



Doctoral Thesis

Thermo-elastisch induzierte optische Bistabilität

Author(s):

Pirani, Peter

Publication Date:

1990

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000592693> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 9176

THERMO-ELASTISCH INDUZIERTE OPTISCHE BISTABILITÄT

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
PETER PIRANI
dipl. phys. ETH
geboren am 2. Februar 1960
von Frauenfeld (TG)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Walter Lukosz, Referent
PD Dr. Markus W. Sigrist, Korreferent

1990

Kurzfassung

Durch den thermo-elastischen Effekt induzierte optische Bistabilität (OB) wird theoretisch und experimentell für die folgenden optischen Systeme untersucht:

- In einem *Wellenleiter*, der aus einem absorbierenden Film (ZnS, ZnSe, ITO) oder aus einem absorptionsfreien Film (SiO₂-TiO₂) mit einer absorbierenden Zusatzschicht (ZnS, ZnSe, Metall) ausserhalb des wellenleitenden Films besteht, wird mit Hilfe eines Prismenkopplers eine geführte Welle (*Mode*) angeregt. Der Einkopplungs-Wirkungsgrad und der Absorptions-Wirkungsgrad haben als Funktion der Breite d des Koppelspalt zwischen Film und Prisma eine Resonanz.
- *Oberflächen-Plasmonen* sind elektromagnetischen Grenzschichtwellen, welche entlang einer Grenzfläche zwischen einem Metall und einem Dielektrikum laufen. Wir regen Oberflächen-Plasmonen mit einem Prismenkoppler in Systemen an, bei denen ein Metallfilm (Gold, Silber oder Aluminium) auf ein Substrat oder auf das Koppelprisma aufgedampft wurde. Der Absorptions-Wirkungsgrad bildet als Funktion der Koppelspalt-Breite d eine Resonanz.
- Planparallele *Fabry-Perot-Resonatoren* mit aufgedampften Spiegeln aus einem Metall (Gold, Silber oder Aluminium) weisen eine Absorption, Reflexion und Transmission auf, die als Funktion des Spiegelabstandes d Resonanzen haben.

Bei Beleuchtung eines OB-Elementes mit einem fokussierten Laserstrahl wird das eingestrahlte Licht mit einem bestimmten Wirkungsgrad absorbiert. Die dadurch erzeugte Wärme fliesst ins Substrat und/oder ins Prisma. Diese dehnen sich aus, was zu einer Reduktion der Koppelspalt-Breite d bzw. des Spiegelabstandes d führt. Da die Absorption als Funktion dieses Abstandes d eine Resonanz bildet, ändert sich damit der Absorptions-Wirkungsgrad. Die zur Erzeugung von OB notwendige Rückkopplung wird damit durch den beschriebenen thermo-elastischen Effekt bewirkt. Experimentell wird bei allen beschriebenen Systemen OB beobachtet: Bei den Wellenleiter-Moden und den Oberflächen-Plasmonen wird OB mit einem Ar-Laser (Wellenlänge $\lambda=488$ nm und $\lambda=514$ nm) mit kritischen Leistungen von einigen mW beobachtet. OB mit Fabry-Perot-Resonatoren wird mit einem leistungsschwachen HeNe-Laser ($\lambda=633$ nm) und mit Laserdioden ($\lambda=780$ nm und $\lambda=673$ nm) erreicht. Mit Silberspiegeln auf PMMA (Plexiglas) -Substraten werden kritische Leistungen $P_{\text{krit}} \approx 60 \mu\text{W}$, mit Silberspiegeln auf Glas-Substraten $P_{\text{krit}} \approx 1$ mW beobachtet. Die benötigten Schaltzeiten liegen in allen Fällen bei einigen 10 ms.

Mit einem absorbierenden ZnS-Wellenleiter wird auch das gemeinsame Auftreten von *thermo-optischem* (temperatur-induzierte Brechungsindex-Änderung) und *thermo-elastischem* Effekt experimentell beobachtet und theoretisch erklärt.

Die Theorie gliedert sich in einen *optischen* und einen *thermo-elastischen* Teil. Bei allen Systemen werden die optischen Eigenschaften mit Hilfe der verallgemeinerten Fresnel-Koeffizienten für planare, unendlich ausgedehnte Schicht-Systeme berechnet. Die Verwendung der Koppler-Theorie zur Beschreibung der Wellenleiter-Moden erlaubt eine genauere Beschreibung und die Optimierung dieses Systems. Untersucht werden neben Systemen mit Wellenleiter-Moden oder Oberflächen-Plasmonen auch Systeme mit gekoppelten Oberflächen-Plasmonen oder Kopplung von Moden mit Oberflächen-Plasmonen. Zur Beschreibung und Optimierung der optischen Eigenschaften der Fabry-Perot-Resonatoren wird eine eigene Theorie hergeleitet, die einerseits die Bestimmung des optimalen Metalls und der optimalen Spiegeldicken erlaubt und andererseits zu einer analytischen Beziehung zwischen maximal erreichbarer Transmission und kritischer Leistung für optimierte Fabry-Perot-Resonatoren führt.

