleugerament i la resolució en profunditat i amplada es manté bastant constant al voltant de 300  $\mu\text{m}$ . Addicionalment, tot i que no es mostra, com a referència per a aquesta anàlisi, per a 5 mm de H, la FWHM per a profunditat i amplada sense la MG és d'1,4 mm i 1,5 mm, respectivament.

A més, com es proposa en aquest estudi, la MG té forma de con per a concentrar el camp magnètic del punt d'origen cap a l'OPM i, com més petit és el DS, major és el

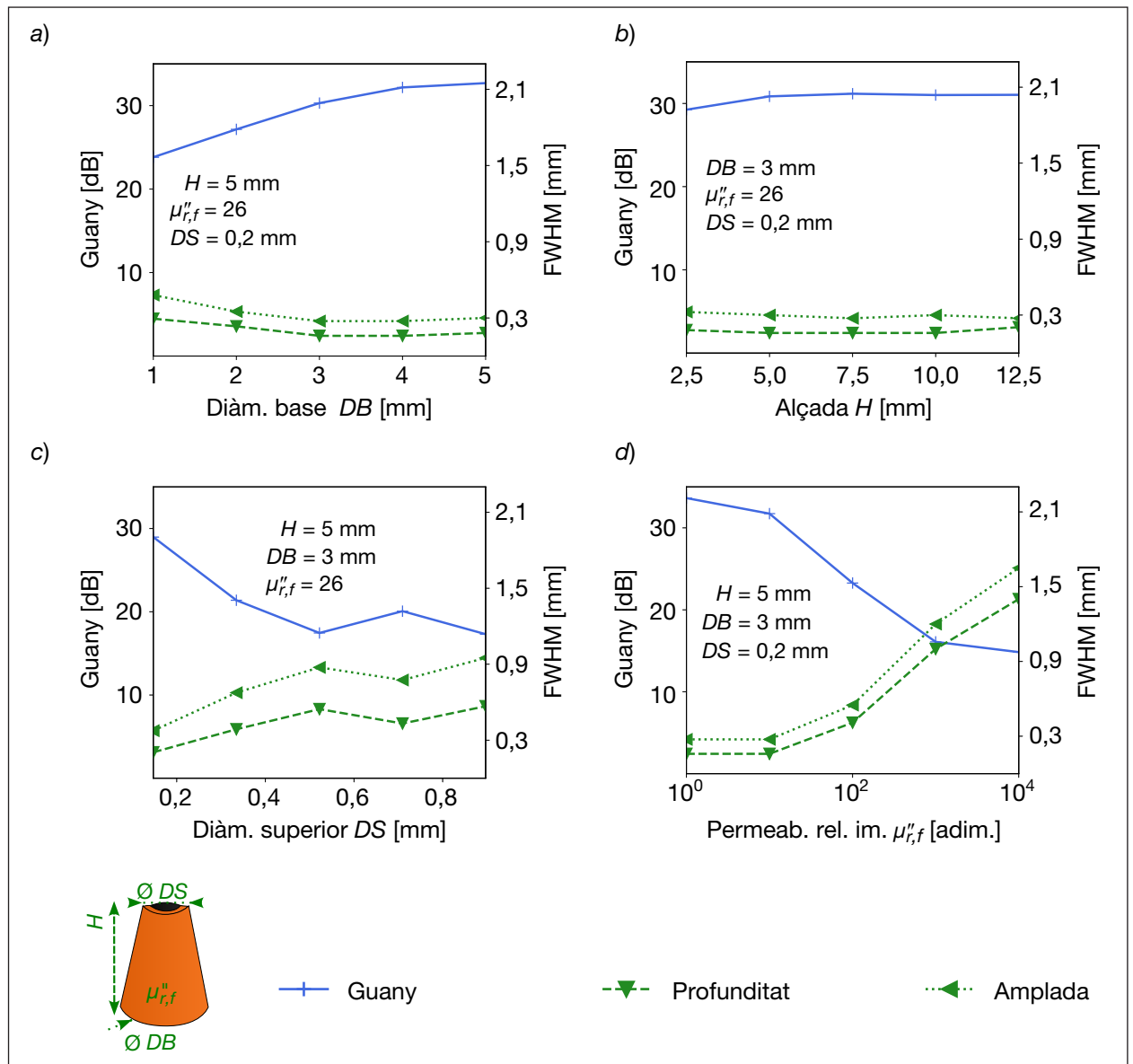


FIGURA 3. Estimació numèrica de les característiques de la MG en relació amb la capacitat de transferència del camp magnètic (com a guany) i la resolució espacial en profunditat i amplada (com a FWHM) per a diferents paràmetres.  
FONT: Elaboració pròpia.

guany, com es veu a la figura 3c, mentre que la resolució espacial augmenta amb el  $DS$ , des d'uns  $300\ \mu\text{m}$  de resolució espacial fins a  $600\ \mu\text{m}$  i  $900\ \mu\text{m}$  per a la profunditat i l'amplada, respectivament. Per tant, en general, el guany és inversament proporcional a la FWHM, tant per a la profunditat com per a l'amplada, igual que per als dispositius d'enfocament típics (per exemple, un objectiu d'una càmera).

Per a acabar, els materials de ferrita tenen pèrdues, especialment a freqüències  $< 1\ \text{MHz}$  [49]. Les imperfeccions del nucli envoltat per la cinta superconductora també impliquen fuites, que es poden identificar pels valors més elevats de la permeabilitat relativa imaginària  $\mu_r''$ . Com més gran sigui  $\mu_r''$ , menys eficient serà la MG en concentrar i guiar les línies de flux magnètic, com es veu a la figura 3d. Per això, amb la MG, hi ha grans pèrdues de guany i resolució espacial per a  $\mu_r''$  elevades. A més, les pèrdues de la MG generen un soroll de baixa freqüència efectiu, que pot alterar la sensibilitat de l'OPM, com es veu a l'apartat 4.2. No obstant això, els materials utilitzats per a construir la MG tenen característiques prou adequades per a demostrar la capacitat de la MG per a detectar gotes magnètiques.

