

## Lumière supercontinuum et plasmons de surface dans une valise !

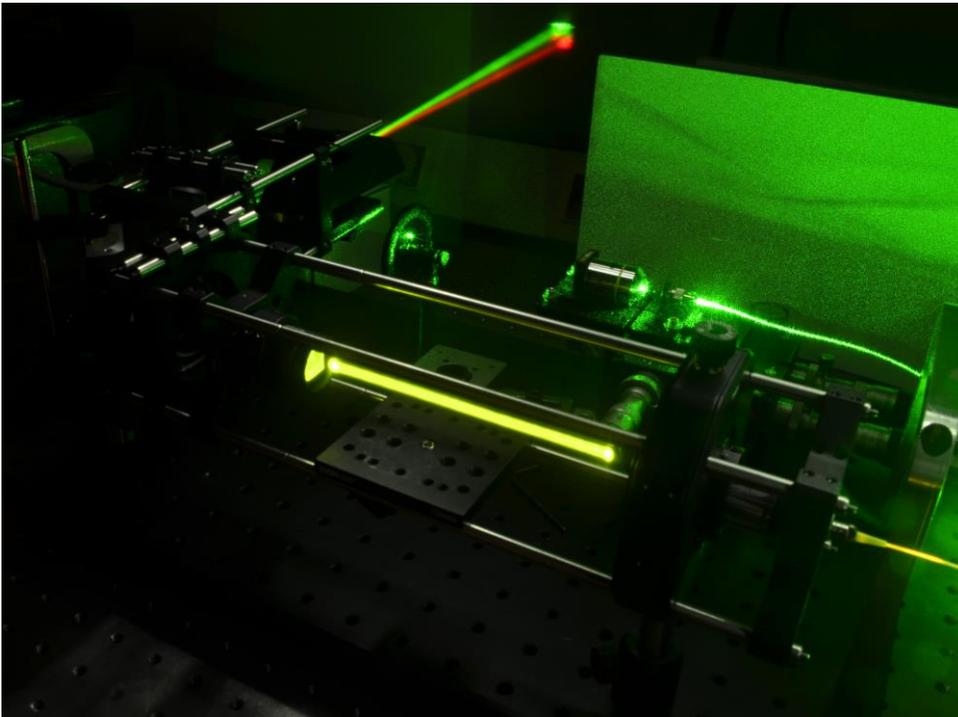
*Gil Fanjoux\*, Jérôme Salvi, Jean-Charles Beugnot, Thibaut Sylvestre*

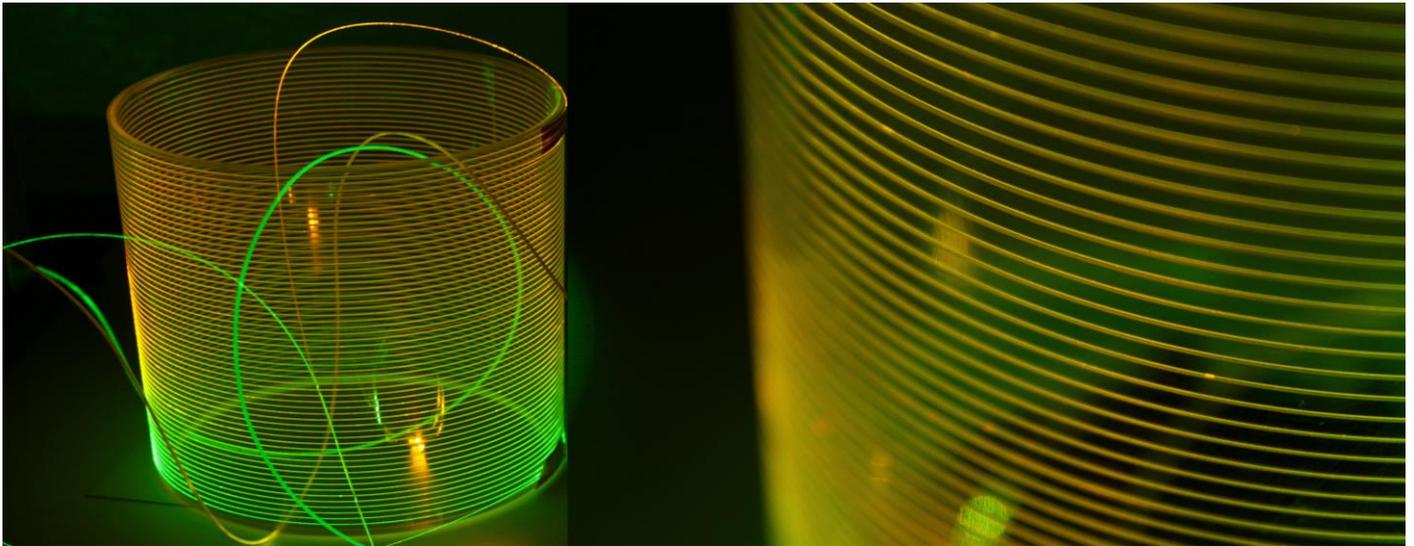
*Institut FEMTO-ST, CNRS-Université Bourgogne Franche-Comté (UBFC), 25030 Besançon, France*

