

Aandrijving van geïntegreerde nanofotonische componenten door middel van de optische gradiëntkracht

Joris Roels

31/03/2011



Fiat lux... (Genesis 1:3)



Fiat fotonica...

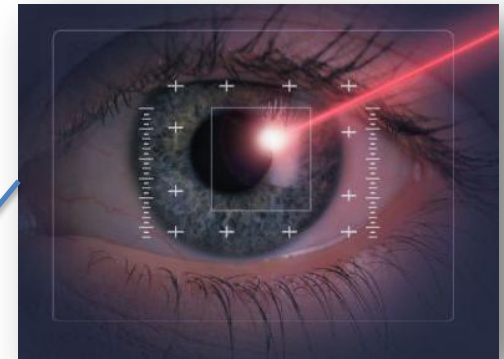
Studie van het licht in al zijn facetten:

- opwekken en detecteren van licht
- manipuleren van eigenschappen van licht (bv kleur, snelheid, richting)
- licht gebruiken als werktuig (bv interactie met materialen)

energie



biomedisch



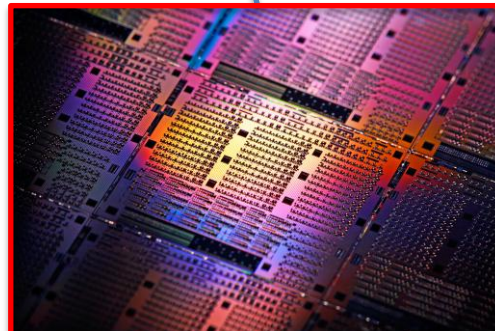
verlichting



Fotonica



materiaalbewerking



**informatietechnologie
& telecommunicatie**



display, projector

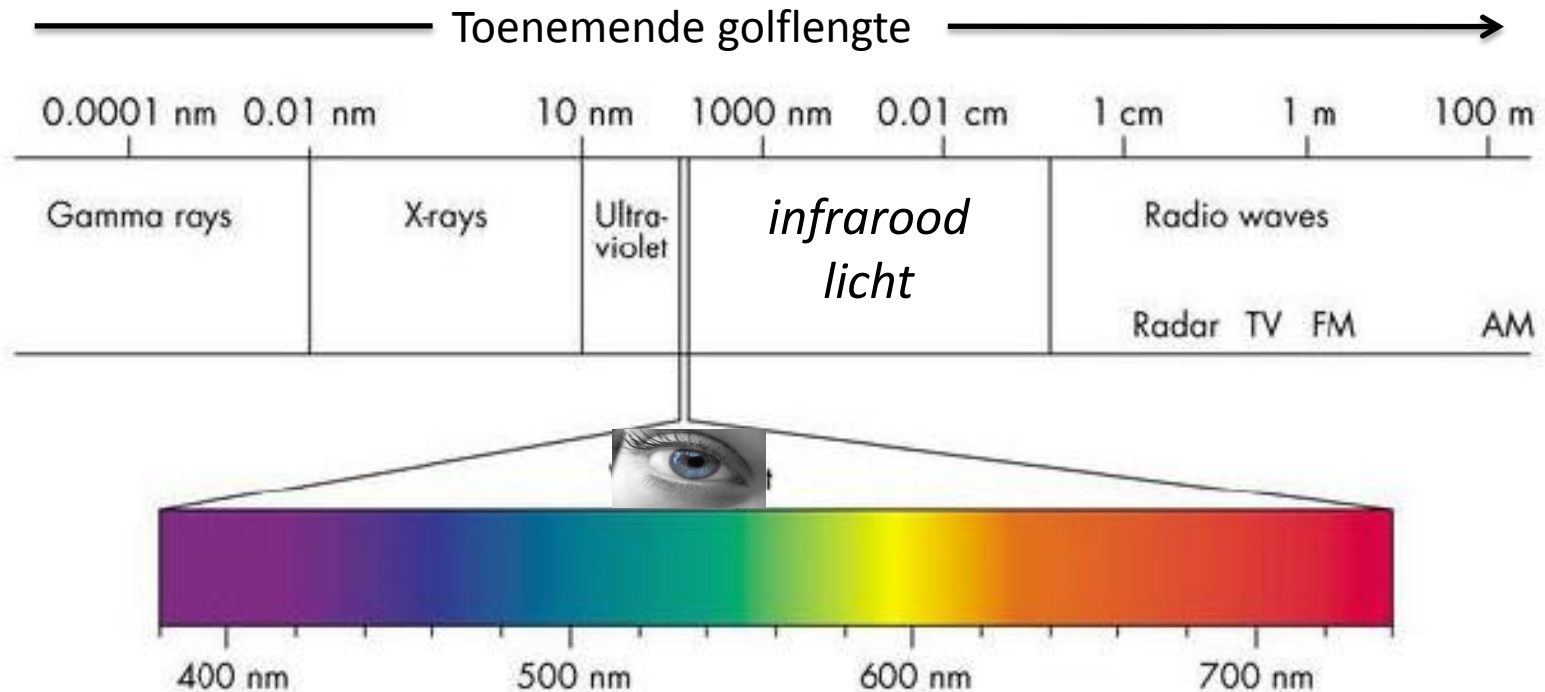
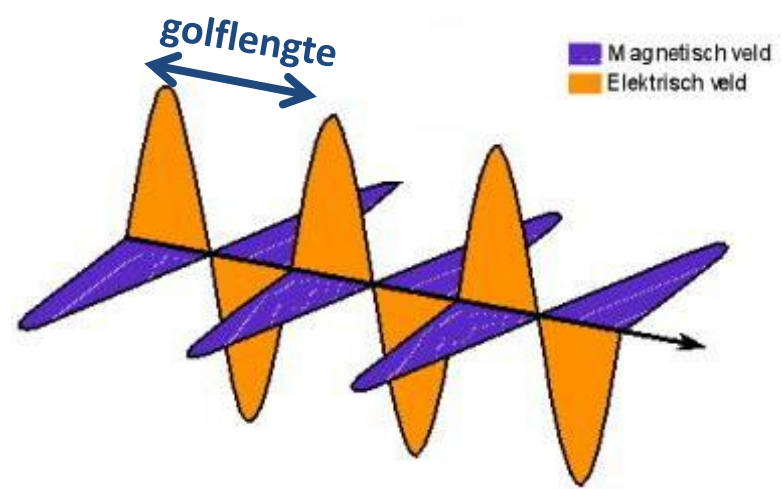
Fotonica *for dummies*

Licht = Elektromagnetische golf

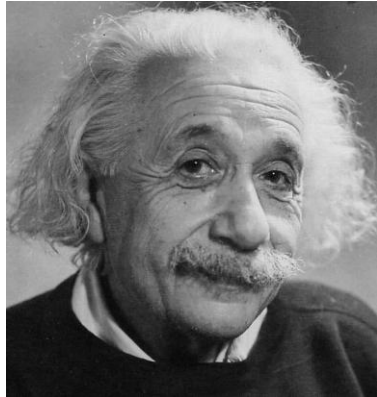
Kleur = Golflengte λ

$\lambda = 400-700$ nm: zichtbaar

$\lambda = 1550$ nm: telecom golflengte (IR)



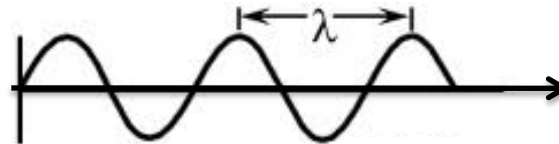
Deeltje-golf dualiteit



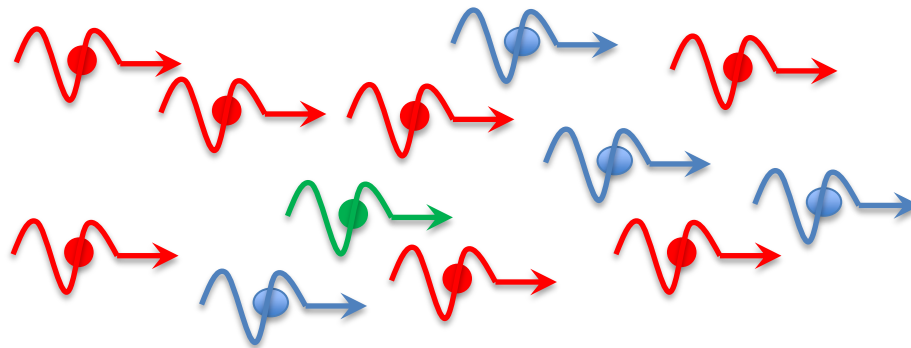
Licht is niet alleen golf,
ook deeltje

Elementair pakketje licht = foton 

licht = golf



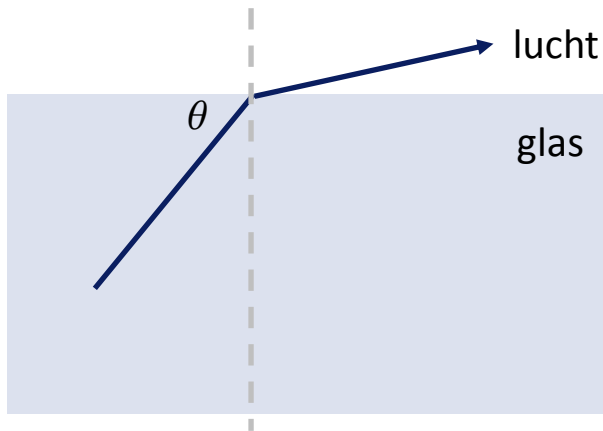
licht = fotonenstroom



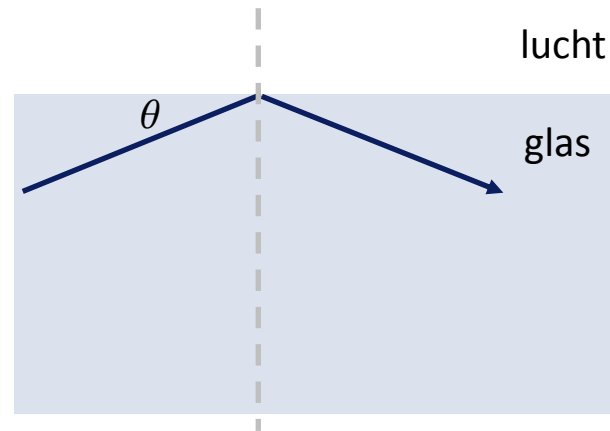
Lichtsnelheid c in vacuum = 299 792 km/s

Lichtsnelheid in materiaal neemt af met brekingsindex $n = c/n$

$n_{\text{glas}} = 1.44$

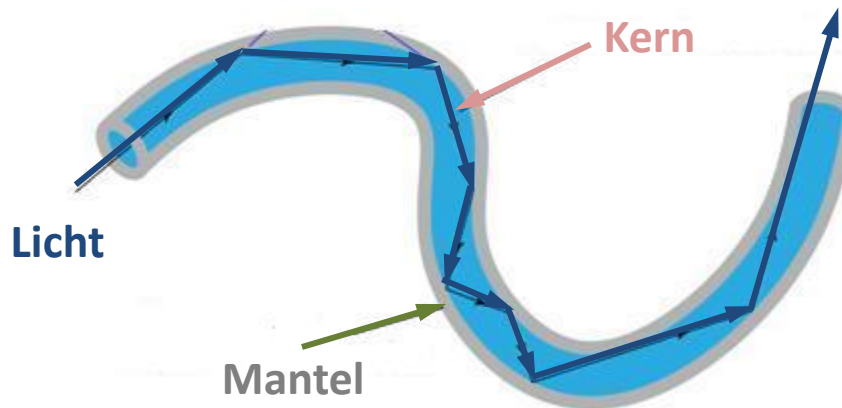
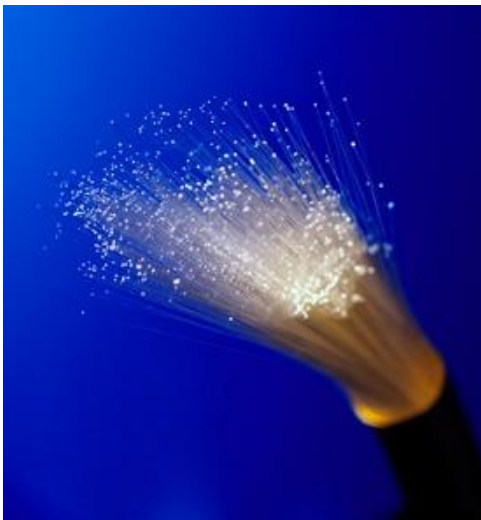
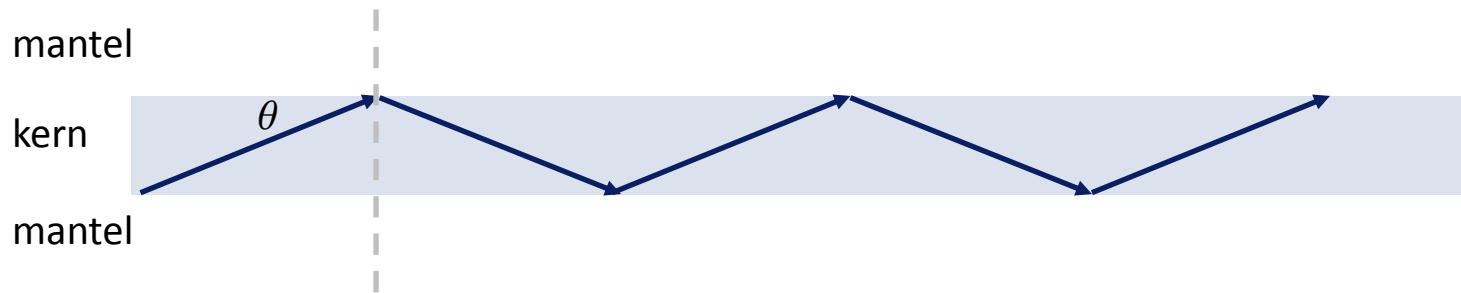