Com a resultat de l'anàlisi de les tendències del guany i de la resolució espacial segons els diferents paràmetres de la MG, i tenint en compte les possibilitats mecàniques per al muntatge de la MG, els paràmetres experimentals utilitzats són  $DB = 3\ \text{mm}$ ,  $H = 5\ \text{mm}$  i  $DS = 0,2\ \text{mm}$  (descriu a l'apartat 2.1) i es pren 26 com el valor de  $\mu_r''$  [29].

Així, a la figura 4a es representa per al pla  $xz$  el camp magnètic detectat teòric de les gotes magnètiques per al muntatge OPM-MG, alhora que s'il·lustra visualment el microcanal (línia sòlida de color cian) que s'estén al llarg de l'eix  $x$  i una gota magnètica (cercle negre), com en la configuració experimental. Aquest camp magnètic simulat també mostra que la raó de l'heterogeneïtat del gradient de camp a la cel·la de vapor de l'OPM, definida a l'apartat 4.1, resulta ser molt menor que un 1% de mitjana. Per tant,

aquesta heterogeneïtat del gradient és negligible comparada amb el gradient de les bobines de compensació del mòdul de l'OPM, com s'explica a l'apartat 2.2.

Per a acabar, per a l'OPM-MG muntat, a la figura 4b es representa la ràtio d'acoblament espacial del camp magnètic  $\eta_z$  al pla  $xz$  per a diferents posicions escanejades de la gota magnètica, considerada com a punt d'origen, respecte al centre de la part superior de la MG. Com s'havia previst, és habitual observar el màxim de la ràtio d'acoblament a la punta de la MG (centre superior), mentre que l'acoblament disminueix quan la distància a aquest punt augmenta. De la mateixa manera, la resolució espacial de profunditat/amplada simulada és d'uns  $300\ \mu\text{m}$ , que és adequada per a les dimensions del canal microfluídic. Aquests valors de resolució espacial calculats s'han confirmat experimentalment i es discuteixen en el paràgraf següent.

La caracterització experimental de la resolució espacial del sistema OPM-MG es va dur a terme durant l'alineament de l'OPM-MG amb el microcanal. Es va monitorar el nivell del senyal detectat de les gotes magnètiques que passaven per la punta de la MG, a un flux de  $5\ \text{got. s}^{-1}$ , mentre s'escanejava la posició vertical (eix  $y$ ) amb els cargols de niló M6 (mostrats a la figura 2b). Es va obtenir el nivell de senyal màxim i llavors un escanejat ascendent i descendent amb un gir d' $1/8$  va confirmar que la resolució espacial a l'eix  $y$  (que també es considera vàlida per a l'eix  $x$ , a causa de la simetria de la MG en el pla  $xy$ ) és de l'ordre d' $1/8$  de gir ( $125\ \mu\text{m}$  de desplaçament) en qualsevol direcció, que es correspon amb la resolució espacial d'uns  $300\ \mu\text{m}$  en el pla  $xy$ . Finalment, la resolució espacial de  $300\ \mu\text{m}$  calculada numèricament per ordinador per a l'eix  $z$  es va confirmar detectant un nivell de senyal suficient de les gotes magnètiques quan la punta estava en ple contacte amb la superfície superior del xip microfluídic. En aquesta posició, com es descriu al subapartat 2.5, la distància des de la punta fins al centre del microcanal és de  $225\ \mu\text{m}$ , fet que confirma que la resolució espacial de l'eix  $z$  també és de l'ordre de  $300\ \mu\text{m}$ .

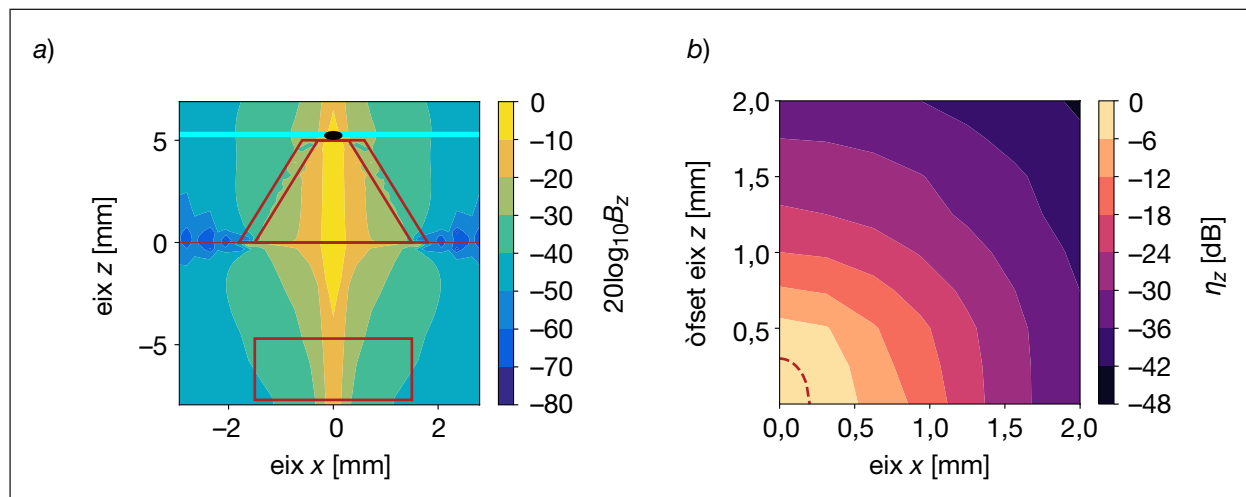


FIGURA 4.  $B_z$  normalitzat amb el sistema OPM-MG, en què a) representa la magnitud escalar i b) la ràtio d'acoblament espacial del camp magnètic (la línia trencada indica la FWHM), ambdós en el pla  $xz$ .