*\* [gil.fanjoux@univ-fcomte.fr](mailto:gil.fanjoux@univ-fcomte.fr)*

*Résumé. Cet article présente un montage optique compact et transportable illustrant la génération de supercontinuum dans une fibre optique suivie de l'excitation d'un plasmon de surface sur un film d'or. Mise sous la forme d'une valise pédagogique, ce montage est utilisé depuis 2015 (Année internationale de la lumière) comme support lors de visites de laboratoire ou d'expositions au grand public. Grâce à ses multiples facettes et sa richesse scientifique, il permet d'illustrer et d'expliquer de manière efficace et passionnante les phénomènes d'optique non linéaire et la physique des plasmons.*

Figure entête





## 1. Introduction

Concevoir des montages optiques pédagogiques au sein des laboratoires de recherche devient essentiel à plusieurs titres. Tout d'abord, les laboratoires sont de plus en plus sollicités pour des visites du grand public afin de faire découvrir les différents métiers de la recherche, les disciplines et les découvertes réalisées. Ainsi, ils accueillent des visites régulières de collégiens et lycéens, de professeurs du secondaire, ou des visites ponctuelles grand public lors de journées portes ouvertes ou fête de la science notamment. Ces visites doivent être l'occasion de présenter des expériences attrayantes issues de la recherche actuelle, didactiques et esthétiques. La valise pédagogique peut être un parfait support de discours dans une salle d'expérience du laboratoire ou dans une salle de travaux pratiques. Outre les visites en laboratoire, les enseignants chercheurs sont également amenés à présenter leurs travaux hors du laboratoire. La valise pédagogique devient alors un support visuel et matériel essentiel lors de conférences grand public, ou lors d'enseignements en Licence ou en Master.

L'optique non linéaire et la plasmonique répondent parfaitement à tous ces critères énoncés. Plus spécifiquement, la génération de nouvelles « couleurs » à partir d'une source laser monochromatique injectée dans une fibre optique impressionne immédiatement le public et les étudiants. La génération de supercontinuum est assurément une expérience qui marque les esprits des plus jeunes comme des adultes. Par ailleurs, ces expériences peuvent être expliquées simplement à un public large, les processus non linéaires mis en jeu, les effets Kerr et Raman, ainsi que les plasmons de surface, pouvant être compris dès lors que des images simples sont utilisées.

Cet article présente la réalisation d'un montage optique sur la lumière supercontinuum générée dans une fibre optique et son application directe à l'observation de la courbe de dispersion d'un plasmon de surface sur un film d'or. Nous nous attacherons à décrire les différents éléments de cette expérience et les choix dans le matériel utilisé afin d'assurer la qualité visuelle et pédagogique du montage, ainsi que sa robustesse.

## 2. Présentation du montage

Le schéma de principe de l'expérience est présenté sur la figure 1. La source lumineuse est un laser compact microchip Nd:YAG doublé en fréquence de longueur d'onde 532nm. Ce laser émet des impulsions de durée 570ps à un taux de répétition de 21kHz, sa puissance moyenne est de 60mW, donnant ainsi une puissance crête maximale de 5kW, suffisante pour générer un supercontinuum. Une densité variable est placée en sortie du laser afin de pouvoir contrôler la puissance injectée dans la fibre. Elle permet de passer du régime linéaire au régime fortement non linéaire, et d'observer les phases successives de la génération de supercontinuum. Le faisceau laser est injecté dans une fibre

optique de télécommunication à dispersion décalée (DSF) à l'aide d'un objectif de microscope x10, de distance focale  $f'=18\text{mm}$ . Le connecteur d'entrée de la fibre est vissé sur un support fixé sur la platine de translation XYZ à vis micrométrique permettant l'optimisation de l'injection du faisceau dans la fibre.