Hoek te groot: licht ontsnapt uit materiaal



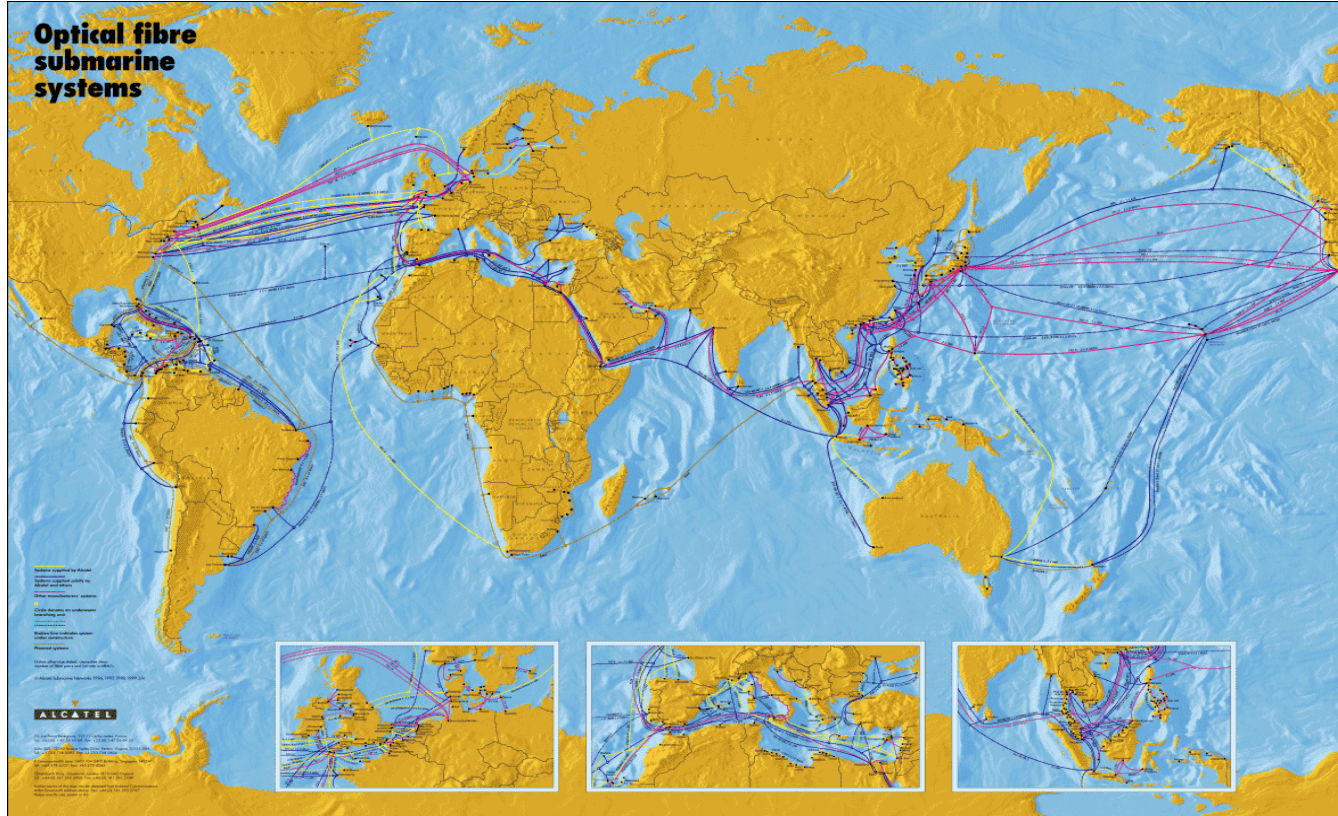
Totale interne reflectie:
alle licht blijft in materiaal

Licht kan opgesloten worden in materiaal=golfgeleider



Optische communicatie over vezel:

- veel sneller dan elektrisch
- basis van world wide web



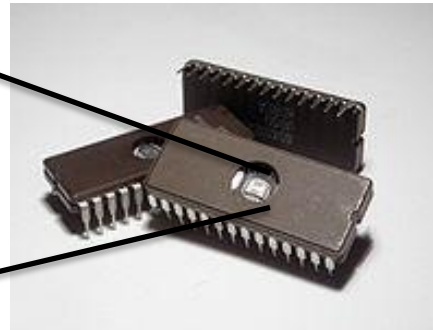
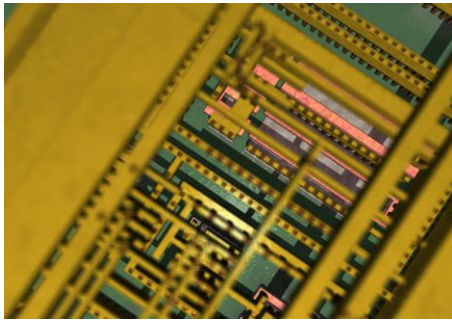
Hoe kunnen we nog beter doen?

Nanofotonica

Kracht van micro-elektronica:

-integratie: circuits op klein plakje silicium = chip

-miniaturisatie: steeds kleinere transistoren

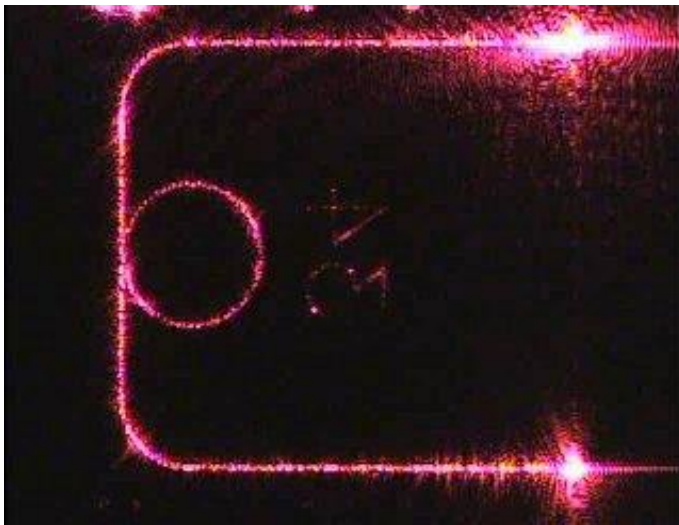


IC (integrated circuit)

⇒ Krachtige, goedkope en in massa gefabriceerde elektronica beschikbaar voor iedereen (PC, laptop, GSM, iPod, iPad...)

Zelfde concepten toepasbaar in fotonica:

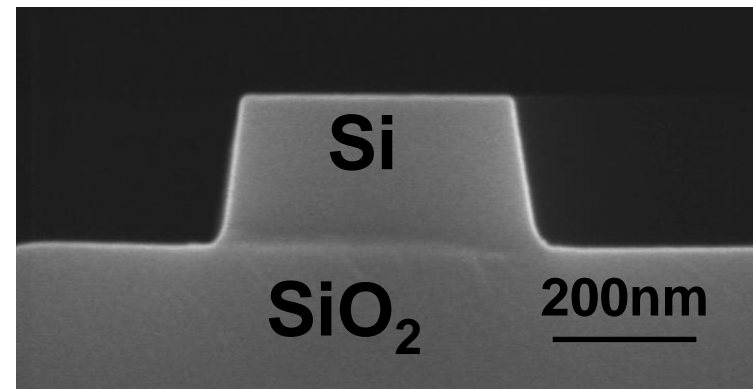
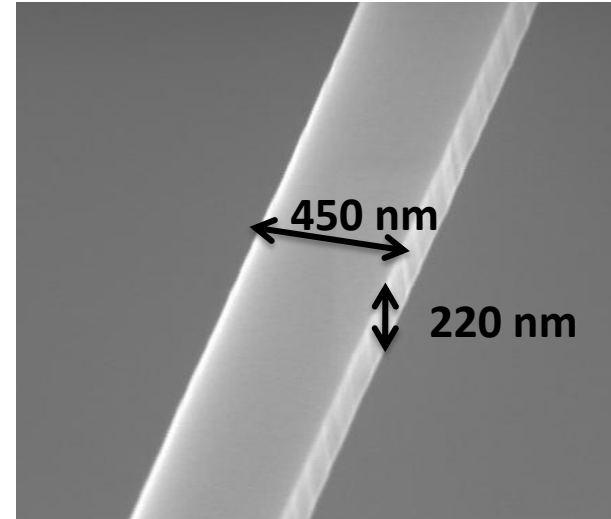
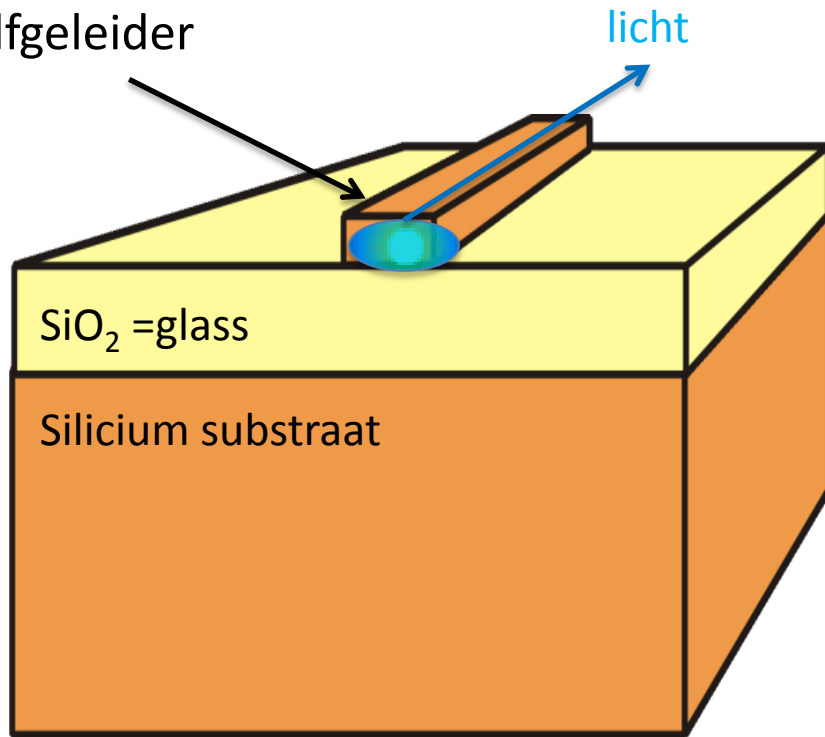
- integratie: fotonische circuits op klein plakje silicium = chip
- miniaturisatie: steeds kleinere circuits



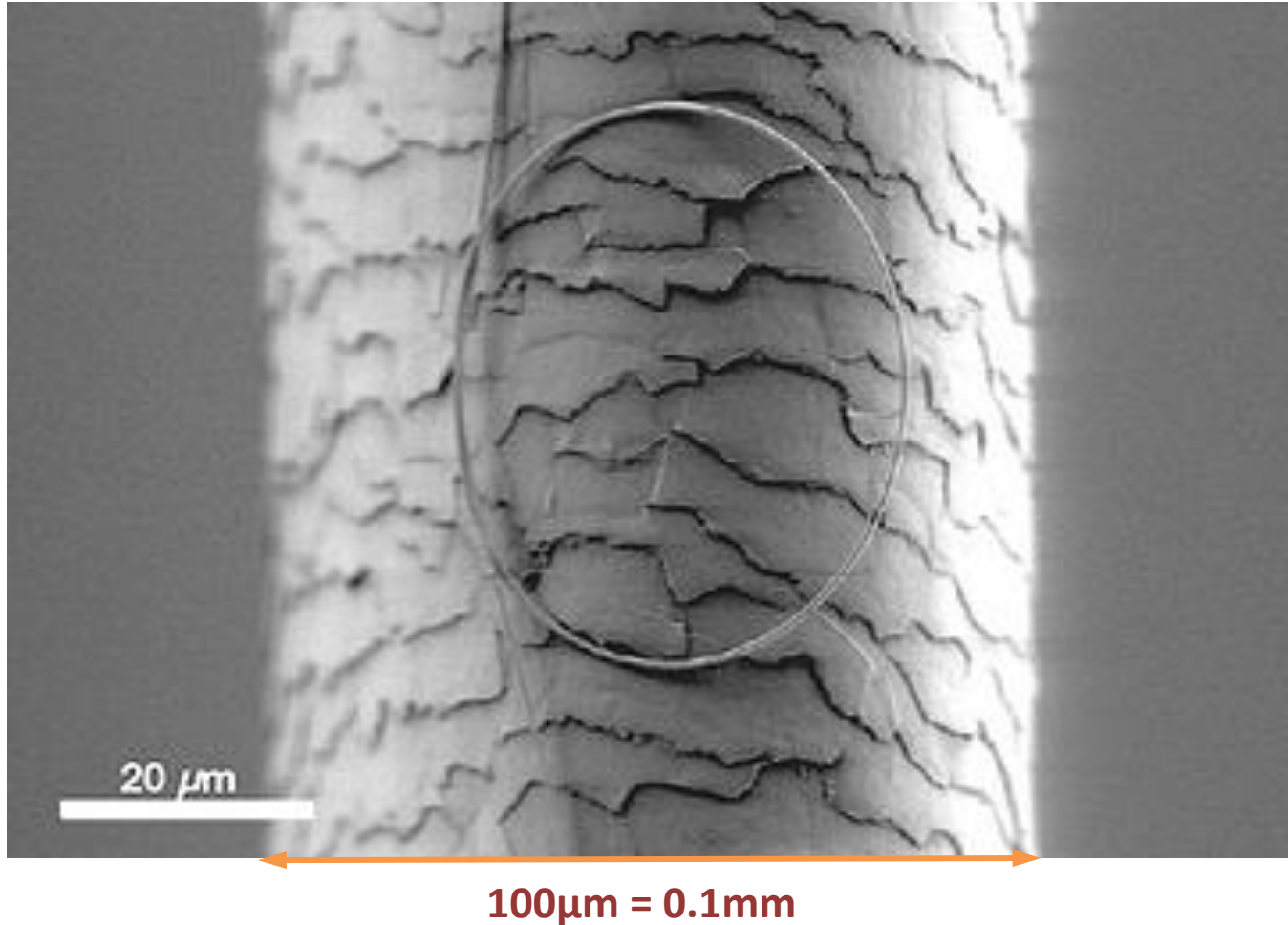
PIC (photonic integrated circuit)

Nanofotonische golfgeleider op silicium chip = miniaturversie van optische vezel

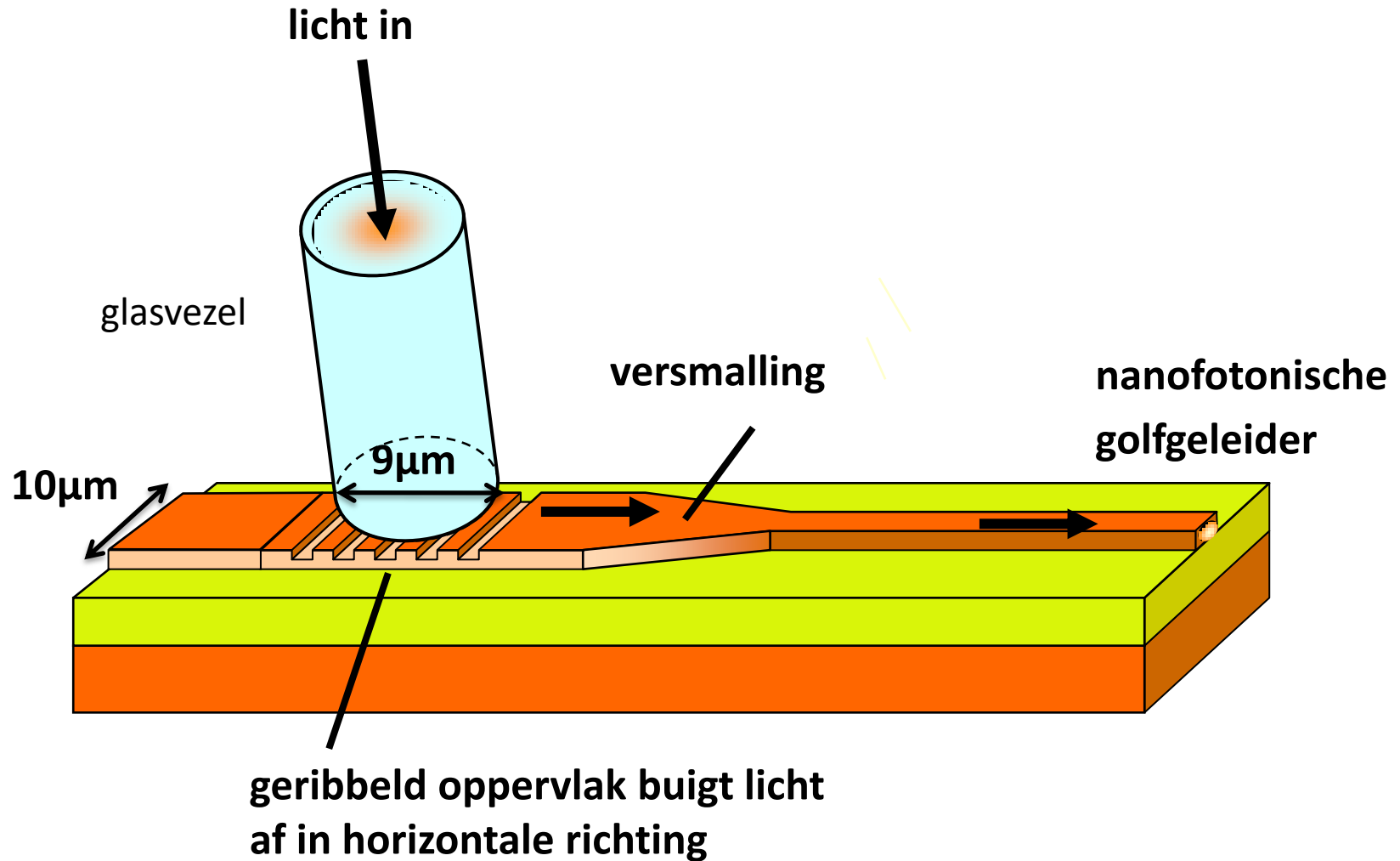
Silicium nanofotonische
golfgeleider



Nanofotonische draad op een haar



Inkoppeling in nanofotonische golfgeleider



Fabricage met nanometerschaal nauwkeurigheid

Cleanroom (stofvrije omgeving)