FONT: Elaboració pròpia.

D'aquesta manera, s'aconsegueix una resolució espacial elevada amb la MG proposada (en contrast amb la resolució espacial pobre d'una mida similar a la cel·la de vapor de l'OPM), que permet detectar gotes magnètiques individuals, com es detalla en l'apartat 5.

#### 4. Discussió de la sensibilitat física de la magnetometria

Per als OPM de SERF, amb sensibilitat optimitzada i quan un camp magnètic canvia molt lentament, es pot utilitzar la solució d'estat estacionari de l'equació de Bloch [50, 51],

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \gamma \mathbf{S} \times \mathbf{B} + R(\mathbf{S}_0 \hat{x} \mathbf{S}) - \frac{\mathbf{S}}{T_2}, \quad (1)$$

en què  $\mathbf{S}$  és el vector spin,  $t$  és el temps,  $\gamma$  és la raó giromagnètica,  $\mathbf{B}$  és el vector camp magnètic,  $R$  és la raó de bombeig òptic,  $\mathbf{S}_0$  és la polarització de l'spin electrònic a l'equilibri,  $\hat{x}$  és la direcció de bombeig òptic i  $T_2$  és el temps de relaxació transversal de spin.

En aquesta configuració hi ha més sensibilitat si s'utilitza un mètode de modulació de senyal de baixa freqüència per a optimitzar el senyal de resposta en comparació amb el mètode d'òfset CC [52]. En aquest cas, la resposta compleix aproximadament  $0,77S_0\delta B$ , en què  $\delta B$  és el camp magnètic petit mesurat, tot i que això només és cert amb camps magnètics per sota de 200 Hz (mentre que la modulació de freqüència de treball és d'uns 980 Hz) [52]. Addicionalment, la sensibilitat sol ser atenuada pels camps magnètics superiors a uns 50 nT, que és un ordre més alt que el de les gotes magnètiques d'aquest estudi. A més, a aquests nivells els gradients magnètics i el soroll dels materials magnètics també fan disminuir la sensibilitat de l'OPM, com s'analitza en els apartats següents.

#### 4.1. Pèrdua induïda pel gradient

Un gradient de camp magnètic en magnetòmetres augmenta l'amplada de línia magnètica de l'OPM, fet que causa una reducció de sensibilitat. En particular, en presència d'un gradient, és a dir, d'heterogeneïtat, la relaxació transversal disminueix segons  $1/T_2 = 1/T_2' + 1/T_{AB}$ , en què  $T_2'$  és la relaxació transversal original sense l'heterogeneïtat del camp magnètic i  $T_{AB}$  és la relaxació causada per l'heterogeneïtat del camp magnètic [53]. En aquest estudi, establim que  $T_2 = T_2' (1 - \chi)$ , en què  $\chi$  representa l'heterogeneïtat segons  $\chi = T_2' / (T_{AB} + T_2')$ . Així,  $T_{AB}$  disminueix quan augmenta l'heterogeneïtat del camp magnètic [51, 52, 54].

Llavors, establint una  $T_2'$  de 5 ms, una temperatura de la cel·la de vapor de 150 °C i una pressió baixa amb una densitat d'àtoms d'1,5 amg (amagats), el temps de relaxació transversal a causa de l'heterogeneïtat del camp magnètic és [53, 55]:

$$\frac{1}{T_{AB}} \approx \frac{4\gamma^2 r_{vc}^4}{175D} \left( |\vec{\nabla} B_x|^2 + |\vec{\nabla} B_y|^2 + |\vec{\nabla} B_z|^2 \right), \quad (2)$$

on  $D$  és el coeficient de difusió,  $r_{vc}$  és el radi equivalent de la cel·la de vapor i  $|\vec{\nabla} B_x|^2 + |\vec{\nabla} B_y|^2 + |\vec{\nabla} B_z|^2$  és la suma de les magnituds al quadrat dels gradients per a cada un dels tres components del camp magnètic. Per tant, si es tenen en compte els gradients de camp generats per les gotes magnètiques d'interès, com s'explica a l'apartat 3,  $T_{AB}$  es manté molt més gran que  $T_2'$  i  $\chi$  és molt petita i la sensibilitat no disminueix significativament.

En particular, si es computa la resposta de l'OPM tenint en compte la  $T_2$  lleugerament disminuïda [52], el factor de pèrdua de sensibilitat resultant per als diferents fluxos de gotes magnètiques és negligible per a l'heterogeneïtat de camp generada i per a la modulació de freqüència de 980 Hz de l'OPM, com es veu a la figura 5a). Hi ha un

