

## SPASER: Heimsins minnsti leisir

Kristján Leósson

Raunvísindastofnun Háskólans, Háskóla Íslands

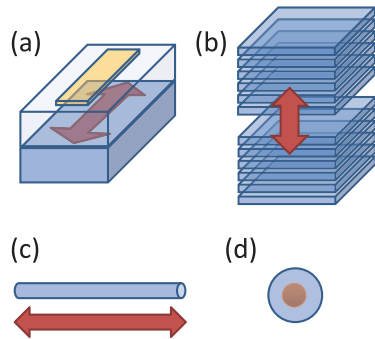
Vefútgáfa: 22. desember 2010

**Ágrip** – Hér er lýst heimsins minnsta leisi sem getur verið allt niður í 10–20 nm að stærð. Slíkur nanóleisir er um margt frábrugðinn hefðbundnum leisum og byggir í raun ekki á mögnun ljóseinda heldur mögnun á sveiflum í rafeindabéttleika í örsmáum málmögnum. Nýlegar tilraunir hafa gefið vísbendingar um leisivirki í glerhúðum 14 nm gullögnum.

### 1. Inngangur

Á þeim 50 árum sem liðin eru frá smíði fyrsta leisisins hafa orðið ótrúlegar framfarir í smíði ýmissa tegunda leisa. Á það ekki síst við um hálfleiðaraleisa þar sem mögulegt er að ná fram öfugri sætni á tiltölulega einfaldan hátt með rafstraumi yfir samskeyti p- og n-leiðandi hálfleiðara (mynd 1a). Slíkir leisar eru m.a. notaðir í geisladrifum, DVD-spilurum, laserprenturum, net- og símakerfum, strikamerkjalesurum og fyrir leisiskurð og húðmeðhöndlun, svo eitthvað sé nefnt. Hálfleiðaraleisa má fjöldaframleiða á heilum einkristalla hálfleiðaraskífum, á svipaðan hátt og örrásir. Í flestum tilfellum er geislahol leisisins látið liggja í plani skífunnar. Geislahol í hefðbundnum hálfleiðaraleisi getur verið 200  $\mu\text{m}$  að lengd, 2–10  $\mu\text{m}$  að breidd og 1–2  $\mu\text{m}$  að þykkt en afturvirkni leisisins er fengin með því að kljúfa skífuna niður í stakar flögur og nýta þá speglun sem verður frá endafötunum (um 30%). Úr slíkum leisum má fá verulegt ljósafl, sérstaklega á innrauðum bylgjulengdum, úr hálfleiðarafögum sem eru litlu stærri en sandkorn.

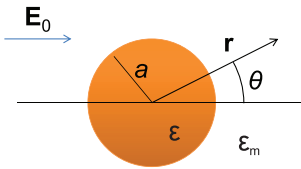
Helsti galli við ofangreinda framleiðsluaðferð er að leisivirki flögunnar er ekki hægt að prófa fyrir en búið er að kljúfa skífuna. Hálfleiðaraleisar sem senda frá sér ljós hornrétt á plan skífunnar (e. vertical-cavity surface emitting laser) verða því sífellt algengari, en þá má framleiða í tugþúsundatali á einni skífu og mögulegt er að prófa hvern og einn áður en skífan er söguð niður. Geislahol þessara leisa er fengið með svokölluðum Bragg speglum; lagskiptu kerfi þar sem tvö efni með ólíkan brotstuðul skiptast á og er þykkt hvers lags fjórðungur bylgjulengdar leisisins í viðkomandi efni, eða u.þ.b. 60 nm í hálfleiðaraspegli fyrir innrautt ljós með 800 nm bylgjulengd. Ljós mögnun getur aðeins orðið á örstuttri vegalengd milli tveggja slíkra spegla þ.a. tryggja þarf að hver ljóseind hafi



**Mynd 1.** Nokkrar gerðir hálfleiðaraleisa og örleisa: (a) Hefðbundinn hálfleiðaraleisir (b) VCSEL hálfleiðaraleisir (c) Nanóvír (d) SPASER. Örvarnar sýna stefnu geislaholsins. Myndirnar eru ekki í réttum hlutföllum.

langan líftíma í geislaholinu. Þetta er gert með því að hafa speglunarlögin nægilega mörg til að gefa yfir 99% speglun á bylgjulengd leisisins (mynd 1b).