Fabricage in IMEC (Leuven) in een CMOS lijn

Complexe, dure toestellen (maar massafabricage mogelijk)



Silicium nanofotonica: kernspecialiteit van Photonics Research Group

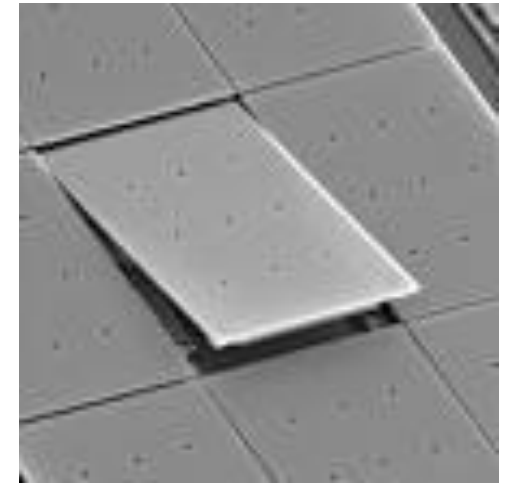
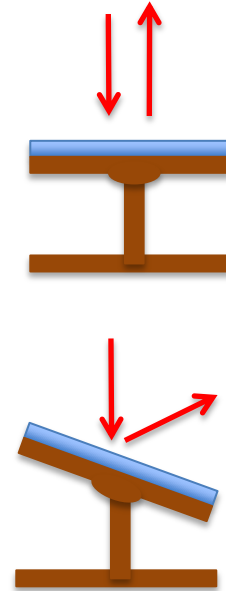
Doel van dit doctoraat?

Doel van dit doctoraat

Mechanica als mogelijke strategie om passieve nanofotonica actief te maken.



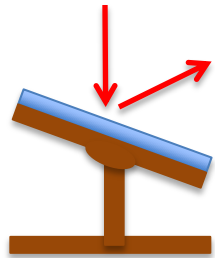
glasvezel
(passief)



beweegbare
microspiegel
(actief)

Doel van dit doctoraat (2)

Een object bewegen vergt een *kracht*.



microspiegel
werkt met
elektrische
coulombkracht



moeilijk te
combineren met
nanofotonica

Kan licht zelf als krachtbron voor beweegbare structuren op chip gebruikt worden?

↓
optomechanica

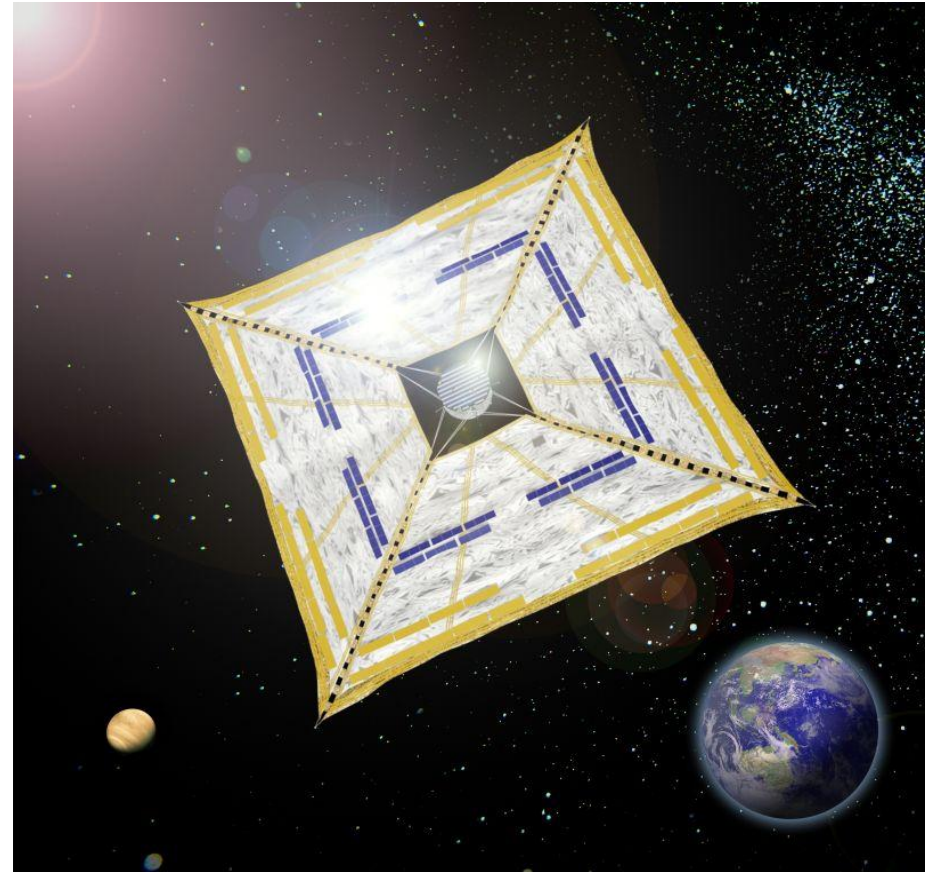
↓
geïntegreerd

Licht als krachtbron

21 mei 2010, lancering van IKAROS
(JAXA): aandrijving van ruimtetuig via
stralingsdruk zon

7.5 μm dik vierkant zeil van 200m²

binnen 1 jaar \approx 6800km/h

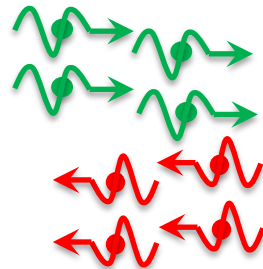


Lichtkrachten kunnen significant zijn op grote oppervlakten

Fysisch principe

Impulsoverdracht: fotonen-> zeil

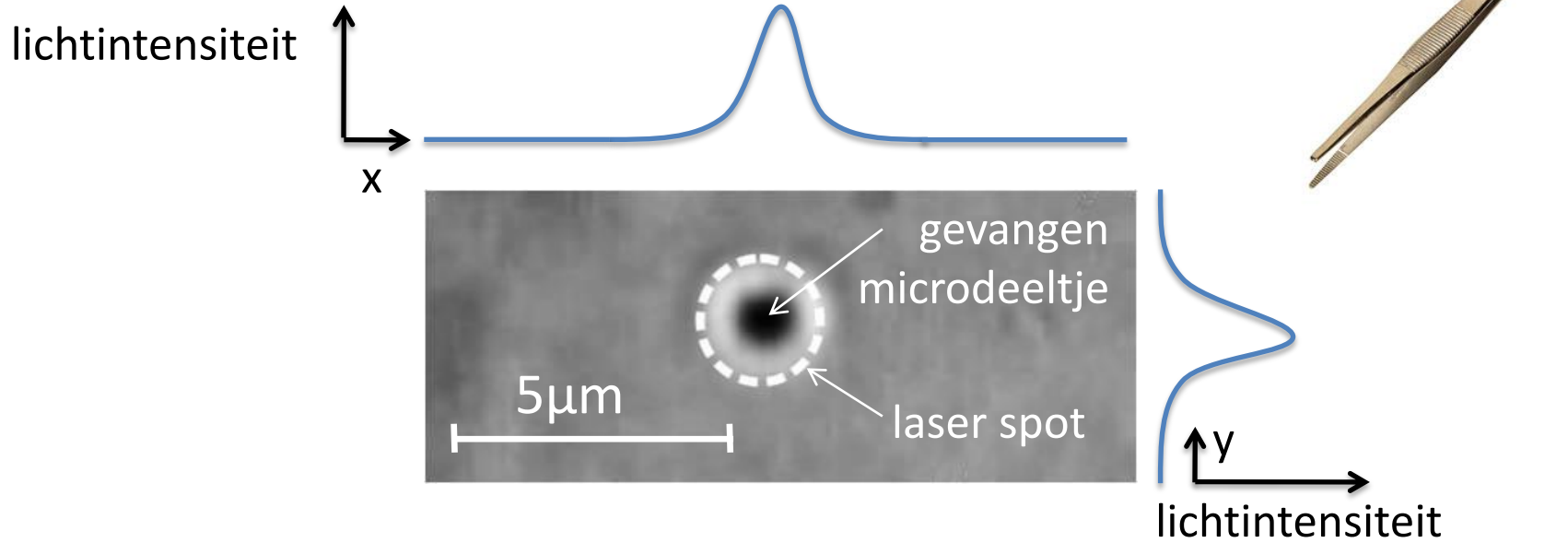
Vergelijking met botsende knikkers



Gereflecteerde fotonen hebben een beetje van hun energie afgestaan

Zeil niet bruikbaar op chip

Optisch pincet



Microdeeltje wordt gevangen gehouden in centrum laser spot = pincet

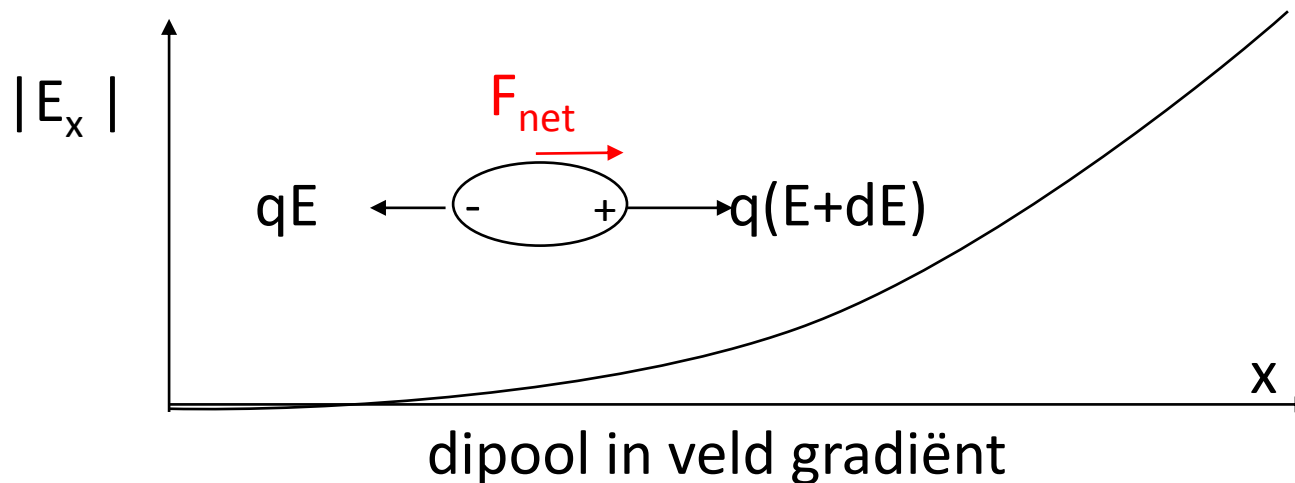
Lichtkrachten duwen deeltje naar regio met meest licht (centrum laser spot)

Fysisch principe optische gradiëntkracht

licht zorgt voor herschikking van ladingen in het deeltje: 

licht oefent kracht uit op ladingen: 

slechts netto kracht bij verschillende lichtintensiteit links/rechts: 



Fysisch principe optische gradiëntkracht (2)

materiaal ondervindt kracht naar plaats met meeste licht

grote variatie in lichtsterkte over korte afstand: grote kracht

optische gradiënt

The diagram consists of two lines of text. The top line contains the phrase 'grote variatie in lichtsterkte over korte afstand: grote kracht'. The words 'variatie in lichtsterkte' and 'over korte afstand' are underlined with blue lines. The bottom line contains the phrase 'optische gradiënt', where 'optische' is underlined with a red line and 'gradiënt' is underlined with a blue line. A red arrow points from the underlined 'variatie in lichtsterkte' to the underlined 'optische'. A blue arrow points from the underlined 'over korte afstand' to the underlined 'gradiënt'.

Sterke optische gradiënten vinden we ook terug bij nanofotonische golfgeleiders!

Krachtwerking tussen nanofotonische golfgeleiders

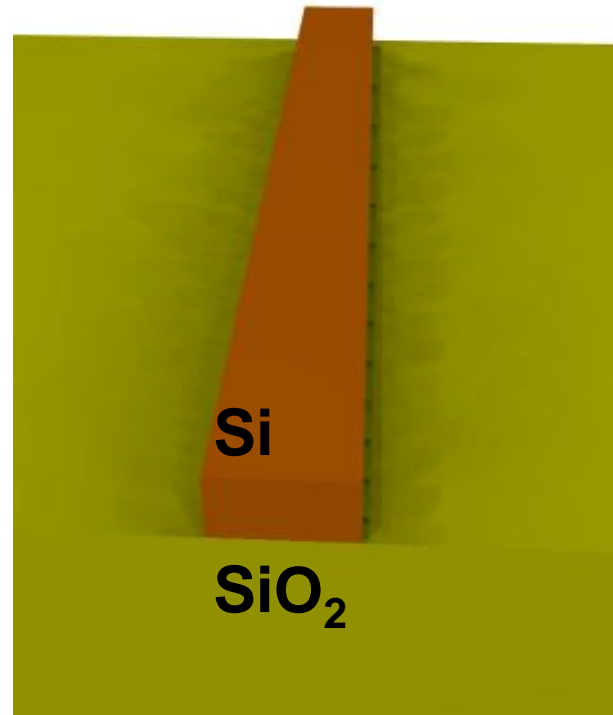
fabricage

trillingsdetectie + calibratie

krachtberekening

experiment

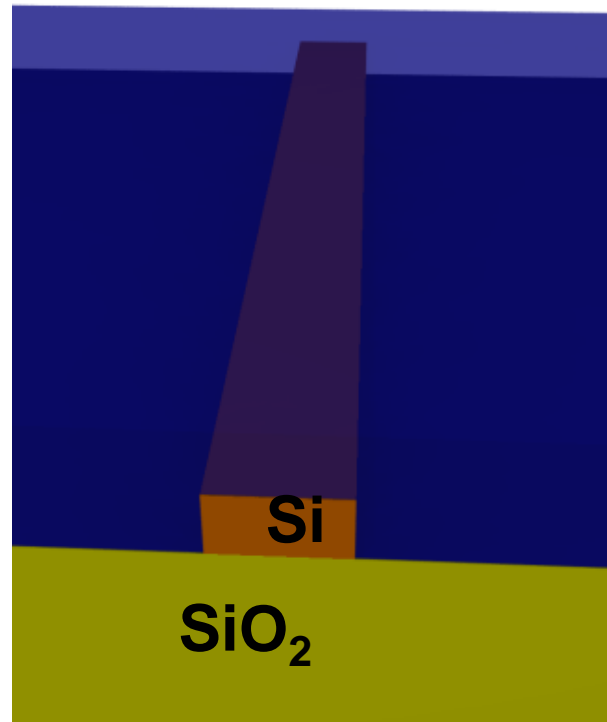
Fabricage van een vrijstaande nanofotonische golfgeleider