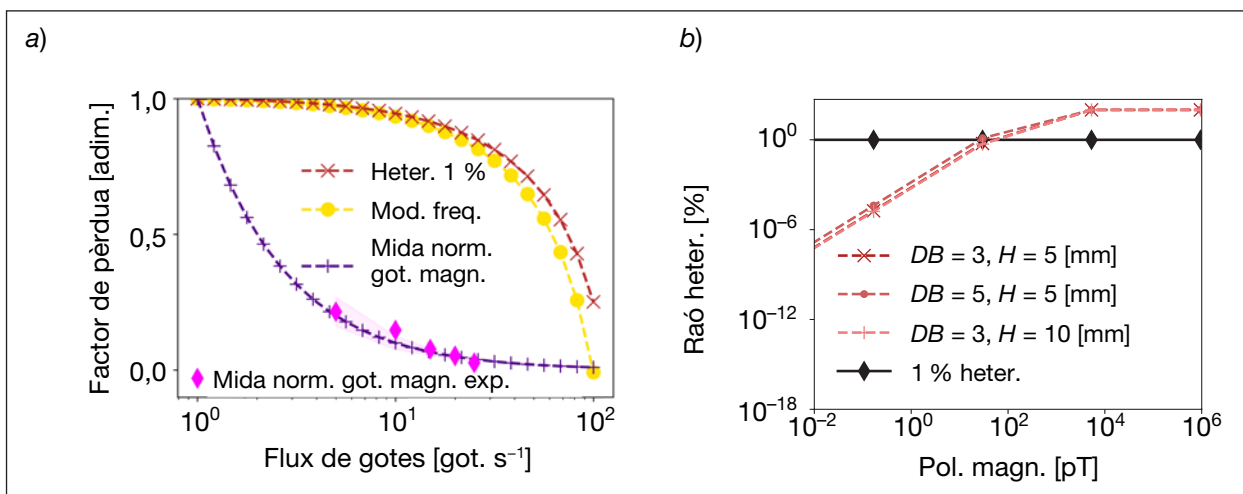


FIGURA 5. Estimació del factor de pèrdua de sensibilitat (o senyal) del mòdul de l'OPM per a diferents fluxos de gotes, establint  $\sigma$  una raó d'heterogeneïtat del camp magnètic d'1 %, mida volumètrica normalitzada (per a 5 got. s<sup>-1</sup>) de les gotes magnètiques (mida norm. got. magn.), confirmada amb valors experimentals (rombe magenta), i modulació de freqüència de 980 Hz (mod. freq.), i b) un estudi numèric amb diferents valors de polarització magnètica i mides de la MG per a aconseguir una raó d'heterogeneïtat rellevant per sobre d'un 1 % (línia sòlida negra).

FONT: Elaboració pròpia.



punt en què l'efecte de l'heterogeneïtat del camp magnètic sí que esdevé significatiu en termes de pèrdua de sensibilitat per un gradient fort (heterogeneïtat elevada), com es representa a la figura 5b. En canvi, la mida de les gotes magnètiques, que depèn del flux de les gotes, és el factor principal de la pèrdua de senyal en aquest estudi, ja que es redueix amb la mida de les gotes elevada al cub, com es veu a la figura 5a. A la figura es representa la disminució del senyal a causa de la reducció del volum de les gotes magnètiques, normalitzat a la mida màxima de gotes magnètiques a 5 got. s<sup>-1</sup>, per a l'interval de fluxos estudiats. A més, aquesta observació es confirma amb els valors de senyal de les gotes magnètiques detectats experimentalment a l'apartat 5 (marcats a la figura amb rombes de color magenta).

Per tant, els febles camps magnètics de les gotes magnètiques detectats generen  $\chi$  relativament petites (<1%), que no són rellevants en els efectes de la sensibilitat de l'OPM. A més, s'observa que la raó d'heterogeneïtat augmenta ràpidament amb la polarització magnètica a detectar (que es determina segons el moment magnètic de la gota). D'altra banda, l'heterogeneïtat no varia significativament dins de l'interval de dimensions dels paràmetres de la MG estudiades, com es mostra a la figura 5b. En particular, la polarització magnètica de les gotes magnètiques estudiades és menor que 50 pT, per la qual cosa la raó d'heterogeneïtat és menor que un 1%. Per tant, observem que la física d'aquest instrument, pensat per a detectar camps magnètics febles, és robusta per a un interval de dimensions de la MG que permet utilitzar dissenys adequats a altres objectes magnètics específics en canals microfluídics.

#### 4.2. Estimació de pèrdua induïda pel soroll

El material magnètic (ferrita) d'elevada permeabilitat de la MG genera un soroll en el camp magnètic que pot arribar a limitar la sensibilitat de l'OPM per a una MG de grans dimensions. Tenint en compte les dimensions de la MG descrites en l'apartat 2.1, s'ha calculat (validat amb càlcul numèric) que el nivell de soroll afegit és d'aproximadament 265 fT  $\sqrt{\text{Hz}^{-1}}$  [56], i 300 fT  $\sqrt{\text{Hz}^{-1}}$  quan es mesura experimentalment, com es veu a la figura 6a de l'apartat 5.

Tot i que les bobines de compensació integrades a l'OPM compensen en part el soroll del camp magnètic de baixa freqüència addicional pel que fa a adaptar el sistema per aconseguir un senyal de resposta òptim, no s'evita l'efecte sobre la sensibilitat. En aquest sentit, el soroll magnètic generat pel material de la MG es pot considerar un augment del nivell base de baixa freqüència, com es mostra a l'apartat 5. El soroll també augmenta de manera proporcional al temps de vol efectiu de les gotes magnètiques. No obstant això, gràcies al curt temps de vol de les gotes magnètiques i a l'amplada de banda reduïda de l'OPM utilitzat en aquest estudi, la pèrdua de sensibilitat atribuïble al soroll magnètic generat és negligible per a la detecció de gotes magnètiques.