Framleiðslukostnaður leisa lækkar verulega þegar stærð þeirra minnkar, auk þess sem nýir möguleikar á notkun leisiljóss opnast með smærri leisum. Það hefur því lengi verið keppikefli margra vísindamanna að hanna og smíða minnsta mögulega leisinn. Á árunum 2009 og 2010 hafa nokkrir rannsóknahópar talið sig hafa náð því marki að framleiða heimsins minnsta leisi, enda nota ekki allir sama mælikvarða á stærð leisisins [1–3]. Framleiddir hafa verið hálfleiðaraleisar með stærð geislahols allt niður í 1/1.000.000 af lengd fyrsta roðasteinsleisis Theodors Maiman frá 1960 [4]. Sem dæmi má nefna að leisivirki hefur sést í ZnO nanóvírum (mynd 1c) sem eru nokkrir  $\mu\text{m}$  að lengd og 200–400 nm í þvermál [5]. Fræðilega séð kæmist um milljarður slíkra örleisa fyrir á einni



**Mynd 2.** Kúlulaga málmögn í ytra rafsviði. Ef bylgjulengd rafsegulgeislunar er mun stærri en þvermál agnarinnar má líta svo á að sviðið sem ögnin sér á hverjum tíma sé einsleitt.

hálfleiðaraskífu en sá fjöldi svarar nokkurn veginn til núverandi ársframléiðslu hálfleiðaraleisa í heiminum.

Tilgangur þessarar greinar er hins vegar ekki að fjalla nánar um hálfleiðaraleisa heldur lýsa nýrri hugmynd um leisi í nanóstærð sem er talsvert ólík fyrri hugmyndum um hönnun og smíði leisa. Hér er átt við svokallaðan SPASER, en sú skammstöfun stendur fyrir „surface-plasmon amplification by stimulated emission of radiation.“ Í þessu tilfalli kemur örsmá málmögn í stað hefðbundins geislahols og mögnunin er fengin t.d. með því að húða málmögnina með þar til gerðu efni (mynd 1d). Strangt til tekið er hér ekki um ljósmögnun að ræða, því sveiflur í rafsegulsviði við yfirborð agnarinnar eru staðbundnar og tengdar sveiflum í rafeindabéttleika í málminum. Þær lúta því ekki sömu lögmálum og ljóseindir í einangrandi efni, þó ögnin geisli óhjákvæmilega frá sér „hefðbundnum“ ljóseindum á sama hátt og örlítið loftnet. SPASER hugmyndin var sett fram af Bergman og Stockman árið 2003 [6] og fyrstu mælingar á slíkum örleisum voru birtar í tímaritinu *Nature* á síðasta ári [7].

## 2. Ljóseiginleikar málmagna

Tiltölulega einfalt er að lýsa svörun kúlulaga málmagna sem verða fyrir rafsegulgeislun þegar málmögnin er mun minni en bylgjulengd rafsegulgeisluarinnar (mynd 2). Fyrir sýnilegt og nærinnautt ljós í lofti er bylgjulengd á bilinu 400–2500 nm og við reiknum með að fyrir örsmáar agnir megi líta svo á að ögnin sjái á hverjum tíma einsleitt ytra rafsvið, þ.e.a.s. að ytra rafsviðið breytist lítið yfir alla ögnina. Sýna má fram á að heildarmætti umhverfis ögn með geisla  $a$  og rafsvörunarstuðul  $\epsilon$  sem umlukin er efni með rafsvörunarstuðul  $\epsilon_m$  verður [8]

$$\Phi_{r>a} = -E_0 r \cos \theta + \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0\epsilon_m r^3} \quad (1)$$

þar sem tvíþólsvægi agnarinnar  $\mathbf{p}$  er gefið með jöfnunni

$$\mathbf{p} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_m a^3 \frac{\epsilon - \epsilon_m}{\epsilon + 2\epsilon_m} \mathbf{E}_0. \quad (2)$$