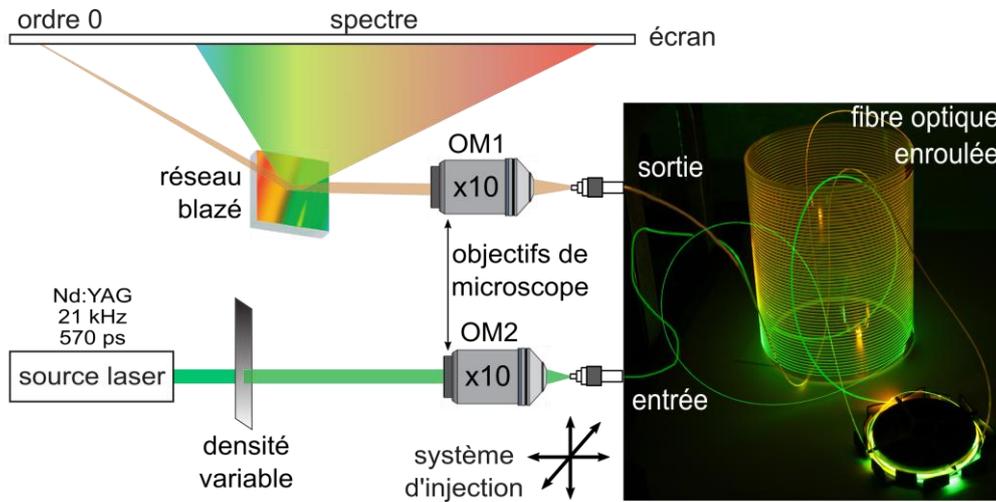


Figure 1. Schéma de principe de l'expérience de génération de supercontinuum dans une fibre optique.

La DSF permet d'obtenir aisément un supercontinuum couvrant une large bande de fréquences optiques allant du visible à l'infrarouge [1,2] pour une longueur de fibre relativement courte ( $L=20\text{m}$ ). Le faisceau en sortie de fibre est collimaté à l'aide d'un objectif de microscope pour limiter les aberrations géométriques. Afin d'observer le spectre d'émission de la fibre, un réseau de diffraction en réflexion est ajouté après l'objectif de microscope. Ce réseau blazé de 2400 traits/mm permet d'obtenir un étalement suffisant du spectre sur un écran proche tout en restant lumineux. Le montage est représenté sur la figure 2.