### 5. Caracterització dels polsos detectats

En aquest sistema es van ajustar a) l'alineament de l'OPM-MG amb el microcanal, b) la compensació del camp magnètic residual per a l'OPM, i c) la microfluídica per a generar les gotes magnètiques. En primer lloc, es va verificar el correcte funcionament del sistema mesurant el senyal en funció de la freqüència de les gotes magnètiques a 25 got. s<sup>-1</sup>, com es mostra a la figura 6a. Inicialment, la transformada ràpida de Fourier, que en aquest article anomenem *espectre*, es va mesurar sense la MG instal·lada. Coherentment, no van aparèixer els pics de les gotes magnètiques en el senyal a causa del baix flux magnètic que travessava l'OPM. A més, l'espectre decau constantment com a 1/f fins a 10 Hz, punt en què la línia de base esdevé plana. Apareix un pic de soroll a 50 Hz (freqüència de la línia elèctrica a Europa) causat pel soroll electrònic generat per les bobines de l'OPM i que es pot filtrar amb el programari.

Després es va mesurar l'espectre amb la MG instal·lada i es va observar una tendència similar en el nivell de la línia de base, però va aparèixer un pic addicional al voltant de 25 Hz que coincidia amb el flux de les gotes. Destaquem que el pic de freqüència de les gotes és visible per sobre de la línia de base. També hi ha soroll addicional a freqüències baixes (per sota de 10 Hz) a causa del soroll magnètic equivalent de baixa freqüència que afegeix la MG, com s'explica a l'apartat 4.2.

En segon lloc, per a caracteritzar els diferents paràmetres dels polsos detectats, es van fer mesures en funció del temps per a diferents fluxos de gota, com es veu a la figura 6b per a l'exemple d'un flux de 25 got. s<sup>-1</sup>. Destaquem que el senyal de l'OPM es va filtrar amb un filtre passabanda de segon ordre per a 3-30 Hz utilitzant programari, fet que permetia eliminar el soroll de 50 Hz. Amb aquest processament de senyal, els pics es representaven sense el component de corrent continu, per la qual cosa s'observa un flanc positiu seguit d'un subimpuls menor. Sigui com sigui, la mesura inicial en funció del temps també ens va permetre comprovar que es detectaven pics amb la MG instal·lada i que no es detectaven sense la MG.

Llavors, per als diferents fluxos de gota mesurats amb l'instrument OPM-MG en funció de la freqüència i del temps, es van calcular les característiques dels pics pel que fa a la magnitud, l'amplada de temps de vol, el soroll de fons i la SNR, com es detalla a la taula 1. Els pics detectats per als diferents fluxos de gota disminueixen constantment amb l'augment de freqüència, com s'esperava i es mostra a la corba de mida norm. got. magn. a la figura 6b. La magnitud del pic és 22,83 pT per a 5 got. s<sup>-1</sup> i 2,88 pT per a 25 got. s<sup>-1</sup>. Després es va calcular l'amplada dels pics com a temps de vol, amb 40 ms com el límit inferior de resolució de temps de vol a causa de la resolució espacial de 300  $\mu\text{m}$  i el flux de 4,5  $\mu\text{l}$  del sistema. Com s'esperava, els temps de vol calculats s'ajusten molt bé a l'amplada de les gotes magnètiques generades als diferents fluxos, des de 279,99 ms per al flux menor fins a 36,10 ms per al flux de gotes més elevat estudiat.

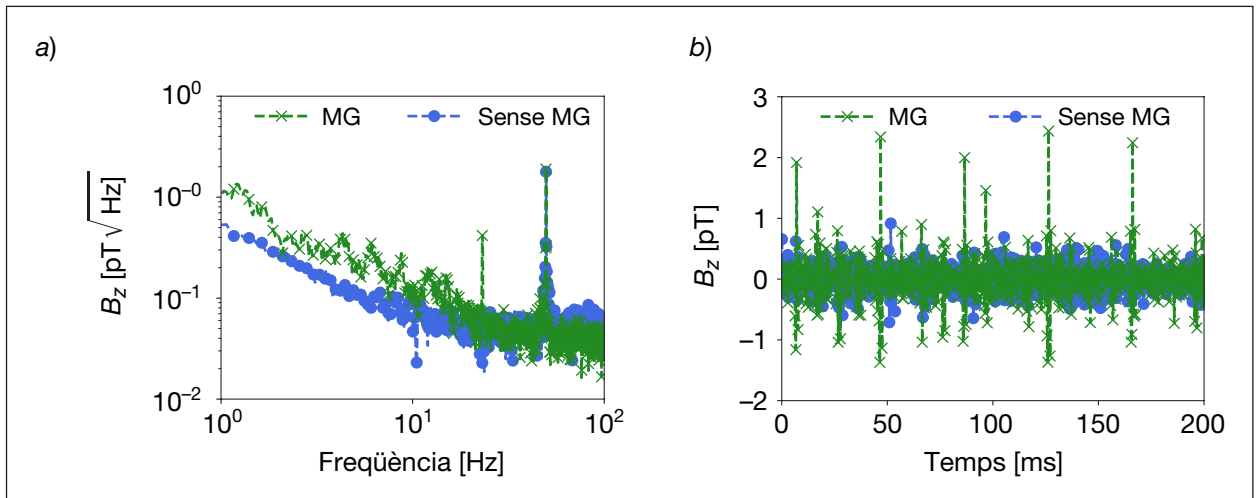


FIGURA 6. Detecció de gotes magnètiques a un flux de 25 got. s<sup>-1</sup> a) en funció de la freqüència i b) en funció del temps.  
FONT: Elaboració pròpia.