Rafsvörunarstuðli málma er lýst með tvinntölufalli, þar sem bæði raunhluti og þverhluti geta breyst verulega með tíðni. Við háa tíðni (oft á sýnilega sviðinu)

verður raunhluti rafsvörunarstuðulsins neikvæður og skautunarhæfni (e. polarizability) málmagnarinnar  $\alpha$ , sem skilgreind er með jöfnunni  $\mathbf{p} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_m \alpha \mathbf{E}_0$ , nær hámarksgildi þar sem raunhluti rafsvörunarstuðulsins verður jafn  $-2\epsilon_m$ . Hámarksgildi skautunarhæfninnar takmarkast af ljóstapi í málminum sem tengist þverhluta rafsvörunarstuðulsins. Fyrir vel leiðandi málma eins og gull og silfur getur aukning í skautunarhæfni örsmárra málmagna ( $<100$  nm) á sýnilega bylgjulengdarsviðinu orðið veruleg og þar með aukast bæði dreifing ljóssins og ísog af þeirra völdum. Örsmáar gull- og silfuragnir hafa t.d. verið notaðar í aldanna rás til að fá fram liti í steindu gleri. Hermitíðni málmagna er einnig háð rafsvörunarstuðli efnisins sem umlykur þær þ.a. ljóssvörun slíkra agna má nota sem nákvæman mælikvarða á breytingar í brotstuðli efna, t.d. í lífnemum [8]. Hermitíðni nanóagna má færa lengra út á innrauða sviðið með því að húða rafsvörunar agnir með þunnri málmsskel. Nokkur árangur hefur náðst í að nýta slíkar agnir í meðferð við ákveðinni tegund krabbameinsæxla [9]; gullhúðaðar nanóagnir sem settar eru í blóðrásina falla frekar út í æxlinu þar sem æðarnar eru gegndræpari. Með því að lýsa í gegnum vef með innrauðu ljósi á hermitíðni agnanna má nýta þær til að breyta orku ljóseindanna í hita. Innrauða ljósið hefur ekki áhrif á heilbrigða vefi líkamans en hitinn sem frá ögnunum stafar drepur frumur í æxlinu.

Nefna má að Gustav Mie leiddi út nákvæmar jöfnur fyrir svörun lítilla agna í rafsegulsviði árið 1908 [10]. Áhugasamir geta kynnt sér þær útleiðslur í kennslubókum í ljósfraði [11].

## 3. Málmögn verður leisir

Árið 2003 kynntu David Bergman og Mark Stockman nýstárlega hugmynd í grein í tímaritinu *Physical Review Letters* [6]. Þeir bentu á að ef málmögn situr mjög nálægt efni sem örva má milli tveggja orkustiga (gæti verið flúrljómandi sameind eða skammtapunktur) þá mætti fá fram nokkurs konar leisivirkni. Orkuskammtur staðbundins rafsegulsviðs sem tengdur er sveiflum í rafeindabéttleika í málminum gæti þannig valdið tilfærslu af efra orkustigi niður á það neðra og örvað annan orkuskammt þéttleikasveiflunnar, svokallaða staðbundna rafgaseind (e. localized surface plasmon), sem væri samfasa hinni fyrri. Af þessum sökum völdu Bergman og Stockman að kalla fyrirbærið „SPASER,“ þar sem um er að ræða mögnun rafgaseinda (SP) en ekki ljóseinda eins (L) og í hefðbundnum LASER.

