

28 NELINEÁRNÍ OPTIKA

Nelineární optické jevy

Holografie a optoelektronika

Světelná vlna (jako každá jiná vlna) vyjádřená ve tvaru $y=y_0 \sin(\omega t - \varphi)$ je charakterizována základními charakteristikami: úhlovým kmitočtem ω , vlnovou délkou λ a amplitudou y_0 . Zjistili jsme již, že všechny optické konstanty (např. index lomu, součinitel absorpce aj.) závisí na úhlovém kmitočtu. Tato závislost vyplynula z představy elektronů v atomech jako lineárních oscilátorů (vztah 26.31), proto všechny jevy, které můžeme na základě této představy vysvětlit, zahrnujeme do tzv. lineární optiky. Již v úvodu ke kapitole 23 jsme upozornili na to, že v praxi se může vyskytnout i nelineární oscilátor, ve kterém síla vyvolávající kmitání je úměrná i vyšším mocninám výchylky. Vzniká otázka, zdali za určitých okolností se i elektron nechová jako nelineární oscilátor. Pro názornější pochopení této problematiky uveďme, že intenzita elektrického pole působící v atomu na elektrony je řádu 10^{11} Vm^{-1} . Všechny klasické zdroje světla poskytují elektromagnetické vlny, ve kterých je vektor intenzity elektrického pole nepřekročí hodnotu 10^3 Vm^{-1} . V takových polích se elektron vždy chová jako lineární oscilátor. Lasery, se kterými se seznámíme později, však umožnily získat elektromagnetické vlny charakterizované amplitudou vektoru intenzity elektrického pole 10^9 Vm^{-1} . V takových polích se již elektron chová ne jako lineární ale jako nelineární oscilátor. Jevy, které s tím souvisejí zahrnujeme proto do tzv. nelineární optiky. Projevují se zejména v tom, že optické konstanty jsou funkcemi nejen úhlového kmitočtu, ale i amplitudy vlny.

28.1 Nelineární optické jevy

Nejznámější nelineární jevy jsou generace vyšších harmonických kmitočtů, usměrnění světelné vlny (věta 28.1), závislost polarizace na amplitudě světelné vlny (věta 28.2), závislost indexu lomu na amplitudě (věta 28.3) a s tím související možnost tzv. autofokuse laserového záření, možnost realizace laseru se spojitě měnící se vlnovou délkou a jiné.

28.1

Je-li prostředí složeno z oscilátorů, u kterých je síla způsobující pohyb oscilátoru úměrná i druhé, třetí a vyšším mocninám výchylky oscilátoru, vzniká vedle budící elektromagnetické vlny se základní frekvencí ještě vlna s druhou, třetí, případně vyššími harmonickými kromě přítomnosti tzv. ustálené složky.

28.2

Vektor polarizace v prostředích vystavených účinku laserového záření je úměrný nejen prvé mocnině, ale i vyšším mocninám intenzity elektrického pole působící vlny

Jestliže síla, která způsobuje vlastní kmity oscilátoru je úměrná i vyšším mocninám výchylky, je diferenciální rovnice (23.27) při působení budící elektromagnetické vlny $E=E_0 \cos \omega t$ popisující jeho kmity tvar

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} + 2b \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y + a_1 y^2 + a_2 y^3 + \dots = \\ = \frac{E_0}{m} \cos \omega t. \end{aligned}$$

(28.3)

Řešení takové rovnice není jednoduché, avšak bez toho, aby jsme ji řešili, můžeme z ní lehce

$$P = \epsilon_0 \chi_{\ell 1} E + \chi_{\ell 2} E^2 + \chi_{\ell 3} E^3 \dots, \quad (28.1)$$

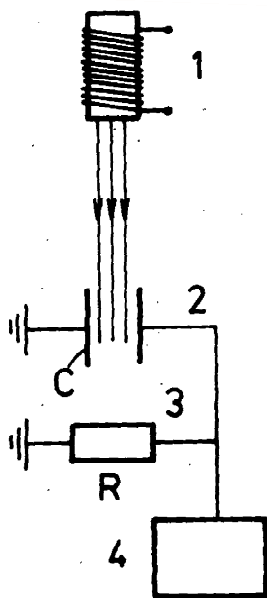
28.3

Index lomu závisí v nelineární optice na amplitudě intenzity elektrického pole dopadající E_0 podle

$$n = n_0 + \alpha E_0^2, \quad (28.2)$$

vztahu

kde α je konstanta. Tato závislost vyvolává tzv. autofokusaci laserového paprsku.