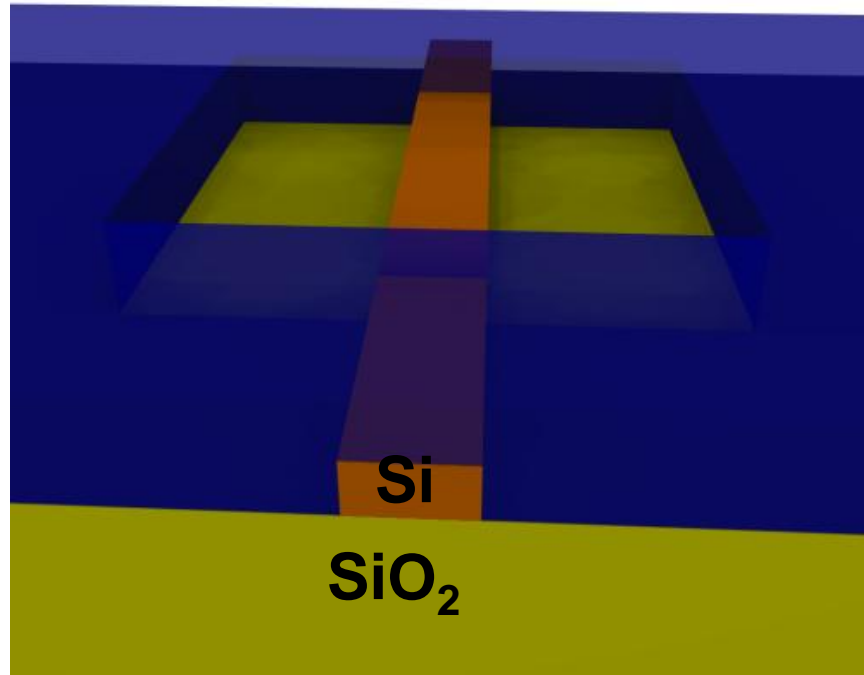
nanofotonische
golfgeleider (PRG
specialiteit)

Fabricage van een vrijstaande nanofotonische golfgeleider

bedek chip met
resist



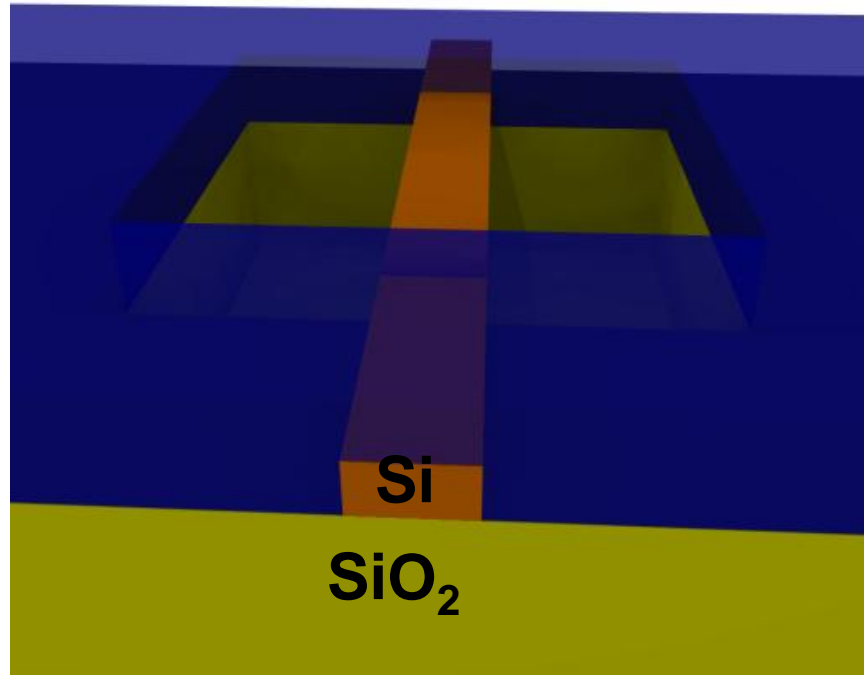
Fabricage van een vrijstaande nanofotonische golfgeleider



maak gat in
resistlaag

Fabricage van een vrijstaande nanofotonische golfgeleider

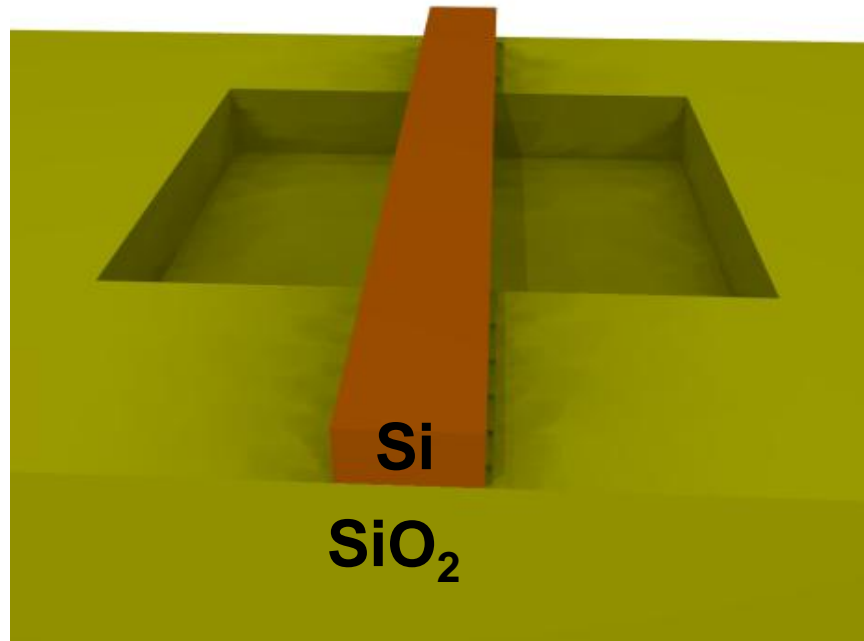
dompel chip
onder in
waterstoffluoride
(HF)



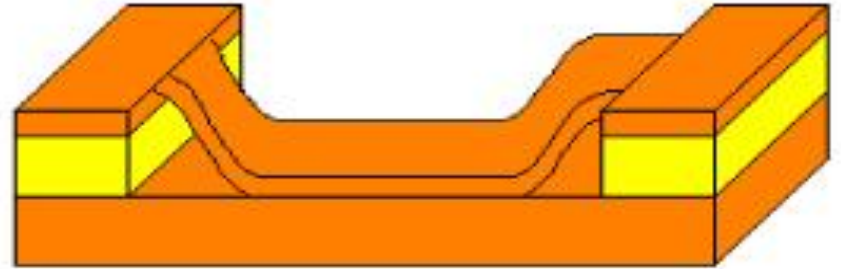
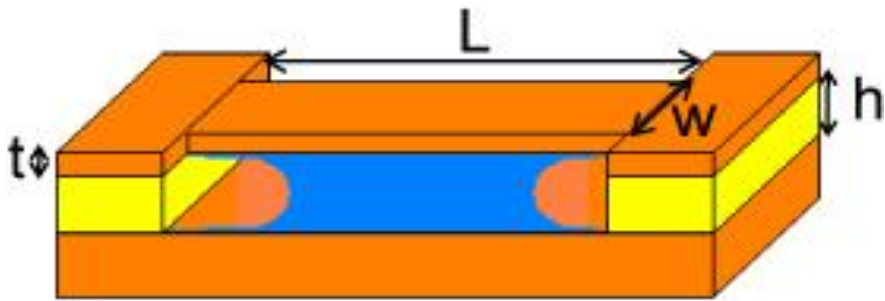
blootliggend SiO_2
(glas) wordt
aangeëetst, Si
(silicium) niet

Fabricage van een vrijstaande nanofotonische golfgeleider

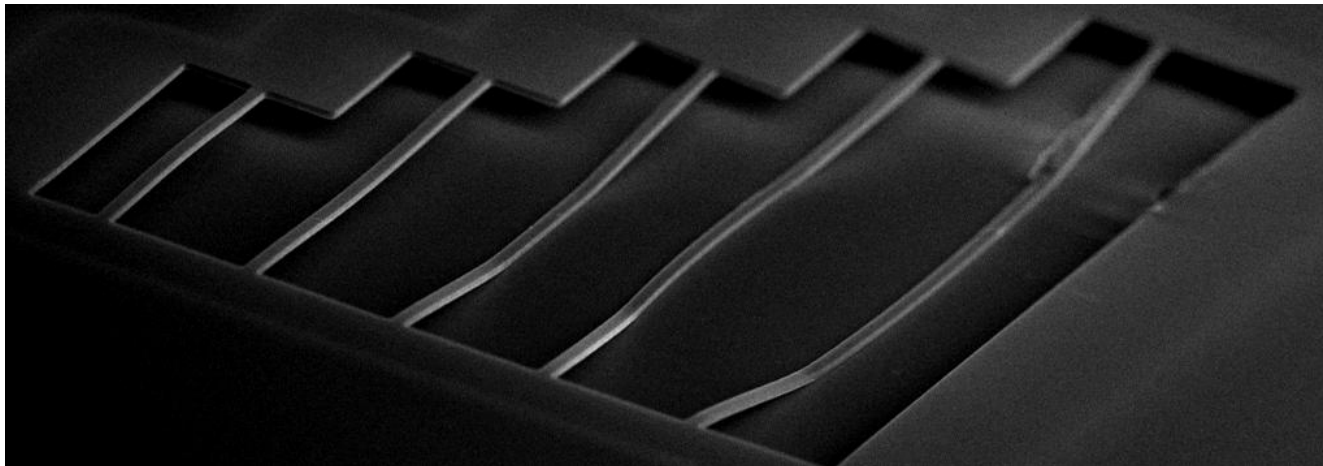
verwijder resist
masker



Resultaat=
brugstructuur,
silicium snaar

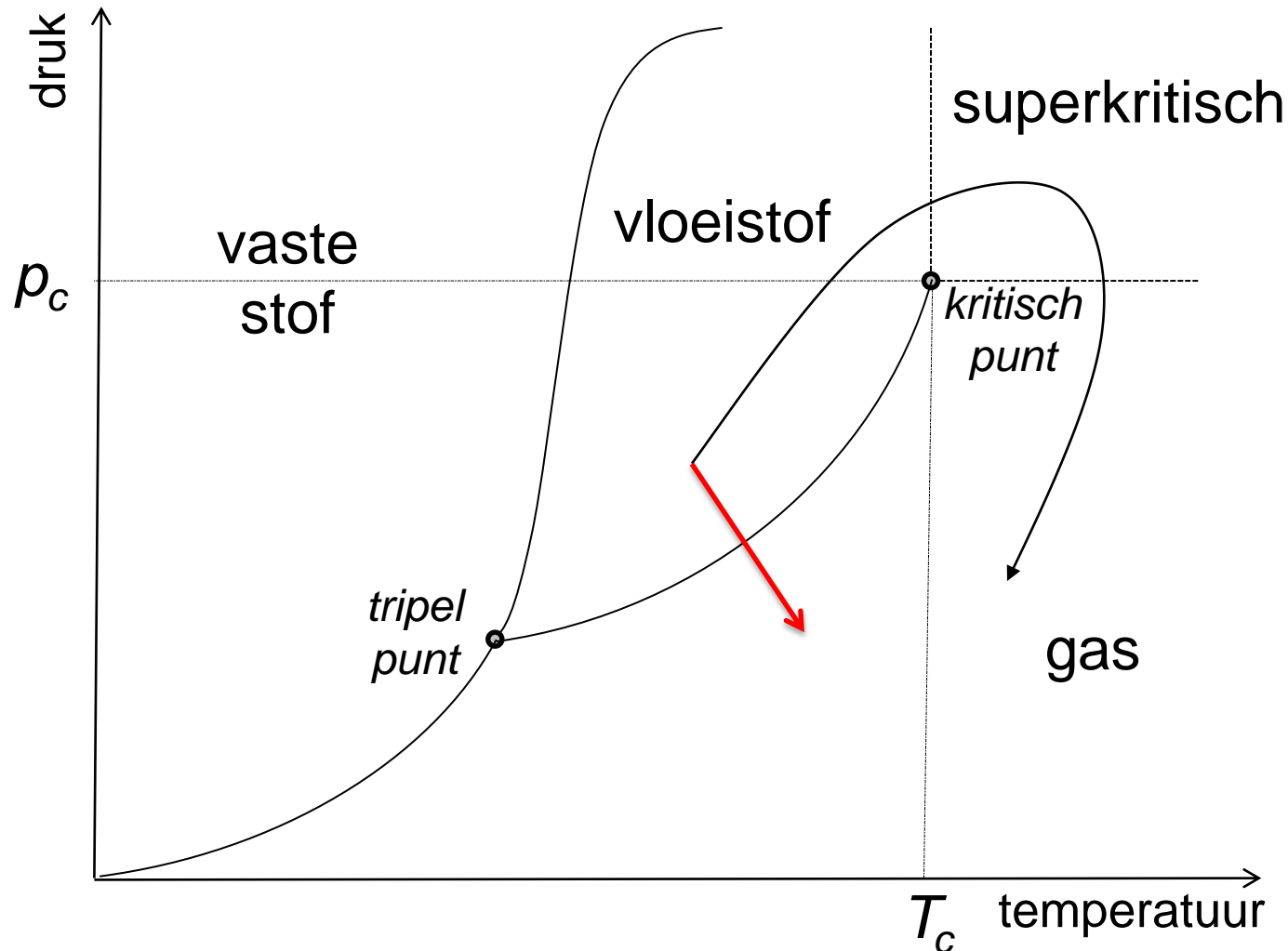


destructieve capillaire krachten treden op tijdens opdrogen vloeistof



resultaat
onderetstest

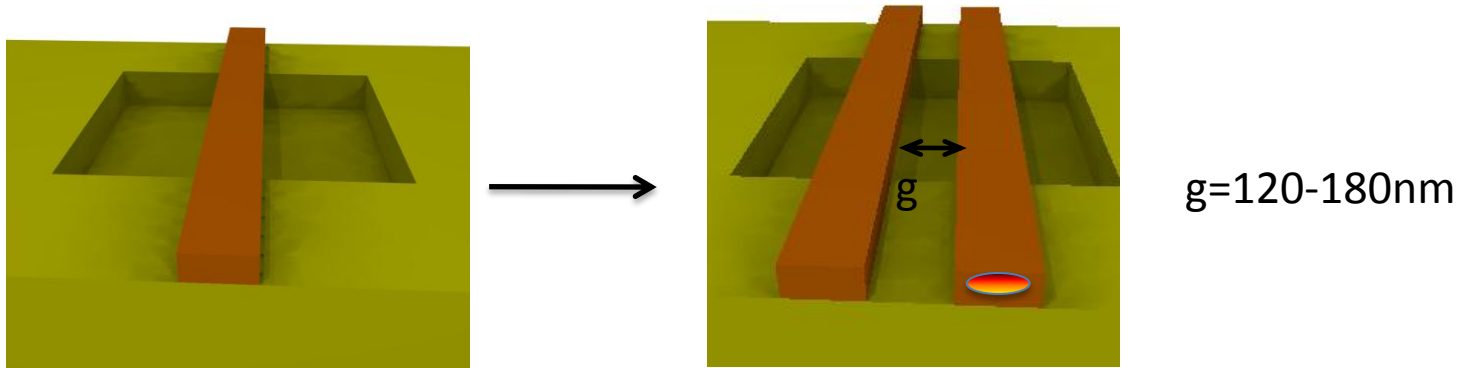
Oplossing: drogen bij extreem hoge druk en temperatuur (superkritisch)