TAULA 1  
Característiques dels pics detectats de les gotes magnètiques a fluxos des de 5 fins a 25 got. s<sup>-1</sup>

| Flux de gota (got. s <sup>-1</sup> ) | Magnitud del pic (pT) | Amplada de pic (ms) | Soroll de fons (pT √Hz <sup>-1</sup> ) | SNR (dB)     |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|--|--------------|
| 5                                    | 22,83 ± 5,64          | 279,99 ± 28,33      | 0,35 ± 0,05                            | 21,98 ± 2,18 |
| 10                                   | 15,61 ± 2,59          | 169,13 ± 24,93      | 0,26 ± 0,08                            | 21,25 ± 2,60 |
| 15                                   | 8,17 ± 1,31           | 56,92 ± 12,40       | 0,20 ± 0,06                            | 17,91 ± 2,54 |
| 20                                   | 5,59 ± 0,68           | 48,43 ± 8,12        | 0,16 ± 0,04                            | 16,55 ± 2,13 |
| 25                                   | 2,88 ± 0,08           | 36,10 ± 4,54        | 0,09 ± 0,03                            | 15,79 ± 2,50 |

FONT: Elaboració pròpia.

En aquest sentit, un grau de detecció suficient és una condició necessària per a detectar gotes magnètiques, però s’ha d’acompanyar amb una variació mesurable del senyal quan es detecta una gota. Per tant, un paràmetre més adequat per a caracteritzar la detecció de les gotes quan es desplacen del microcanal a la punta de la MG és la SNR, és a dir, la relació entre el senyal, definit com la magnitud de la resposta dels pics detectats, i el soroll, que és la variació de magnitud de la línia de base.

Així, el soroll de fons per als diferents fluxos de gota es va quantificar amb mesures en funció de la freqüència. En particular, per a cada freqüència de flux de gota es va determinar el soroll de fons com el valor a la freqüència corresponent, però eliminant el pic específic present amb el filtre gaussià. Els valors obtinguts anaven des de 0,35 pT √Hz<sup>-1</sup> fins a un valor de soroll mínim de 0,09 pT √Hz<sup>-1</sup>, seguint la tendència de la línia de base de la figura 6a. De la mateixa manera, la SNR per als diferents fluxos de gota és 21,98 dB, 21,25 dB, 17,91 dB, 16,55 dB i 15,79 dB, respectivament. En general, la SNR obtinguda per a l’OPM-MG és superior a 15 dB per a l’interval de fluxos mesurats. A més, la SNR observada disminueix de manera constant amb el flux de gota, com s’ha discutit a l’apartat 4.1, amb una reducció de 6,19 dB per a un factor 5 d’augment de flux. Alhora, el flux de gotes defineix la mida volumètrica de les gotes magnètiques, amb gotes més petites per a fluxos majors. Llavors, l’augment del flux de gotes implica un factor de pèr-

dua de  $10 \log_{10} 5 = 6,99$  dB, que coincideix amb la disminució de la SNR mencionada. En aquest sentit, a la figura 7 es representa, en escala logarítmica, el volum de les gotes magnètiques, en nL, en relació amb els valors de la SNR obtinguts experimentalment. A més, s’ha fet una regressió de les dades amb una funció exponencial per a computar la linealitat (en escala logarítmica) de la tendència, amb un coeficient de correlació  $R^2 = 0,88$  com a resultat. És a dir, que la SNR

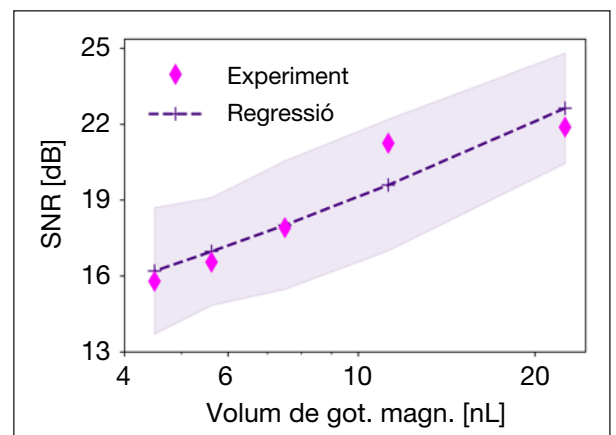


FIGURA 7. Representació logarítmica del volum de gota magnètica (en nL) segons la SNR (rombes de color magenta) de la taula 1. També es representa una corba de regressió exponencial (línia trencada lila) per a mostrar la relació quasi lineal amb un coeficient de correlació  $R^2 = 0,88$ .  
FONT: Elaboració pròpia.

segueix la tendència prevista i és logarítmicament proporcional a la dimensió volumètrica de les gotes magnètiques.

En aquest aspecte, destaquem la similitud entre les gotes magnètiques i els senyals magnètics de cèl·lules (per exemple, potencials d'acció), que coincideixen parcialment pel que fa a la mida. En particular, en aquest estudi les gotes magnètiques més petites mesuren uns 100  $\mu\text{m}$ , mentre que algunes cèl·lules (per exemple, cèl·lules grans d'humans, protozous i llevats) tenen diàmetres al voltant de 50  $\mu\text{m}$  [57]. Per tant, quan tenim en compte la disminució de senyal de 10 dB prevista a causa de la reducció de volum en un factor aproximat de 10 d'aquestes cèl·lules, les mesures obtingudes en aquest estudi indiquen que el grau de detecció, és a dir, del potencial d'acció d'algunes cèl·lules grans, cau dins de les capacitats experimentals demostrades per al sistema que es presenta.

## 6. Conclusió

S'espera que l'ús d'instruments OPM-MG ofereixi noves oportunitats, especialment pel que fa a sensibilitat i resolució espacial elevades, en la física de la detecció aplicada i en altres àrees de la ciència. En particular i en primer lloc, aquest estudi descriu i demostra experimentalment la possibilitat d'eliminar la barrera de la diferència entre els objectes micromètrics i l'escala d'operació mil·limètrica dels OPM generals en connectar-los amb una MG cònica.