Obr. 28.1

Zařízení na pozorování polarizace nelineárního prostředí po dopadu elektromagnetické vlny: 1 - laser, 2

dedukovat nové kvalitativní odlišnosti nelineárního oscilátoru. Řešení y musí zřejmě obsahovat kromě funkce $\cos(\omega t + \chi)$ i funkce $\cos^2(\omega t + \chi)$, $\cos^3(\omega t + \chi)$, atd.

Jestliže detektory elektromagnetických vln reagují na dopadající vlnění v něm obsažených harmonických složek je potřebné najít kvadratickým, kubickým a dalším funkcím jejich lineární ekvivalenty. Takové transformace umožňující známé relace

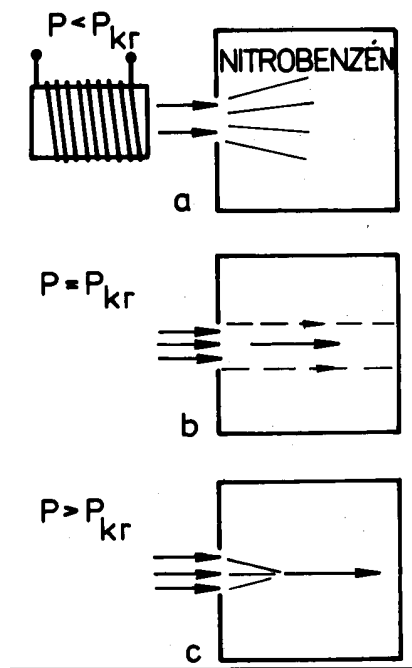
$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\alpha, \quad (28.4)$$

$$\cos^3 \alpha = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{4} \cos 3\alpha. \quad (28.5)$$

To však značí, že kromě základního úhlového kmitočtu vlna obsahuje i vlny s vyššími harmonickými kmitočty 2ω , 3ω , atd. Objevení druhé harmonické vlny při průchodu záření z rubínového laseru křemenem roku 1961 Frankem velmi silně stimuloval rozvoj nelineární optiky. Vznik třetí harmonické vlny byl pozorován při průchodu stejného záření krystalem vápence CaCO_3 . Tyto jevy umožňují např. transformaci viditelného laserového záření na neviditelné (ultrafialové), resp. naopak (infračervené na viditelné).

Podle vztahu (28.4) by mělo světelné pole obsahovat i stejnosměrnou složku odpovídající konstantě $1/2$. V praxi by to znamenalo, že světlo vyvolává střídavou, ale i stejnosměrnou polarizaci prostředí. Tento jev byl v uspořádání podle obr. 28.1 skutečně pozorován. Projevuje se vznikem impulsu elektrického proudu v obvodu kondenzátoru 2 po dopadu impulsu

elektromagnetického záření z laseru



Obr. 28.2 Vznik autofokace laserového svazku v nelineárním prostředí

1. Uvedené jevy jsou obsahem věty 28.1.

Vztah (28.1) vyplývá z faktu, že v řešení rovnice (28.3) se vyskytují i vyšší mocniny periodických funkcí. Přítomnost druhé a třetí harmonické vlny ve světelném poli znamená, že řešení rovnice (28.3) obsahuje členy úměrné $E_0^2 \cos^2 \omega t$ a $E_0^3 \cos^3 \omega t$, tj. druhou resp. třetí mocninu výchylky harmonického oscilátoru. Jelikož vektor polarizace je definován součtem jednotlivých elektrických momentů přítomných v objemové jednotce (vztah /19.39/), musí být tato veličina úměrná i vyšším mocninám intenzity elektrického pole. Tento fakt má za následek, že i index lomu definovaný vztahem $n^2 = \epsilon_r = 1 + \chi_l$ je rovněž funkcí amplitudy dopadající vlny. Ve světelném poli je podle vztahu (28.5) přítomný kromě členu $E_0 \cos \omega t$ i člen $3/4 E_0^3 \cos \omega t$, tedy člen se stejným úhlovým kmitočtem, ale různou amplitudou. Relativní permitivita prostředí je proto s ohledem na vztah (28.1) dána

$$\epsilon_r = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} = 1 + \chi_{l1} + \frac{3\chi_{l2}}{4\epsilon_0} E_0^2,$$

takže je správná i rovnice

$$n^2 = 1 + \chi_{l1} + \frac{3\chi_{l2}}{4\epsilon_0} E_0^2 = n_0^2 + \alpha E_0^2,$$

což je vztah (28.2). Zajímavým důsledkem této závislosti je autofokace laserového svazku. Podle tohoto vztahu je totiž opticky nejhustější oblast v ose paprsku, protože tam je elektrické pole vlny maximální. Proto, jestliže se část záření začíná šířit do stran, odraz od opticky řidšího prostředí vrátí tuto část záření do osy paprsku. Tento objev byl skutečně pozorován. Na obr. 28.2a je vidět rozbíhavý svazek laseru při výkonu pod