SPASER-virkni krefst þess að a) efnið sem gefur ljósmögnunina hafi öfuga sætni, sem t.d. má fá fram með utanaðkomandi ljósvörpun, b) að fjarlægð

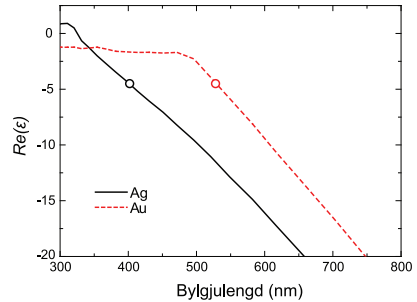
milli orkustiga efnisins svári til hermitíðni málmagnarinnar og c) að efnið sem gefur ljósmögnun sé innan seilingar nærsviðs agnarinnar, sem oft er í stærðarþrepinu 10 nm. Ef þessi skilyrði eru uppfyllt má fá fram sterkt, samheldið (e. coherent) og staðbundið rafsegulsvið á nanóskvarða í nærsviði málmagnarinnar. Sumar eiginveiflur í rafeindapétteleika agnarinnar verða þó einnig til þess að orka geislar frá henni, á svipaðan hátt og hefðbundið loftnet sendir frá sér rafsegulbylgjur. Vegna smæðar agnarinnar og fjölda mögulegra eiginástanda sveiflunnar má búast við að sú geislun sé samheldin en ekki stefnuháð, ólíkt flestum hefðbundnum leisum sem hafa mjög stefnuháða útgeislun.

Mögnun rafgaseinda í SPASER þarf að vera utalsverð til að yfirvinna ísog sem óumflýjanlega verður í málminum vegna árekstra frjálstra rafeinda við kristallsgrindina. Margir rannsóknahópar hafa á síðustu árum glímt við að yfirvinna þetta tap, bæði fyrir staðbundnar rafgaseindir og rafgasskautunareindir sem ferðast eftir skilfleti málms og rafsvarandi efnis (nýlegt yfirlit um þær rannsóknir má finna í [12]).

#### 4. Tilraunir

Ef gert er ráð fyrir að SPASER sé gerður úr málmögn sem umlukin er íbættu gleri eins og tilfellið er í grein Noginov *et al.* [7], þá er hermitíðni agnarinnar sú tíðni þar sem raunhluti rafsvörunarstuðuls málmsins er  $\Re(\epsilon) \approx -4,5$  samanber útleiðslurnar hér að framan. Mynd 3 sýnir raunhluta rafsvörunarstuðuls fyrir tvo málma með hlutfallslega lágt ljóstap, gull og silfur (gögn fengin frá Johnson og Christy [13]). Í silfri svarar hermitíðni fyrir þetta tilfelli til fjólublás ljóss (400 nm), rétt við jaðar sýnilega sviðsins. Fyrir gullagnir í glerhjúp lendir hermitíðnin hins vegar á græna bylgjulengdarsviðinu, nálægt 530 nm. Noginov og félagar [7] húðuðu 14 nm gullagnir með 15 nm þykku lagi af kísiloxíði sem íbætt var með flúrljóm-andi litarefni (OG-488). Þvermál hvernar agnar var því um 44 nm. Litarefnið sendir frá sér grænt ljós þegar það er örvað með bláu ljósi.

Í tilraun Noginov og féлага voru gerðar litrófs-mælingar og tímaháðar ljómunarmælingar sem þóttu sanna SPASER-virkni í umræddum ögnum. Þegar agnirnar voru örvaðar með nægilega sterkum örstutum (5 ns) ljóspúlsum (við 488 nm bylgjulengd) sendu þær frá sér ljós með talsvert minni línubreidd en flúrljómun litarefnisins ein og sér hefði gefið. Höfundar sýndu þó ekki fram á að ljósið frá stakri ögn væri samheldið þ.a. tilraunirnar útiloka ekki að hér hafi aðeins verið um að ræða mögnun sjálfgeislunar (e. amplified spontaneous emission), frekar en eiginlega leisvirkni. Sú fyrrnefnda er einmitt ósamheldin geislun þó hún



**Mynd 3.** Raunhluti rafsvörunarstuðuls fyrir gull og silfur. Hringirnir merkja bylgjulengdina (í tómarúmi) sem svarar til hermitíðni agnar sem umlukin er glerefni með brotstuðul  $\sqrt{\epsilon} = 1,5$ .

geti haft minni línubreidd en venjuleg sjálfgeislun frá flúrljómandi sameindum [14]. Frekari mælingar munu væntanlega varpa meira ljósi á þessi atriði.