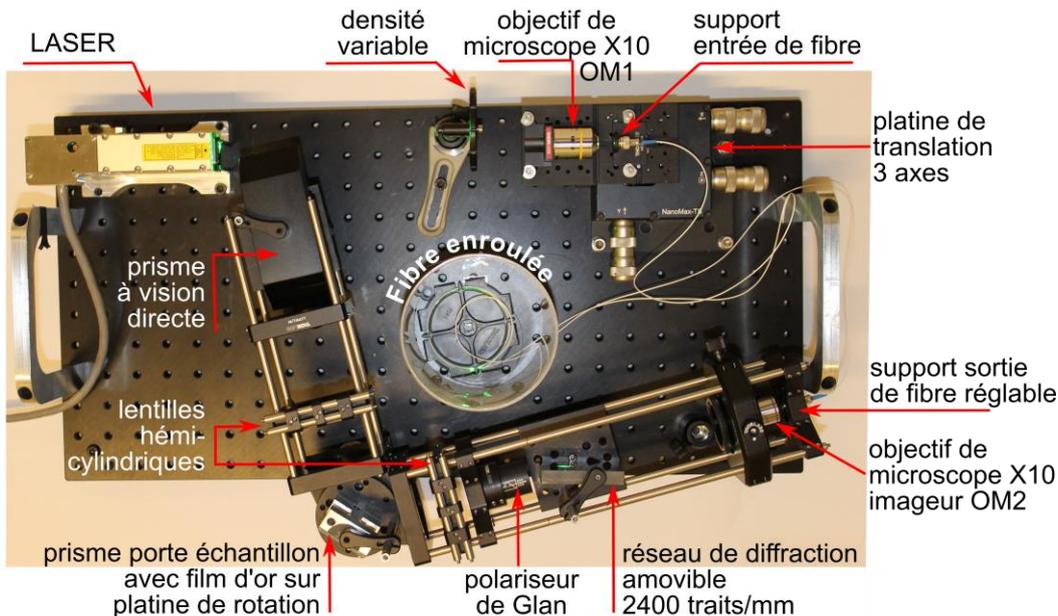
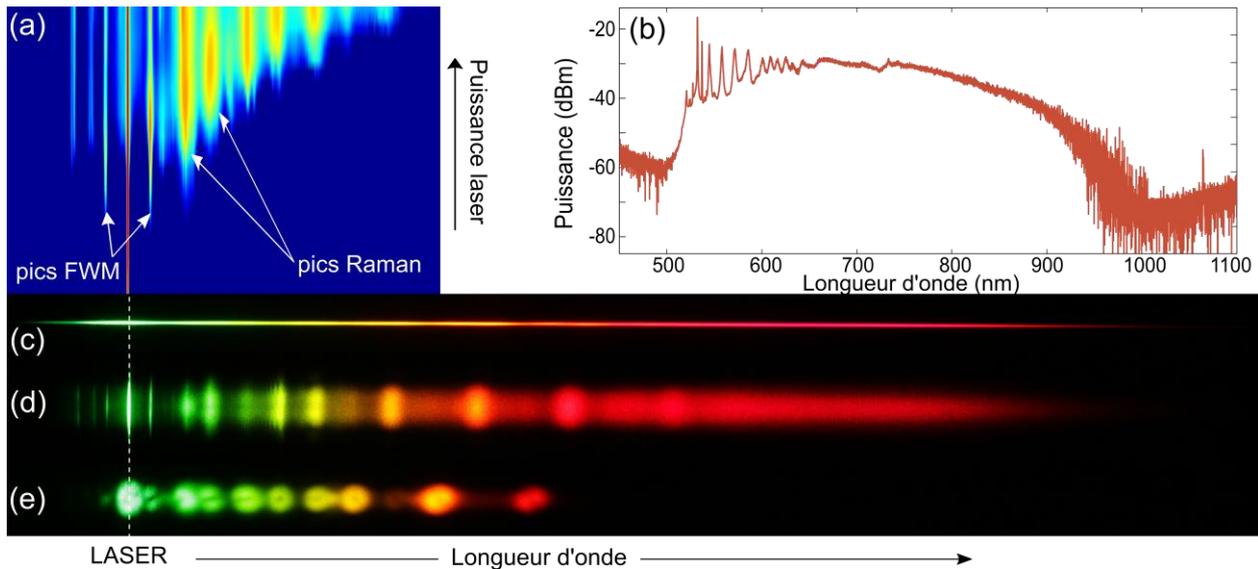


Figure 2. Photographie du montage optique.

Les phénomènes mis en jeu dans la génération de ce supercontinuum correspondent principalement à la diffusion Raman stimulée et au mélange à quatre ondes (FWM pour *Four Wave Mixing*) [1,2]. En augmentant la puissance du

laser avec la densité variable, on observe la génération successive de nouvelles fréquences dans le spectre de sortie de fibre, comme le montre la figure 3a. Des pics fins de FWM apparaissent en premier lieu au voisinage de la longueur d'onde du laser, suivis d'une double cascade Raman, et enfin la génération de supercontinuum jusqu'à 900nm (figure 3b) [2]. En traduisant légèrement le support de sortie de la fibre optique par rapport à l'objectif de microscope OM2, on peut imaginer successivement le spectre du supercontinuum (figure 3c), la différence de largeur des pics fins de FWM et des pics larges Raman (figure 3d), ou les différents modes spatiaux de la fibre optique dans lesquelles se propagent et interagissent ces nouvelles fréquences (figure 3e). Cela permet notamment d'expliquer les notions d'accord de phase entre les différents modes spatiaux supportés par la fibre optique et la dispersion de vitesse de groupe normale. La flexibilité de notre montage optique peut donc supporter un discours à différents niveaux de complexité.