Die Dynamik der thermo-elastischen OB wird durch eine einfache Gleichung in guter Näherung beschrieben. Durch Vergleich von theoretischen und experimentellen Hysteresen und Schaltexperimenten werden die Zeitkonstanten abgeschätzt. Die Berechnung der Film-Temperatur und der Ausdehnung ermöglicht eine genauere Beschreibung der Dynamik und zeigt den Einfluss der thermo-elastischen Material-Parameter (z. B. der hohen Wärmeleitfähigkeit der Metallfilme) und der optischen Parameter (z.B. des Strahlradius). Vorgeschlagen wird eine Pixellierung der Metallfilme. Für solcherart pixellierte Fabry-Perot-Resonatoren werden die zu erwartenden kritischen Leistungen und Schaltzeiten berechnet. Für Fabry Perot-Resonatoren, bei denen zusätzlich auch die Substrate pixelliert werden, können bei einer kritischen Leistung $P_{\text{krit}} \approx 10 \mu\text{W}$ Schaltzeiten von $\Delta t \approx 100 \mu\text{s}$ erwartet werden.

Abstract

Optical bistability (OB) induced by the thermo-elastic effect is examined theoretically and experimentally for the following optical systems:

In a *waveguide* configuration, consisting of an absorptive waveguiding film (ZnS, ZnSe, ITO), or alternatively of a non-absorbing waveguiding film (SiO₂-TiO₂) with an absorbing layer (ZnS, ZnSe, metal) on the waveguide or on the coupling prism, a guided mode is excited by means of a prism coupler. Both the incoupling efficiency and the absorption efficiency exhibit a resonance as functions of the coupling gap width d .

Surface plasmons are electromagnetic surface waves guided along an interface between a metal and a dielectric. We excited surface plasmons by means of a prism coupler in systems with a metal film of gold, silver or aluminium evaporated onto a substrate or the prism. The absorption efficiency as a function of the coupling gap width d exhibits a resonance.

Plane *Fabry-Perot resonators* with mirrors consisting of a metal layer (gold, silver or aluminium) on a substrate show an absorptance, reflectivity and transmission, which exhibit a resonance as a function of the mirror separation d .

By illumination of an OB device with a focused laser beam, the light is absorbed with a certain efficiency. The generated heat flows into the substrate and/or the prism, which therefore expand. This leads to a reduction of the coupling gap width d , or of the mirror separation d , respectively. As the absorptance forms a resonance as a function of the width d , the absorption efficiency changes. Thus the feedback needed for OB is provided by the thermo-elastic effect.

Experimentally, we observed OB with all the systems described: By excitation of waveguide modes or of surface plasmons, we observed OB with an argon laser (of wavelength $\lambda=488$ nm and $\lambda=514$ nm) with critical powers of some mW. OB with Fabry-Perot resonators was successfully examined with a low power HeNe ($\lambda=633$ nm) and diode lasers ($\lambda=786$ nm and $\lambda=673$ nm). With silver mirrors on PMMA substrates we observed a critical power of about $P_{\text{crit}} \approx 60 \mu\text{W}$; with glass substrates, we found $P_{\text{crit}} \approx 1$ mW. The time constants were about some tens of milliseconds for all systems.

With an absorptive ZnS-waveguide we observed OB caused simultaneously by the *thermo-optic* (i.e. a change of the refractive index with temperature) and the *thermo-elastic* effect. Theory and experiment agree well.

The theory consists of an *optical* and a *thermo-elastic* part. For all systems the absorptance can be calculated by means of the Fresnel coefficients for planar, stratified layer systems. The description of the waveguide modes with the coupler theory allows an alternative description and the optimization of this system. Not only systems with waveguide modes or surface plasmons are examined, but also systems with coupled surface

plasmons, or systems where a surface plasmon is coupled with a guided mode. We also developed a theory for the description and optimization of the Fabry Perot resonators. With this theory, we are able to determine the ideal metal and the optimum mirror thicknesses for thermo-elastic OB. We further found an analytic relation between the maximum transmission and the critical power of optimized Fabry Perot resonators. The influence of the relatively poor surface quality of the commercially available PMMA substrates used on the properties of the OB was calculated and was found to be in good agreement with the experiments.

The dynamics of the thermo-elastic OB can be described in a good approximation by a simple equation. By comparison of theoretical and experimental hysteresis curves or switching experiments, respectively, we estimated the time constant. The calculation of the film temperature and the expansion of the substrate allow a better description of the system's dynamics and shows the influence of the thermo-elastic material parameters (e.g., the high thermal conductivity of the metal films) and of the optical parameters (e.g., the spot size). We propose the pixellation of the metal film. For arrays of Fabry-Perot resonators pixellated in this way we calculated the critical power and the switching time. For Fabry-Perot resonators, where the substrates are pixellated too, a critical power of about $P_{crit} \approx 10 \mu\text{W}$ and switching times of about $\Delta t \approx 100 \mu\text{s}$ are expected.