La física rellevant de la magnetometria s'ha presentat en aquest article, fent èmfasi en la resolució espacial i la sensibilitat d'un OPM-MG per a detectar gotes magnètiques en una plataforma microfluídica. En aquest sentit, s'han discutit les diferents quantitats mesurades i calculades i s'ha destacat el paper de la MG. A més, s'ha demostrat i argumentat la capacitat de l'OPM-MG per a detectar gotes magnètiques individuals en un microcanal amb una resolució espacial i una SNR suficients.

Adicionalment, tenint en compte l'elevat potencial de la tecnologia quàntica per a la detecció, considerem que és crucial millorar el disseny dels analitzadors magnètics basats en OPM. En els pròxims anys l'ús d'avenços quàntics en detecció a escala micromètrica augmentarà de manera constant a través de sistemes de detecció nous i eficients i també de nous instruments de detecció, anàlisi i formació d'imatges.

## Disponibilitat de les dades

Es podria accedir a les dades en què es basen les observacions d'aquest estudi a través d'una petició als autors.

## Agraïments

Agraïm a César A. Palacios, Shuhan Wang i Lluís Jofre els seus comentaris, ajuda i l'accés als instruments de labora-

tori. Aquest estudi ha estat finançat per l'ajuda DR-2014-2022/56-30157-2021-2A de la Generalitat de Catalunya i les ajudes ICYT PID2019-107885GB-C31 i Prueba de Concepto PDC2022-133091-I00 del Ministeri de Ciència, Innovació i Universitats (Espanya).

## Identificadors ORCID

Marc Jofre: <https://orcid.org/0000-0002-8912-6595>.

Jordi Romeu: <https://orcid.org/0000-0003-0197-5961>.

Luis Jofre-Roca: <https://orcid.org/0000-0002-0547-901X>.

## Referències

- [1] ABGRALL, P.; GUÉ, A. M. (2007). *J. Micromech. Microeng*, **17**, R15-R49.
- [2] OSBORNE, J.; ORTON, J.; ALEM, O.; SHAH, V. (2018). «Fully integrated, standalone zero field optically pumped magnetometer for biomagnetism». *Proc. SPIE*, **10548**, 51.
- [3] TIERNEY, T. M. [et al.] (2019). *Neuroimage*, **199**, 598-608.
- [4] SULAI, I. A.; LAND, Z. J. de; BULATOWICZ, M. D.; WAHL, C. P.; WAKAI, R. T.; WALKER, T. G. (2019). *Rev. Sci. Instrum*, **90**, 085003.
- [5] GI, H. J.; HAN, D.; PARK, J. K. (2017). *Biofabrication*, **9**, 015011.
- [6] COLEMAN, H.; BROOKES, M. (2021). *Phys. World*, **34**, 23-27.
- [7] BUDKER, D.; ROMALIS, M. (2007). *Nat. Phys.*, **3**, 227-34.
- [8] ETCHEVERRY, S.; FARIDI, A.; RAMACHANDRAIAH, H.; KUMAR, T.; MARGULIS, W.; LAURELL, F.; RUSSOM, A. (2017). *Sci. Rep.*, **7**, 5628.
- [9] ZARRINKHAT, F.; JOFRE-ROCA, L.; JOFRE, M.; RIUS, J. M.; ROMEU, J. (2022). *Sensors*, **22**, 2441.
- [10] SHANG, L.; ZHAO, Y. (2021). *Matter*, **4**, 95-115.
- [11] MARTINO, C.; MELLO, A. J. de (2016). *Interface Focus*, **6**, 20160011.
- [12] KIM, S. H.; SHIM, J. W.; LIM, J. M.; LEE, S. Y.; YANG, S. M. (2009). *New J. Phys.*, **11**, 075014.
- [13] BOUGAS, L.; LANGENEGGER, L. D.; MORA, C. A.; ZELTNER, M.; STARK, W. J.; WICKENBROCK, A.; BLANCHARD, J. W.; BUDKER, D. (2018). *Sci. Rep.*, **8**, 3491.
- [14] NGUYEN, N. T. (2006). *Fundamentals and applications of microfluidics*. 2a ed. Boston: Artech House Publishers.
- [15] CARLO, D. D. (2009). *Lab Chip*, **9**, 3038-46.
- [16] CONVERY, N.; GADEGAARD, N. (2019). *Micro Nano Eng.*, **2**, 76-91.
- [17] JOFRE, M.; JOFRE, L.; JOFRE-ROCA, L. (2021). *Sensors*, **21**, 3420.
- [18] RUSSOM, A.; GUPTA, A. K.; NAGRATH, S.; CARLO, D. D.; EDD, J. F.; TONER, M. (2009). *New J. Phys.*, **11**, 075025.
- [19] PALACIOS, C.; JOFRE, M.; JOFRE, L.; ROMEU, J.; JOFRE-ROCA, L. (2022). *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **71**, 1-10.
- [20] DEGEN, C. L.; REINHARD, F.; CAPPELLARO, P. (2017). *Rev. Mod. Phys.*, **89**, 035002.
- [21] GERGINOV, V.; SILVA, F. C. S. da; HOWE, D. (2017). *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 125005.