Krachtwerking tussen nanofotonische golfgeleiders

- ✓ fabricage
- trillingsdetectie + calibratie
- krachtberekening
- experiment

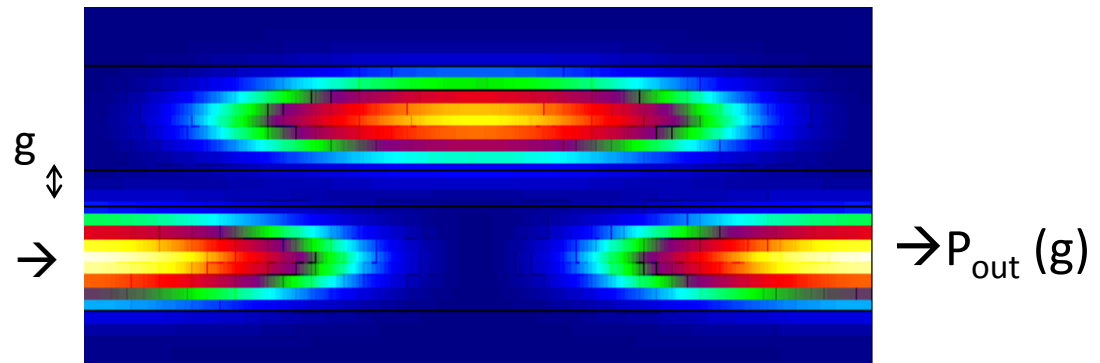
Trillingsdetectie



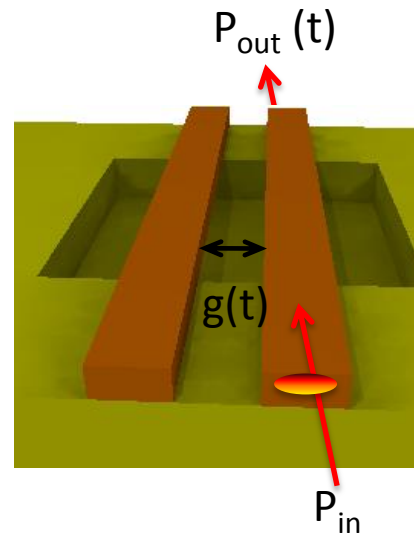
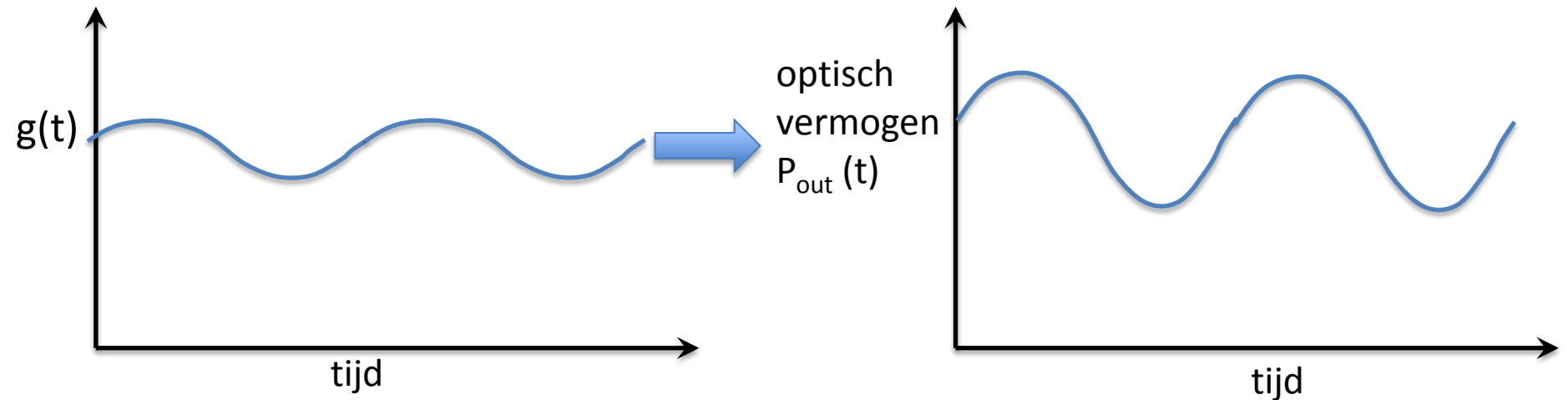
tweede nanofotonische golfgeleider in parallel

koppeleffect afhankelijk van afstand tussen golfgeleiders

licht in \rightarrow

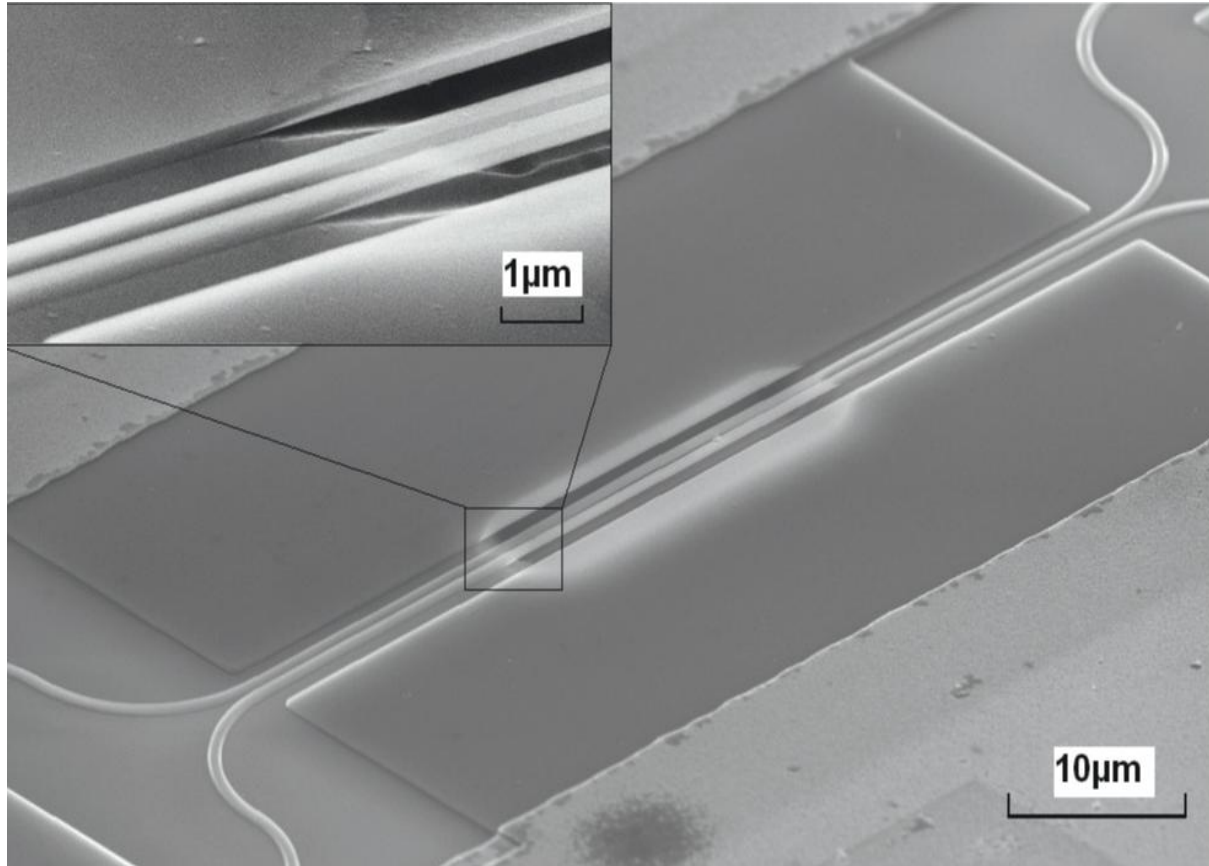


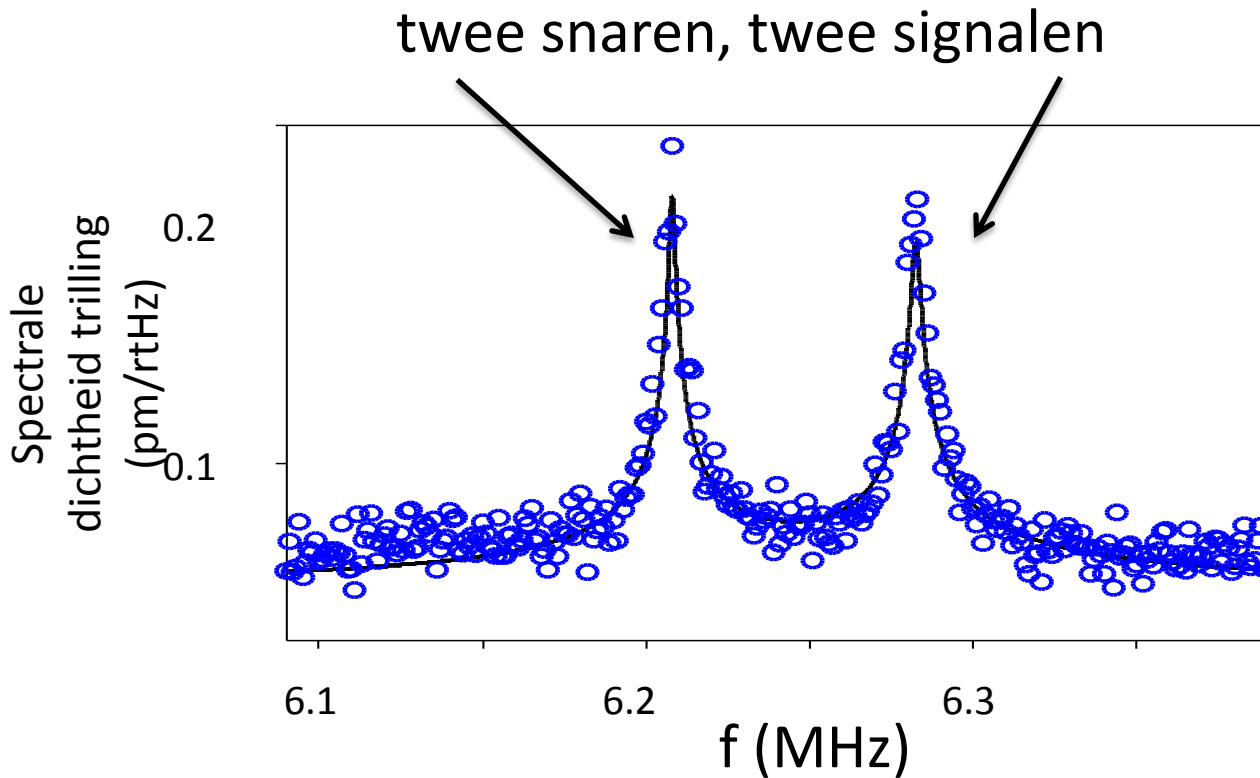
I. De Vlainck et al. , Detection of nanomechanical motion by evanescent light wave coupling, *Applied Physics letters* 90, 233116 (2007)



snaartrilling wordt ahw ingeprint in optisch signaal

Vrijstaande parallelle golfgeleiders





Trillingen kunnen gedetecteerd worden met een gevoeligheid van $2 \text{ fm Hz}^{-1/2}$
 $\approx 1/100000$ atoomdiameter, grootteorde protondiameter

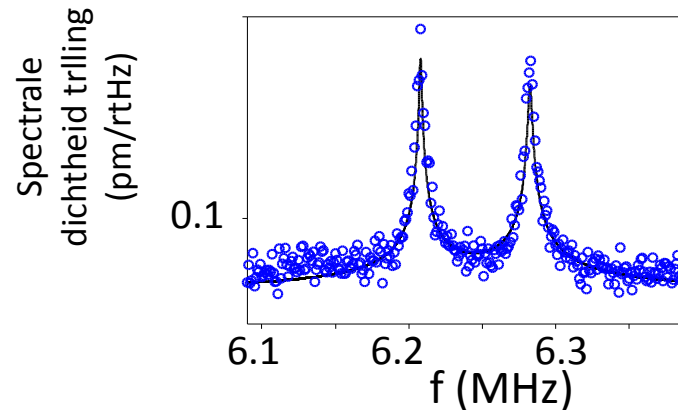
Calibratie

temperatuur = chaotische trilling van atomen in kristalrooster

snaren ondergaan minieme trilling

+ grootte van de trilling kan gemakkelijk berekend worden: calibratie

- optische kracht moet groter zijn dan zogenaamde 'browniaanse' kracht om gedetecteerd te kunnen worden

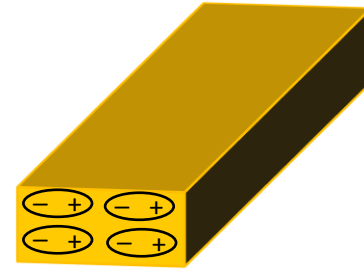


Krachtwerking tussen nanofotonische golfgeleiders

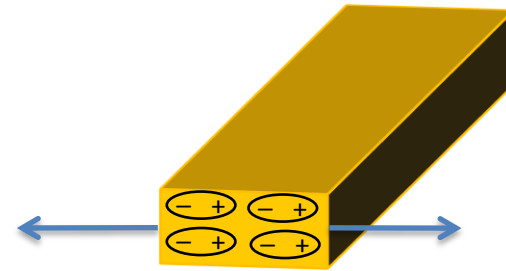
- ✓ fabricage
- ✓ trillingsdetectie + calibratie
- krachtberekening
- experiment

Fysisch principe optische gradiëntkracht

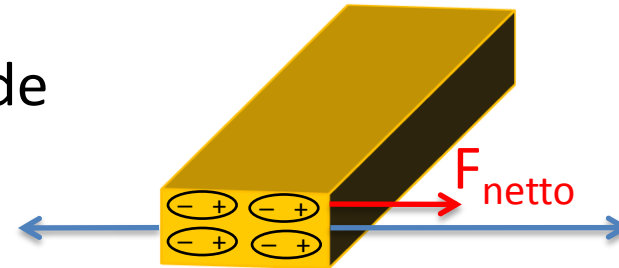
licht zorgt voor herschikking van ladingen in materie (vorming dipolen):