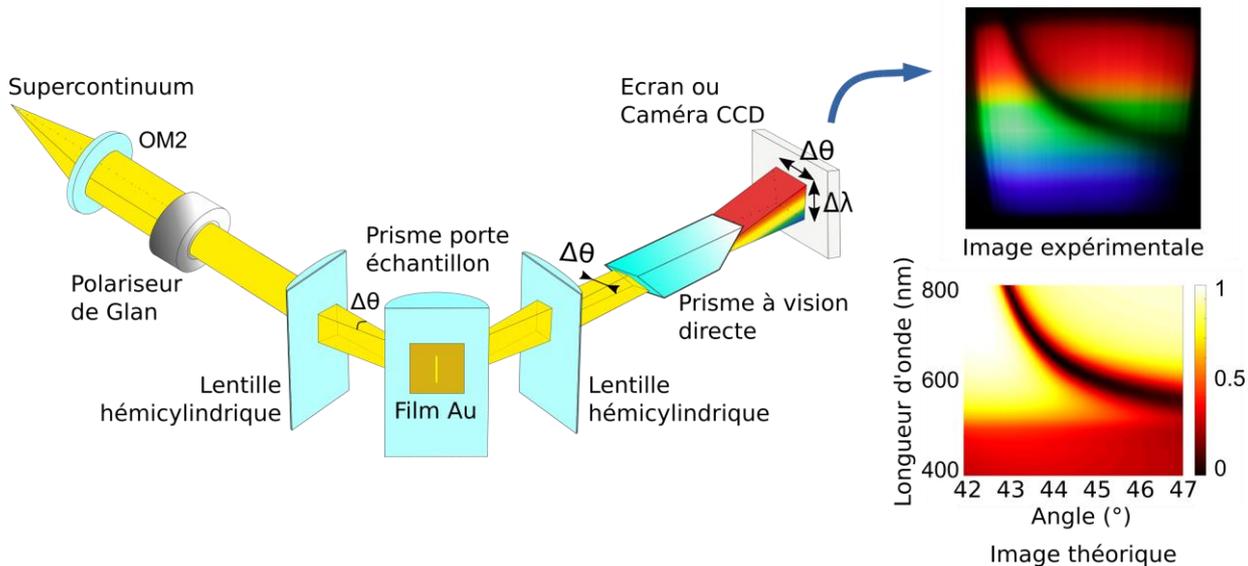
**Figure 3.** (a) Evolution du spectre en sortie de fibre en fonction de la puissance moyenne injectée (mesures à l'analyseur de spectre). (b) spectre expérimental à puissance maximale. Images sur l'écran (c) du spectre supercontinuum fin, (d) en configuration spectroscopie, (e) des modes de la fibre.

Les contraintes associées à cette valise pédagogique sont de différents ordres : dimensions et poids, injection optimale du faisceau laser dans la fibre, robustesse, longévité, et sécurité envers le public. La première contrainte que nous avons fixée correspond à la dimension de la plaque sur laquelle doit tenir l'ensemble de l'expérience. Cette plaque, de dimension limitée à 60x30x1.7cm, de 7.2kg, et percée de trous M6 (voir figure 2), assure la rigidité de l'ensemble afin que l'injection dans le cœur de la fibre soit parfaitement stable lors d'une démonstration, voire entre plusieurs utilisations. La hauteur du faisceau laser est imposée par la hauteur de la platine de translation XYZ sur laquelle le connecteur d'entrée de fibre est positionné. La seconde contrainte correspond à l'optimisation de l'injection du faisceau laser dans la fibre afin de limiter les pertes par injection et ainsi obtenir un maximum de puissance optique couplée dans le cœur de la fibre et atteindre des puissances crêtes nécessaires pour la génération de supercontinuum. Afin d'optimiser cette injection, il est nécessaire de connaître précisément le diamètre (ou beam waist) du faisceau laser au foyer de l'objectif de microscope qui doit être comparable au diamètre du cœur de la fibre connectée. En optique des faisceaux gaussiens, le calcul du rayon  $r'_0$  du faisceau au foyer d'une lentille de focale  $f'$  est réalisé par l'équation :  $r'_0 = (\lambda f') / (\pi r_0)$ , avec  $\lambda$  et  $r_0$  la longueur d'onde et le rayon du faisceau incident respectivement. Dans notre cas, la taille du waist est volontairement légèrement supérieure à celle du cœur de la fibre. Cela permet d'avoir une injection stable, peu critique, et d'éviter d'endommager l'entrée de la fibre en raison des poussières dans des lieux grand public. A noter enfin que pour un aspect purement esthétique, la fibre optique a été enroulée sur un cylindre en plexiglas de diamètre 10cm avec un pas d'enroulement de 2mm.