- [22] FU, K. M. C.; IWATA, G. Z.; WICKENBROCK, A.; BUDKER, D. (2020). *AVS Quantum Sci.*, **2**, 044702.
- [23] AMORÓS-BINEFA, J.; KOŁODYŃSKI, J. (2021). *New J. Phys.*, **23**, 123030.
- [24] MITCHELL, M. W. (2020). *New J. Phys.*, **22**, 053041.
- [25] AHARON, N.; COHEN, I.; JELEZKO, F.; RETZKER, A. (2016). *New J. Phys.*, **18**, 123012.
- [26] FANCHER, C. T.; SCHERER, D. R.; JOHN, M. C. S.; MARLOW, B. L. S. (2021). *IEEE Trans. Quantum Eng.*, **2**, 1-13.
- [27] ACÍN, A. [et al.] (2018). *New J. Phys.*, **20**, 080201.
- [28] SUBCOMMITTEE ON QUANTUM INFORMATION SCIENCE (2022). *Bringing quantum sensors to fruition*. National Science & Technology Council.
- [29] KIM, Y. J.; SAVUKOV, I. (2016). *Sci. Rep.*, **6**, 24773.
- [30] GRIFFITH, W. C.; JIMENEZ-MARTINEZ, R.; SHAH, V.; KNAPPE, S.; KITCHING, J. (2009). *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 023502.
- [31] PUT, P.; PUSTELNY, S.; BUDKER, D.; DRUGA, E.; SJOLANDER, T. F.; PINES, A.; BARSKIY, D. A. (2021) *Anal. Chem.*, **93**, 3226-32.
- [32] SOARES, R.; MARTINS, V. C.; MACEDO, R.; CARDOSO, F. A.; MARTINS, S. A. M.; CAETANO, D. M.; FONSECA, P. H.; SILVÉRIO, V.; CARDOSO, S.; FREITAS, P. P. (2019). «Go with the flow: Advances and trends in magnetic flow cytometry». *Anal Bioanal Chem*, **411**, 1839-62.
- [33] NAVAU, C.; PRAT-CAMPS, J.; ROMERO-ISART, O.; CIRAC, J. I.; SANCHEZ, A. (2014). *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 253901.
- [34] KONDO, T.; ITOZAKI, H.; KOETITZ, R. (2003). *Supercond. Sci. Technol.*, **16**, 1528-30.
- [35] RABI, I. I.; ZACHARIAS, J. R.; MILLMAN, S.; KUSCH, P. (1938). *Phys. Rev.*, **53**, 318.
- [36] GERLACH, W.; STERN, O. (1922). *Z. Phys.*, **9**, 349-52.
- [37] BLOCH, F.; HANSEN, W. W.; PACKARD, M. (1946). *Phys. Rev.*, **70**, 474-85.
- [38] BELL, W. E.; BLOOM, A. L. (1957). *Phys. Rev.*, **107**, 1559-65.
- [39] GROEGER, S.; PAZGALEV, A. S.; WEIS, A. (2005). *Appl. Phys. B*, **80**, 645-54.
- [40] KITCHING, J.; KNAPPE, S.; SHAH, V.; SCHWINDT, P.; GRIFFITH, C.; JIMENEZ, R.; PREUSSER, J.; LIEW, L. A.; MORELAND, J. (2008). «Microfabricated atomic magnetometers and applications». A: *2008 IEEE Int. Frequency Control Symp*, 789-94.
- [41] ZHANG, Y. H.; YANG, W. (2018). *New J. Phys.*, **20**, 093011.
- [42] DUPONT-ROC, J.; HAROCHE, S.; COHEN-TANNOUDJI, C. (1969). *Phys. Lett. A*, **28**, 638-9.
- [43] SHAH, V. K.; WAKAI, R. T. (2013). *Phys. Med. Biol.*, **58**, 8153-61.
- [44] ALLRED, J. C.; LYMAN, R. N.; KORNACK, T. W.; ROMALIS, M. V. (2022). *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 130801.
- [45] GALAS, J. C.; BARTOLO, D.; STUDER, V. (2009). *New J. Phys.*, **11**, 075027.
- [46] TIPLER, P. A.; MOSCA, G. (2003). *Physics for scientists and engineers: Standard version*. 5a ed. Nova York: W. H. Freeman.
- [47] GUNAWAN, O.; KRISTIANO, J.; KWEE, H. (2020). *Phys. Rev. Res.*, **2**, 013359.
- [48] HART, S.; HART, K.; SELVAGGI, J. P. (2020). *IEEE Trans. Magn.*, **56**, 1-9.
- [49] FAIRWEATHER, A.; ROBERTS, F. F.; WELCH, A. J. E. (1952). *Rep. Prog. Phys.*, **15**, 142-72.
- [50] SELTZER, S. J.; ROMALIS, M. V. (2004). *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 4804-6.
- [51] KARAUANOV, T.; SAVUKOV, I.; KIM, Y. J. (2016). *Meas. Sci. Technol.*, **27**, 055002.
- [52] SAVUKOV, I.; KIM, Y. J.; SHAH, V.; BOSHIER, M. G. (2017). *Meas. Sci. Technol.*, **28**, 035104.
- [53] FANG, X. [et al.] (2022). *Opt. Express*, **30**, 3926-40.
- [54] SONG, Z.; ZHANG, W.; WU, Q.; MU, H.; LIU, X.; ZHANG, L.; QU, J. (2018). *Sensors*, **18**, 3205.
- [55] CATES, G. D.; SCHAEFER, S. R.; HAPPER, W. (1988). *Phys. Rev. A*, **37**, 2877-85.
- [56] LEE, S. K.; ROMALIS, M. V. (2008). *J. Appl. Phys.*, **103**, 084904.
- [57] TORTORA, G.; FUNKE, B.; CASE, C. (2018). *Microbiology: An introduction*. 13a ed. Boston: Pearson.