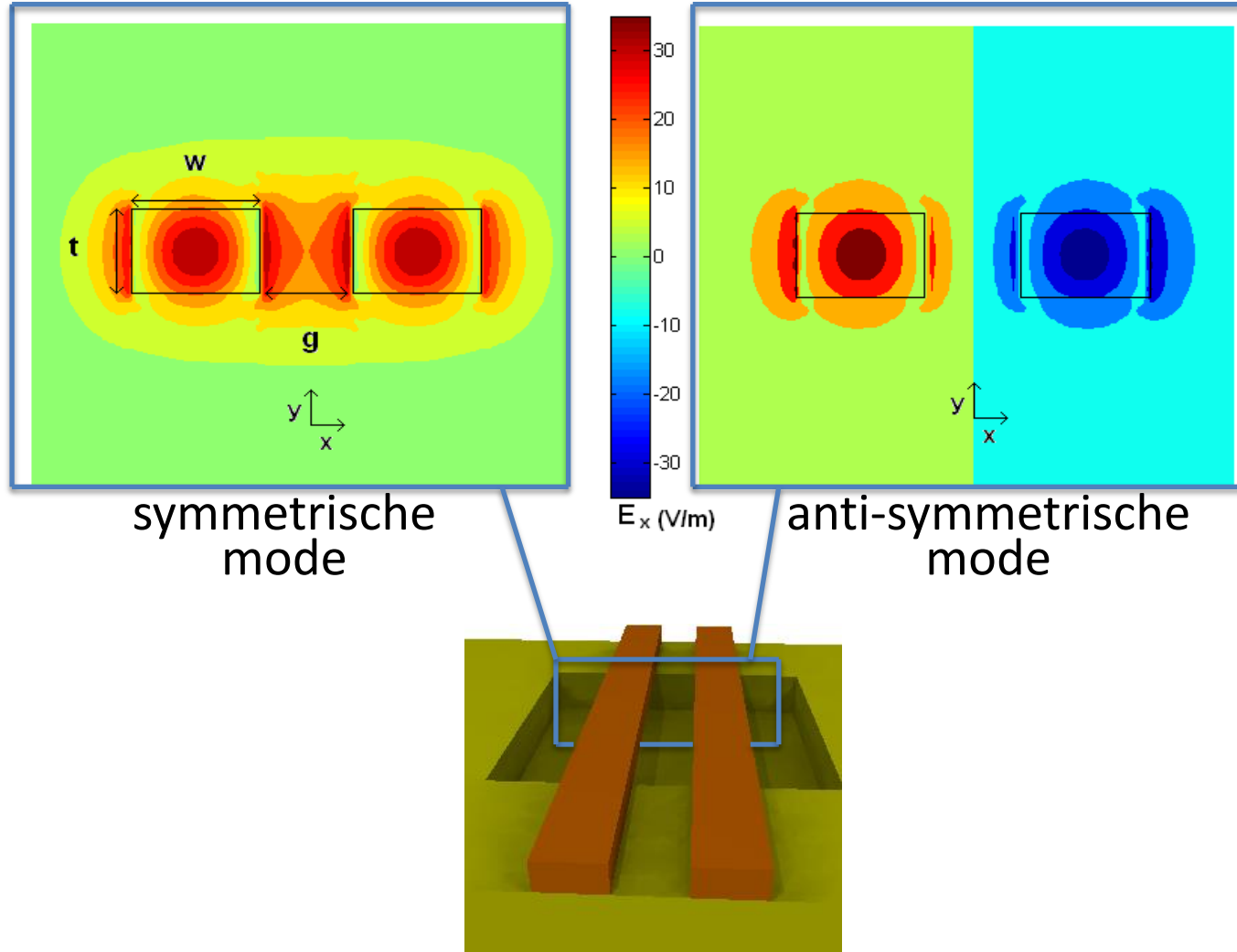
licht oefent kracht uit op ladingen:



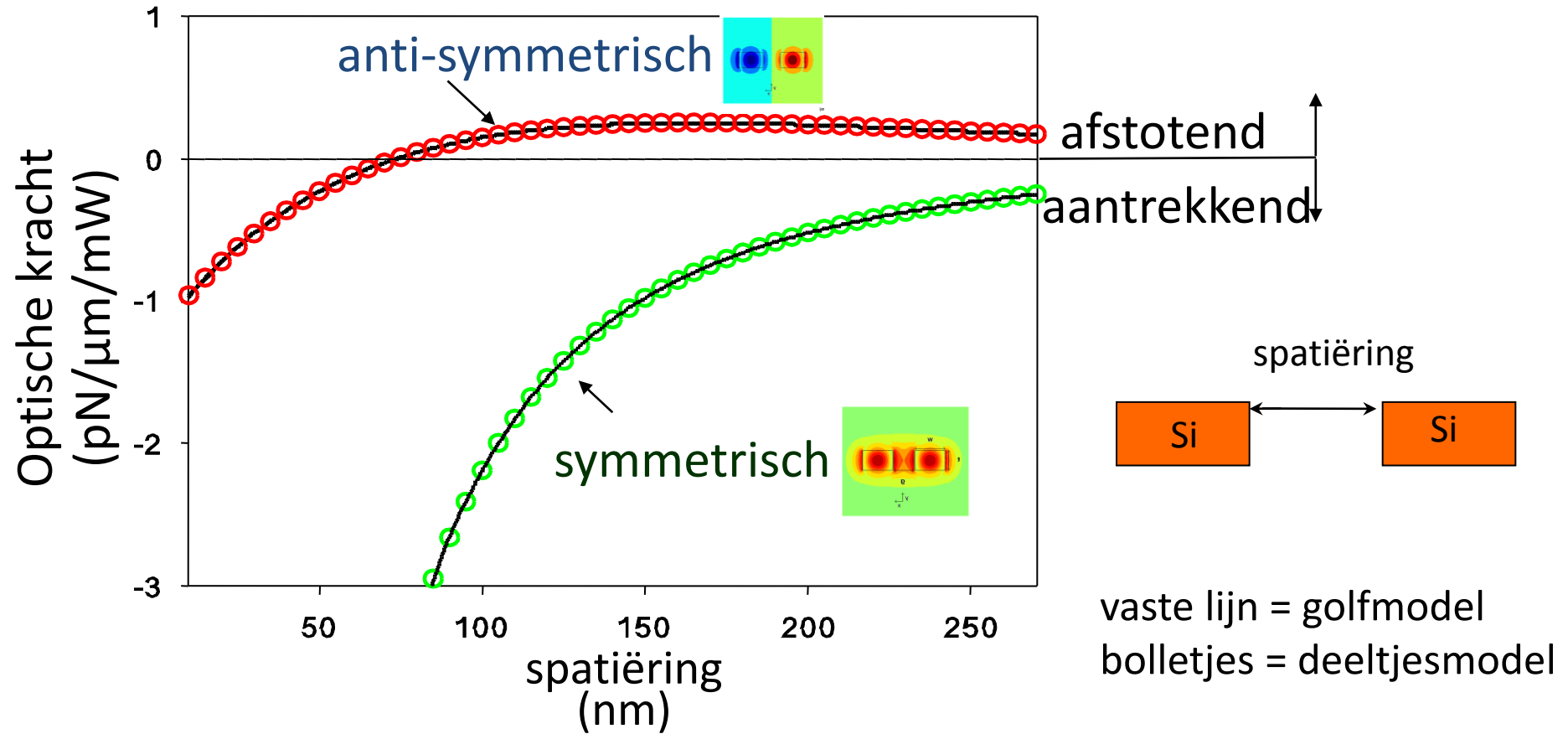
slechts netto kracht bij verschillende lichtintensiteit links/rechts:



Licht kan slechts op twee manieren (=modes) door dubbele golfgeleider



Krachtberekening

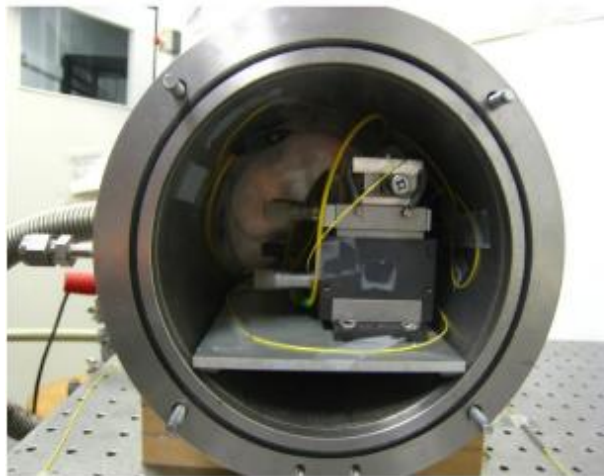
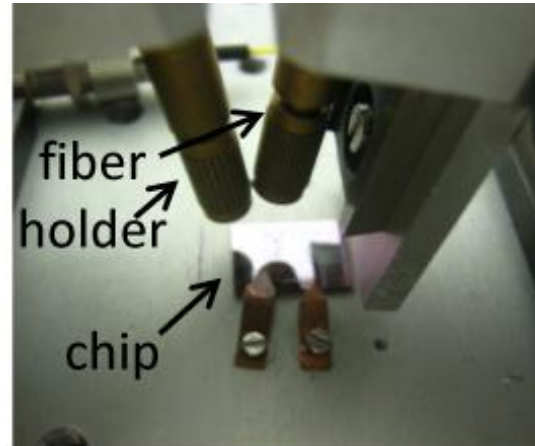
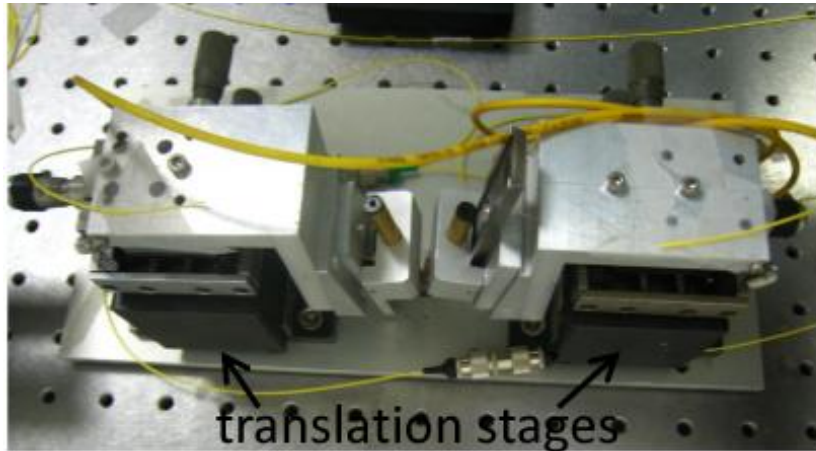


controle over symmetrische/anti-symmetrische mode = controle over *optische kracht*

Krachtwerking tussen nanofotonische golfgeleiders

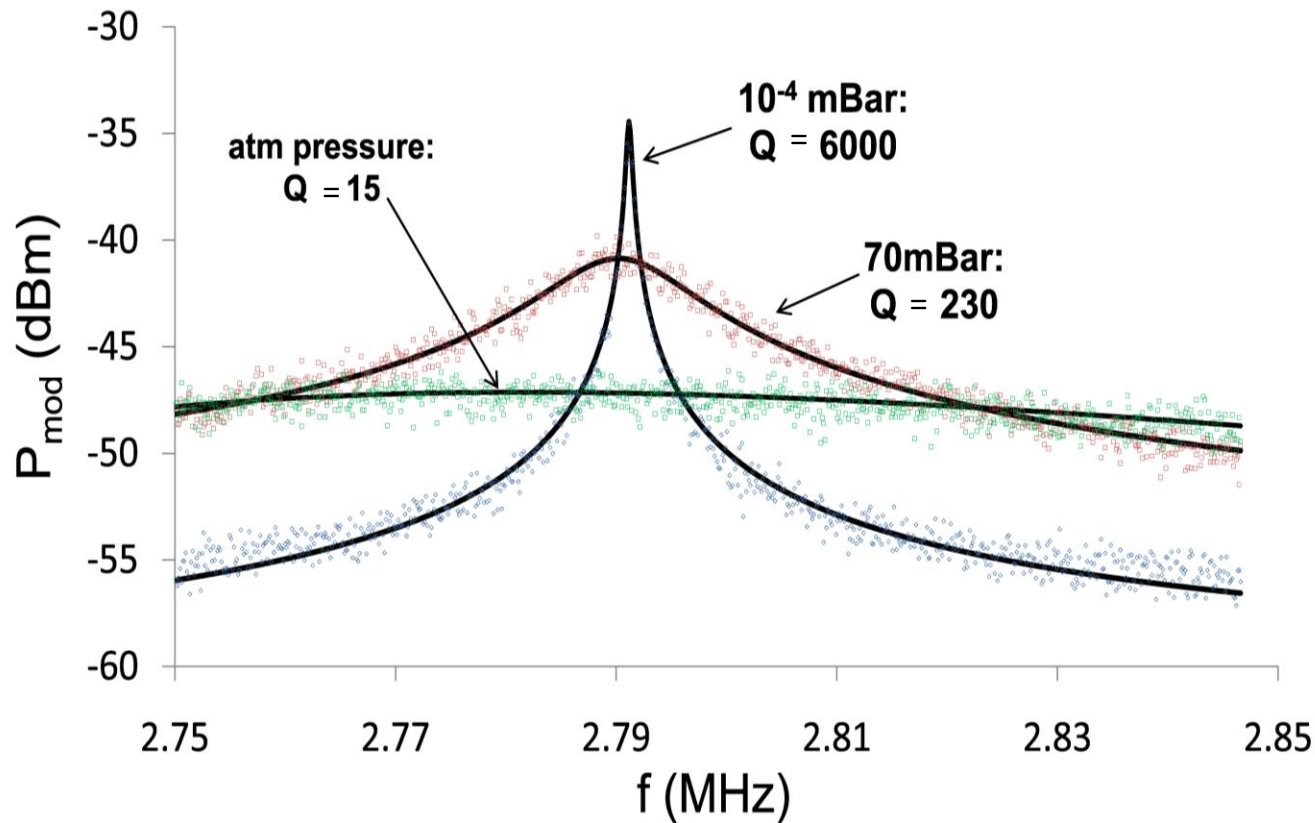
- ✓ fabricage
- ✓ trillingsdetectie + calibratie
- ✓ krachtberekening
experiment

vacuum set-up



in vacuum om
demping van de
beweging door
lucht te
voorkomen

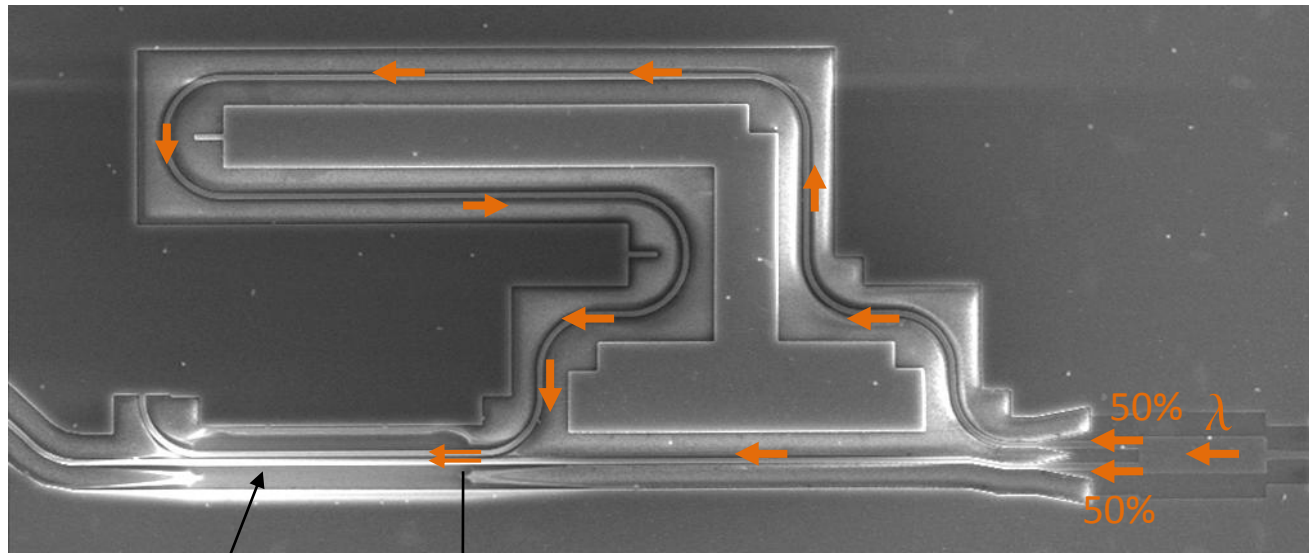
browniaanse trilling bij verschillende drukken