#### 5. Lokaorð

Í þessari grein hefur verið fjallað um svokallaðan SPASER; nokkurs konar örleisi þar sem málmögn sem er langtum smærri en bylgjulengd ljóssins sem SPASERinn sendir frá sér kemur í stað hefðbundins geislahols. Almenn séð eru ljóseiginleikar málmyfirborða og málmagna spennandi rannsóknasvið sem getur haft gríðarlega þýðingu í framtíðinni á mörgum sviðum tækni og vísinda, allt frá sólarorkusöfnun til krabbameinslækninga.

#### Heimildir

- [1] R.F. Oulton, et al. Plasmon lasers at deep sub-wavelength scale, *Nature* **461** 629–632 (2009).
- [2] C. Walther, G. Scalari, M.I. Amanti, M. Beck, J. Faist, Microcavity laser oscillating in a circuit-based resonator, *Science* **19**, 1495–1497 (2010).
- [3] M.P. Nezhad, et al. Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers, *Nature Photonics* **4** 395–399 (2010).
- [4] T.H. Maiman, Stimulated Optical Radiation in Ruby, *Nature* **187**, 493–494 (1960).
- [5] M.A. Zimmler, J. Bao, F. Capasso, S. Müller, C. Ronning. Laser action in nanowires: Observation of the transition from amplified spontaneous emission to laser oscillation, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 051101 (2008).
- [6] D.J. Bergman, M.I. Stockman, Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 027402 (2003).
- [7] M.A. Noginov et al. Demonstration of a spaser-based nanolaser, *Nature* **460**, 1110–1112 (2009).
- [8] S. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and applications* (Springer, New York, 2007).

- [9] S. Lal, S.E. Clare, N.J. Halas. Nanoshell-enabled photothermal cancer therapy: Impending clinical impact. *Accounts Chem. Res.* **41**, 1842–1851 (2008).
- [10] G. Mie, Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen, *Ann. Phys.* **25**, 377–445 (1908).
- [11] Sjá t.d. M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics* (University Press, Cambridge, 1999).
- [12] K. Leosson, M.C. Gather, P.G. Hermannsson, A. Boltasseva. Long-range surface plasmon polariton waveguides and devices, í *Plasmonics and Plasmonic Metamaterials: Analysis and Applications*, ritstj. G. Shvets og I. Tsukerman (World Scientific Publishing, Singapore, 2011).
- [13] P.B. Johnson, R.W. Christy. Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B* **6**, 4370–4379 (1972).
- [14] M.C. Gather, K. Meerholz, N. Danz, K. Leosson. Net optical gain in a plasmonic waveguide embedded in a fluorescent polymer, *Nature Photonics* **4**, 457–461 (2010).

**Summary:** The concept of surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation (SPASER), first introduced by Bergman and Stockman in 2003 [6], has been briefly described. The SPASER can be considered as a nano-laser, where the cavity of a conventional laser is replaced by a metallic nanoparticle. Gold nanoparticles coated with a silicon dioxide shell exhibit a localized surface plasmon resonance around 530 nm. When the silicon dioxide is doped with a suitable fluorescent dye and the particle pumped at the excitation wavelength, resonant energy transfer to a plasma oscillation in the metal is observed and, for suitably strong pumping, stimulated plasmon emission occurs. In 2009, Noginov *et al.* [7] provided the first demonstration of such effects, using 14-nm gold particles coated with a 15 nm thick silica shell doped with a fluorescent dye emitting at the plasmon resonance wavelength of the gold particle. Substantial narrowing of the emission spectrum was observed and modifications of emission lifetime were observed. However, the coherence of single-particle emission remains to be measured as the final confirmation of laser-like SPASER emission from nanoparticles.

**Um höfundinn:**

Kristján Leósson er vísindamaður við Raunvísindastofnun Háskólans. Frá árinu 2000 hefur hann aðallega einbeitt sér að rannsóknum á ljóseiginleikum málmagna og málmyfirborða.

---

<sup>a</sup>Raunvísindastofnun Háskólans  
Dunhaga 3, 107 Reykjavík  
k.leosson@raunvis.hi.is  
Móttekin: 14.12.2010