### 3. Mesure directe de la courbe de dispersion d'un plasmon de surface

Un deuxième module ajouté au montage permet d'observer l'excitation d'un plasmon de surface. Pour cela le réseau est retiré et le faisceau en sortie de fibre est alors collimaté en direction d'un prisme porte-échantillon recouvert d'un film d'or. Les plasmons de surface sont une oscillation collective des électrons libres à la surface d'un métal due à un couplage avec la lumière incidente. La première observation remonte au tout début du 20<sup>e</sup> siècle par l'astronome américain R.W. Wood [3] : alors qu'il étudiait la lumière diffractée par un réseau métallique, il observa de manière surprenante de très fines bandes d'absorption dans le spectre continu d'une lampe incandescente. Ces "anomalies de Wood" ne seront expliquées qu'en 1941 par U. Fano [4] qui démontra qu'elles étaient associées à des ondes de surface entre un diélectrique et un métal, appelées aujourd'hui plasmons de surface. C'est un phénomène similaire qui explique la couleur des vitraux des cathédrales, dont les verres contiennent des nanoparticules métalliques présentant des bandes d'absorption plasmonique dans le visible.

Le montage optique ci-dessous est basé sur la configuration de Kretschmann [5] avec un film d'or de 50nm d'épaisseur déposé en salle blanche sur un prisme porte-échantillon. L'utilisation du supercontinuum permet de disposer d'une large gamme de couleurs pour observer le plasmon et les lentilles cylindriques offrent un faisceau convergent avec une plage d'angle d'incidence sur le film d'or. L'excitation du plasmon de surface a lieu en polarisation TM uniquement et pour des couples angle d'incidence / longueur d'onde bien précis (courbe de dispersion). La lumière est alors couplée au plasmon et n'est plus réfléchie, d'où l'apparition d'une trace sombre dans le spectre (figure 4), qui se décale vers les basses longueurs d'onde de 800nm à 550nm lorsque l'angle d'incidence augmente, et ce en très bon accord avec les simulations numériques.



**Figure 4.** Schéma de l'excitation d'un plasmon de surface sur un film d'or par la lumière supercontinuum, et images expérimentale et théorique de la courbe de dispersion du plasmon.

### 4. Conclusion

La lumière supercontinuum attise la curiosité et déclenche l'émerveillement du grand public grâce à sa simple apparition et à son esthétique visuelle. Elle permet de décrire des phénomènes d'optique non linéaire à différents niveaux de vulgarisation (grand public, collégiens, lycéens, étudiants de 3<sup>e</sup>me cycle). De plus, elle peut être facilement exploitée comme source de lumière blanche ponctuelle pour exciter et observer des plasmons de surface, comme

démontré dans cette expérience sur un film d'or. La valise a été construite sous forme de modules complémentaires pour la faire évoluer et permettre l'ajout d'autres expériences illustratives comme la génération de seconde harmonique, la spectroscopie d'absorption ou l'interférométrie en lumière blanche.

Cette valise pédagogique a été financée par la Région Bourgogne Franche-Comté et le labex ACTION (ANR-11-LABX-0001).

## **Références**

- [1] T. Sylvestre, E. Genier, A. N. Ghosh, P. Bowen, G. Genty, J. Troles, A. Mussot, A. C. Peacock, M. Klimczak, A. M. Heidt, J. C. Travers, O. Bang, and J. M. Dudley, "Recent advances in supercontinuum generation in specialty optical fibers [Invited]," *J. Opt. Soc. Am. B* **38**, F90-F103 (2021).
- [2] A. Mussot, T. Sylvestre, L. Provino, and H. Maillotte, "Generation of a broadband single-mode supercontinuum generation in a conventional dispersion-shifted fiber by use of a sub-nanosecond microchip laser," *Opt. Lett.* **28**, 1820 (2003).
- [3] R.W. Wood, "On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum," *Philos. Mag.* **4**, 396–402 (1902).
- [4] U. Fano, "The theory of anomalous diffraction gratings and of quasi-stationary waves on metallic surfaces (Sommerfeld's waves)," *J. Opt. Soc. Am.* **31**, 213–222 (1941).
- [5] E. Kretschmann and H. Raether, "Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light," *Z. Naturforsch. A* **23**, 2135 (1968).