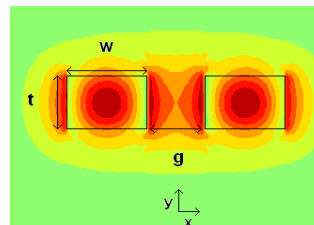
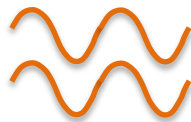
damping neemt af in vacuum

kwaliteitsfactor Q van de trilling neemt toe

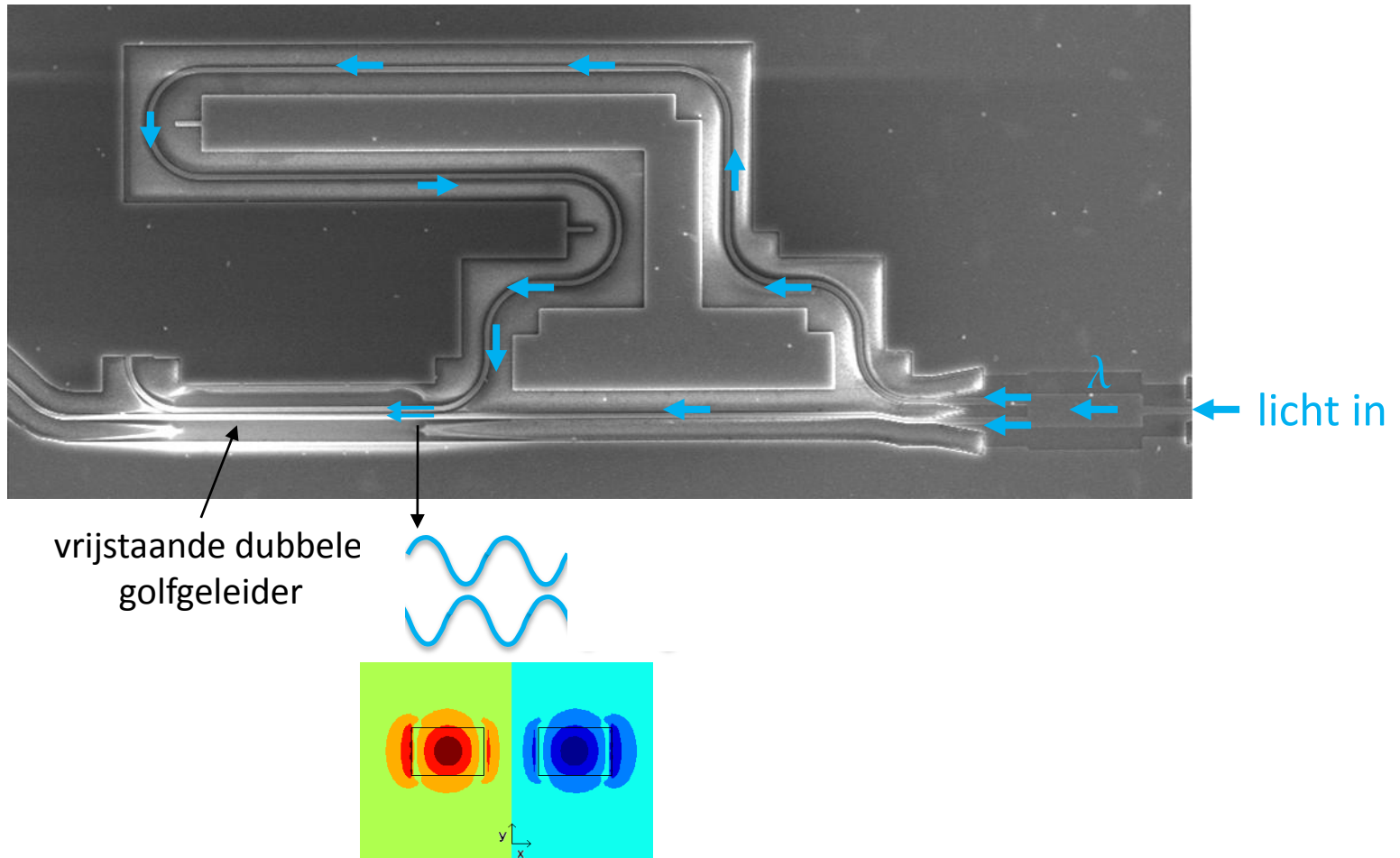
Symmetrische excitatie



vrijstaande dubbele
golfsgeleider

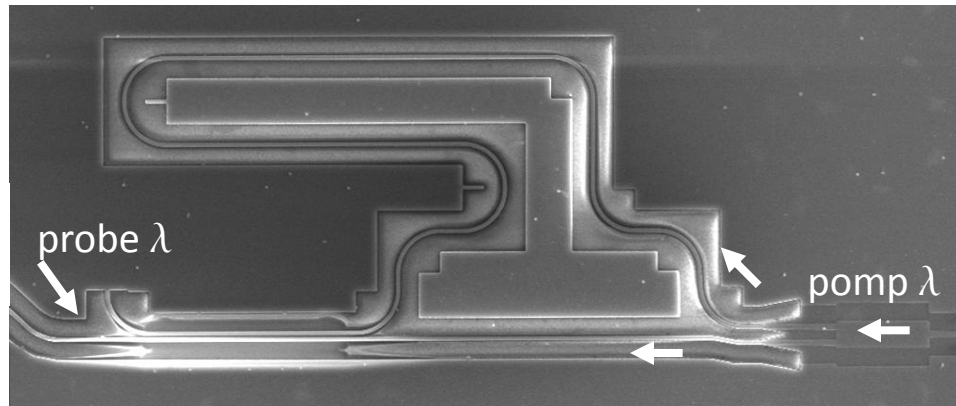


Anti-symmetrische excitatie



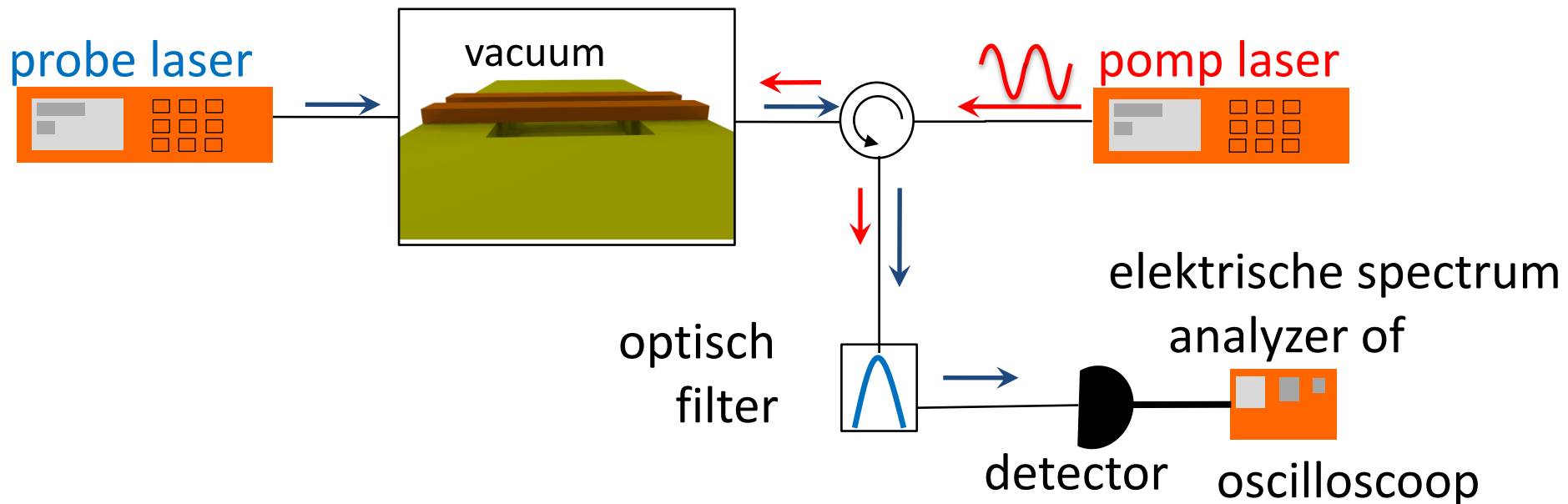
via golflengte kan mode en dus type kracht (att/rep) geselecteerd worden

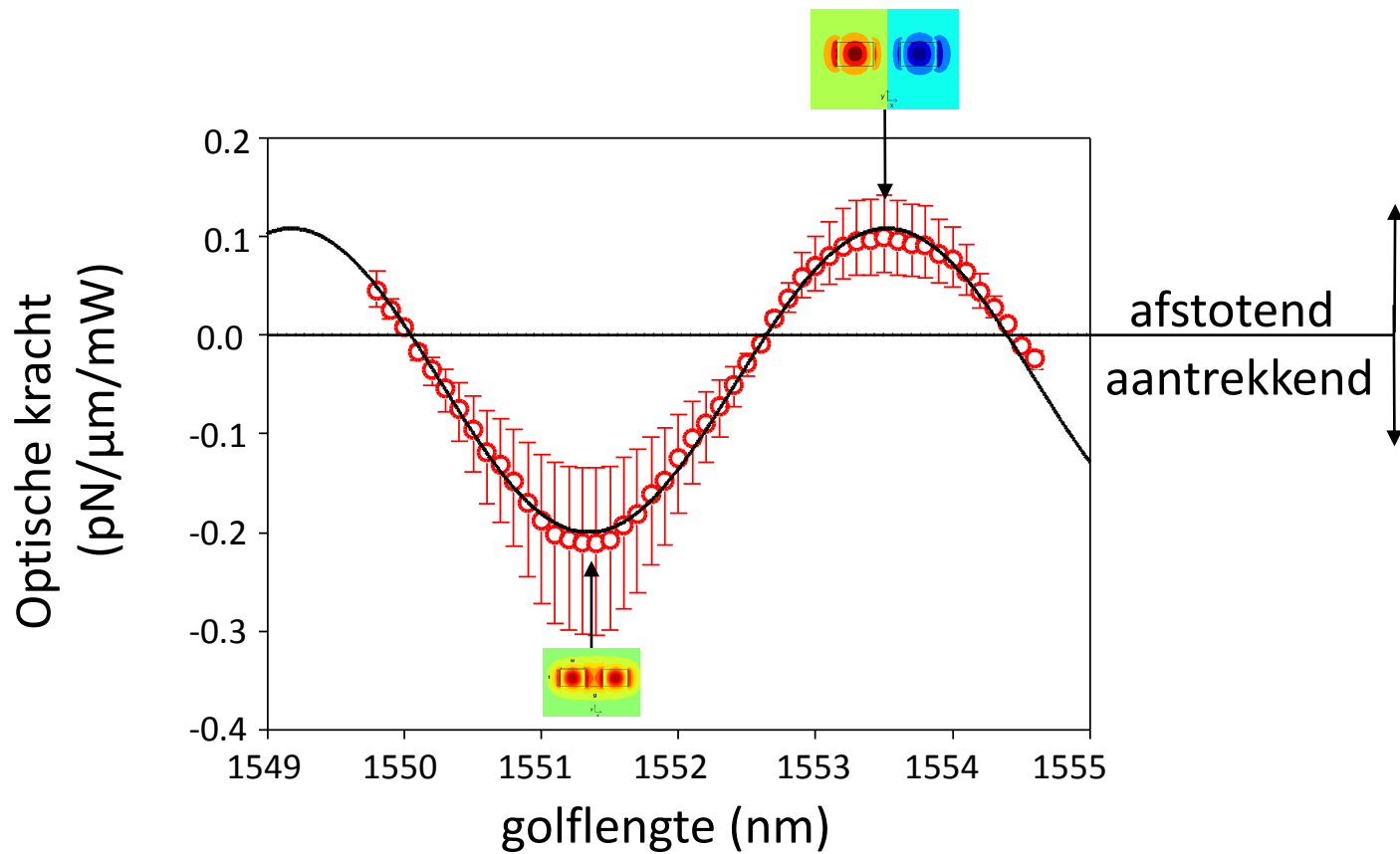
Experiment



probe laser
registreert trilling

pomp laser induceert
trilling (pulseert op
frequentie van snaar)





experimenteel bewijs: aantrekkende en afstotende kracht tussen golfgeleiders!

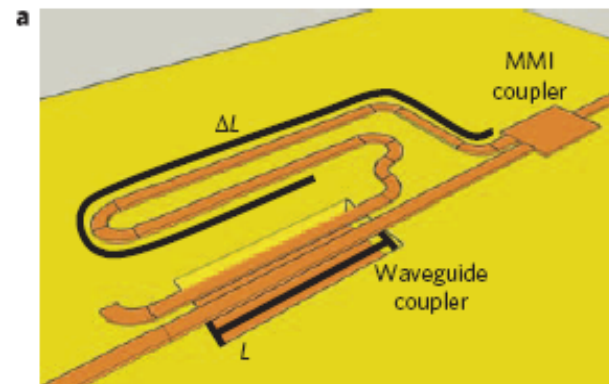
J. Roels et al., Tunable optical forces between nanophotonic waveguides, Nat. Nanotechnology (2009)

Tunable optical forces between nanophotonic waveguides

Joris Roels^{1*}, Iwijn De Vlaminck², Liesbet Lagae², Bjorn Maes¹, Dries Van Thourhout¹ and Roel Baets¹

The confinement of light in components with nanoscale cross-sections in nanophotonic circuits significantly enhances the magnitude of the optical forces experienced by these components^{1,2}. Here we demonstrate optical gradient forces between two nanophotonic waveguides, and show that the sign of the force can be tuned from attractive to repulsive by controlling the relative phase of the optical fields injected into the waveguides. The optical gradient force could have applications in optically tunable microphotonic devices and nanomechanical systems.

Optical forces can be divided into two major categories: radiation pressure and transverse gradient forces. Radiation pressure effects have been studied extensively using high-finesse optical resonators³⁻⁵. These effects can be understood as momentum exchange between photons and matter, so the force acts along the light propagation direction. Radiation pressure effects also provide a route towards optical cooling of a micromechanical resonator to its quantum ground state⁶. The gradient force acts transversely to the propagation direction of the



Optomechanical device actuation through the optical gradient force

Dries Van Thourhout* and Joris Roels

Optical forces are widely used to manipulate microparticles such as living cells, DNA and bacteria. The forces used in these 'optical tweezers' originate from the strongly varying electromagnetic field in the focus of a high-power laser beam. This field gradient polarizes the particle, causing the positively and negatively charged sides of the dipole to experience slightly different forces. It was recently realized that the strong field gradient in the near-field of guided wave structures can also be exploited for actuating optomechanical devices, and initial theoretical work in this area was followed rapidly by several experimental demonstrations. This Review summarizes the rapid development in this field. First, the origin of the optical gradient force is discussed in detail. Several experimental demonstrations and approaches for enhancing the strength of the effect are then discussed. Finally, some of the possible applications of the effect are reviewed.

Back in the 16th century, Johannes Kepler suggested that mechanical effects from solar radiation cause comet tails to point away from the sun. Today, optical forces are widely used to precisely control or measure the position of micrometre- to nanometre-sized particles¹. Two major categories of optical forces are generally discerned: scattering forces and the gradient or dipole optical force. The scattering force can be regarded as a consequence of the momentum transfer from the radiating field to the dielectric medium, and is an axial force. It has been investigated in detail in the field of cavity optomechanics, first in large-scale Fabry–Pérot interferometers used for gravitational wave excitation², but more recently in the improvement of microfabrication technologies and also extensively in microscale structures^{3,4} and on-chip microtoroids^{3,4}, in which the cavity field depends on the mechanical motion, and vice versa. Owing to the finite cavity decay time,

close to nanophotonic waveguides could lead to significant optical forces, resulting in nanometre- or even micrometer-level displacements using milliwatt input power levels^{15–17}. To understand the origin of the gradient force it is useful to first consider what happens when a polarizable microparticle is placed in a laterally varying optical field. It is well-known that in such cases a dipole will be induced in the particle, and the positively and negatively charged side of the dipole will experience slightly different forces in the gradient field. The particle will consequently be accelerated towards the region with the strongest field. This is the basic operating principle of optical tweezers, which trap microparticles in the waist of a powerful laser beam. Macroscopic structures such as integrated optical waveguides or resonators can be considered as a collection of individual microscopic dipolar subunits¹⁸, and consequently can also be accelerated in a strongly varying electromagnetic field, such as

Nanotechnologie Verborgen krachten

Sommige eigenschappen van licht kunnen zowel afstoten als aantrekken.

Licht bestaat uit elementaire deeltjes: fotonen. Net als andere deeltjes kunnen die botsen, waardoor er in principe een reactie ontstaat. Maar omdat lichtdeeltjes zo klein zijn, heeft een botsing meestal geen effect. Als lichtdeeltjes echter botsen met structuurtjes van hun eigen afmetingen, ligt dat anders.

Nanotechnologen speuren naar de eigenschappen van de allerkleinste deeltjes, om ze te kunnen aanwenden voor allerhande momenteel zéér vooruitstrevende toepassingen. Hoe kleiner deeltjes gemaakt kunnen worden, hoe gebruiksvriendelijker de structuren

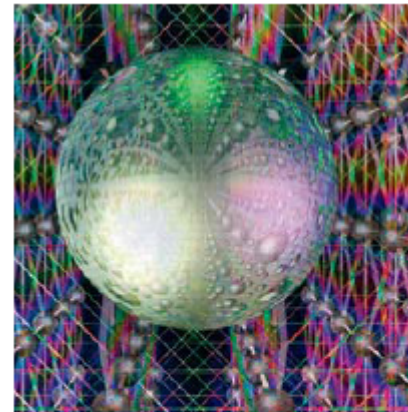
waarvan ze deel uitmaken moeten zijn. Op voorwaarde, uiteraard, dat er geen verlies aan functie is.

Joris Roels van de Onderzoeksgroep Photonica aan de Universiteit Gent is er met een aantal collega's in geslaagd aan te tonen dat in zulke miniaturumstandigheden lichtdeeltjes ook een afstotende kracht kunnen uitoefenen. Dat was nooit eerder waargenomen.

In het vakblad *Nature Nanotechnology* beschrijven ze hoe ze dat klaarspeelden. Ze legden twee uiterst dunne snaren (van de grootteorde van één 200^e van de dikte van een haar) op een siliciumchip, en stuurden

er vervolgens een laserbundel door. Afhankelijk van het gebruikte licht kwamen de snaren vervolgens naar elkaar toe, of werden ze van elkaar weggedrukt.

Het inzicht zou op termijn een heleboel praktische toepassingen kunnen opleveren.



LICHTDEELTJE

Als fotonen tegen kleine deeltjes botsen, kunnen ze een groot effect hebben.

Feedback: op weg naar toepassingen voor optomechanica?

Fysisch principe feedback

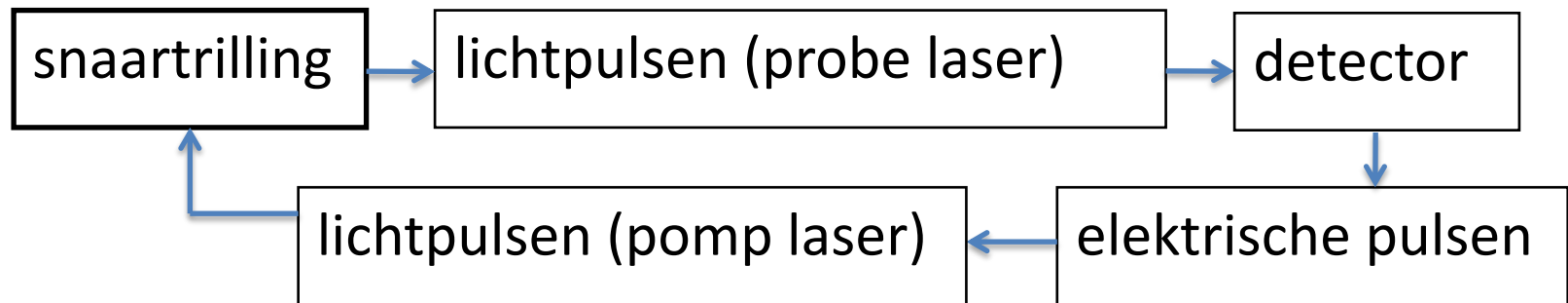
optische kracht kan een beweging dempen of versterken



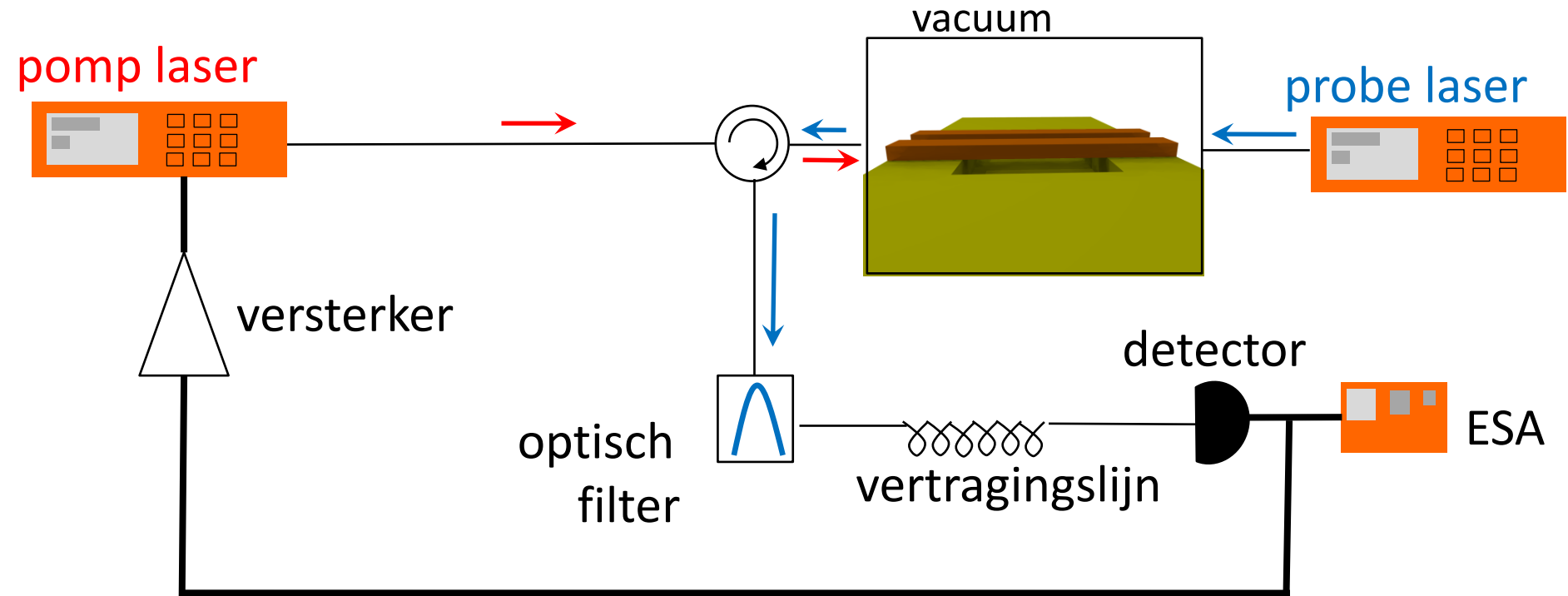
hangt af van 'timing' (schommel)



feedback: kracht genereren op basis van opgemeten trillings signaal



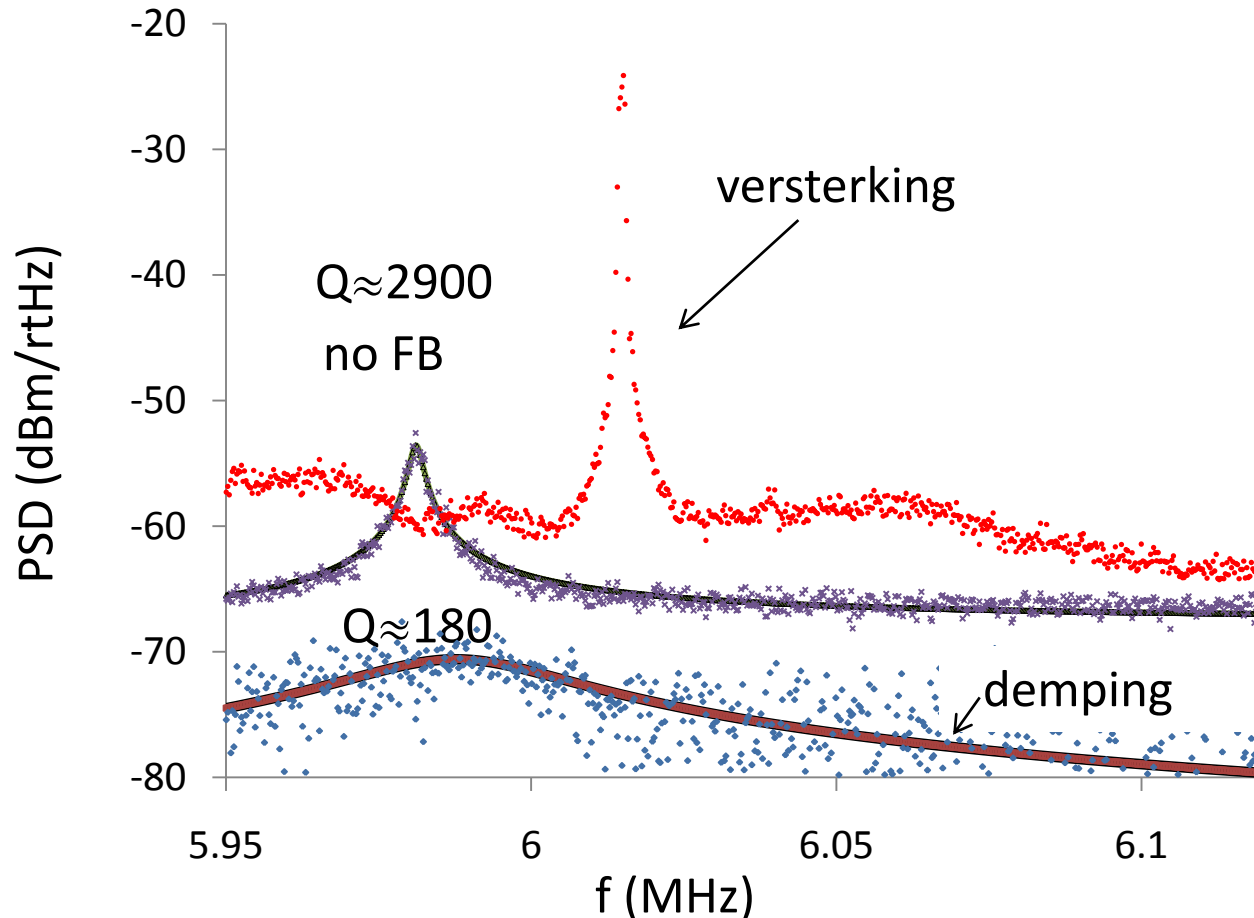
Feed-back experiment



Resultaat

versterking: zeer krachtige trilling met zeer hoge kwaliteitfactor

demping: interessant voor fundamentele fysica



J. Roels et al., Parametric instability of an integrated micromechanical oscillator by means of optomechanical feedback, submitted to Optics Express

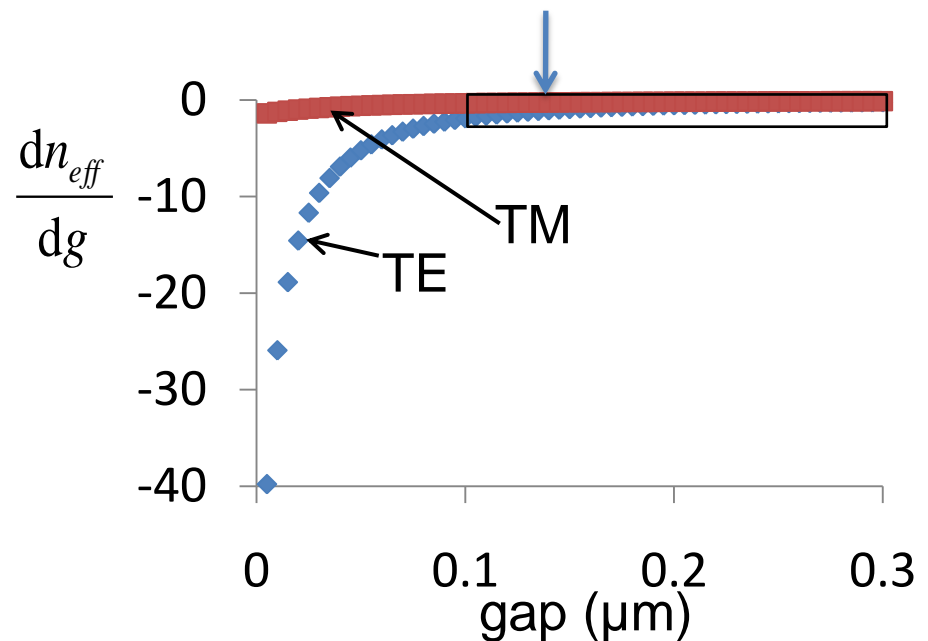
Toepassingen van optomechanica

- (massa) biosensing: 1GHz oscillator: f_{res} verschuift met 5Hz/zg (biomolecule 100 zg)
- crystal oscillators (in GSM,...), currently limited to MHz frequencies

Probleem: hoogfrequente (GHz) oscillatoren = stijf

⇒optomechanica: verbetering uitlezing en aandrijving

Nog veel marge voor verbetering: optomechanische effecten schalen exponentieel met afstanden tussen structuren!



Samenvatting

- licht kan gebruikt worden om nanofotonische golfgeleiders te laten bewegen
- krachten kunnen zowel afstoten als aantrekken
- met feedback kunnen trillingen met uiterst lage/hoge demping gemaakt worden
- weg naar toepassingen is nog lang, dit doctoraat = pionierswerk