20 kW v nitrobenzénu, na obr. 28.2b je paprsek stabilizovaný (kritický výkon 20 kW) a na obr. 28.2c je vidět vznik autofokusace při výkonu nad 20 kW. Krátkodobě se pozoruje vznik tzv. "nití" o průřezu rovném přibližně vlnové délce záření, takže vzniká neobyčejně velká koncentrace energie.

Nelineární jevy umožňují řešit i technicky velmi důležitý problém "laditelnosti" laseru, neboli tzv. parametrického laseru. Princip činnosti takového laseru spočívá v tom, že do nelineárního prostředí dopadá jednak laserová vlna $E_I = A_I \cos(\omega_I t - \chi_I)$ a dvě slabé vlny

$$E_1 = A_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1)$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega_2 t - \varphi_2).$$

Jsou-li splněny podmínky

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_\ell$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_{\ell'}$$

nastává následkem nelinearity $P = \epsilon_0 \chi_{I1} E + \chi_{I2} E^2$ přesun energie laserového paprsku na vlny o frekvenci ω_1 a ω_2 . Jelikož jejich frekvence můžeme volit v určitém intervalu, vytvoří se možnost generace laserového záření se spojitě se měnícím kmitočtem.

28.2 Holografie a optoelektronika

Do lineární optiky musíme zařadit i další dva, v současné technice velmi významné obory: holografii a optoelektroniku. V obou odvětvích se totiž používá jako zdroj záření laser a ten je, jak jsme viděli v předcházející stati, prvek nelineární optiky. Holografie je metoda získávání trojrozměrného obrazu předmětu, která je založena na interferenci světla (věta 28.4). Optoelektronikou se nazývá ta část elektroniky, v které jsou elektrické spoje nahrazeny světelnými (věta 28.5).

28.4

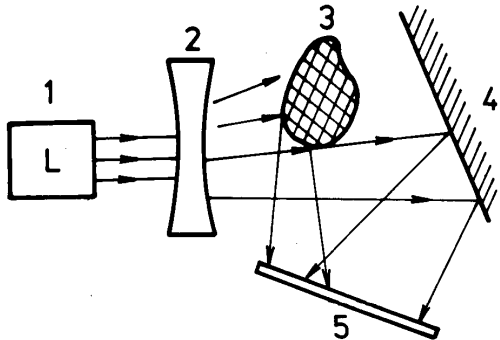
Hologram je fotografická deska (případně jiné záznamové medium), na které je zaznamenán obraz vytvořený koherentním zářením zdroje a stejným zářením, které se od předmětu odrazilo, nebo jím prošlo.

28.5

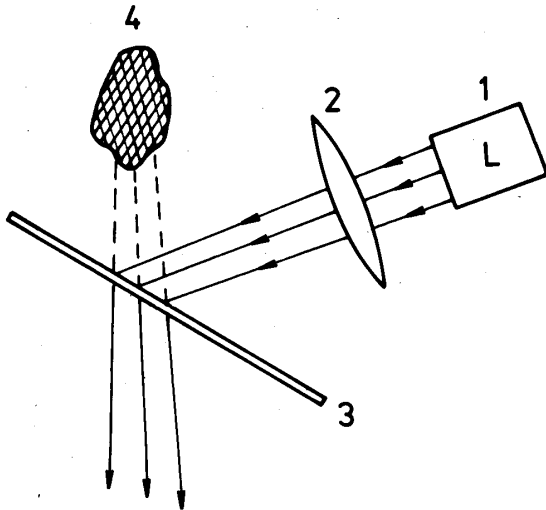
Světlovod je tyč nebo vlákno zpravidla válcového tvaru, vyrobené z průhledného materiálu, který má velký index lomu a malý součinitel absorpce (např.

Základy holografie (z řeckého slova holos = úplný, celý, grafo = píši) vypracoval již roku 1948 anglický fyzik maďarského původu Gábor. V podstatě jde o záznam a reprodukci prostorového obrazu na základě interference koherentního záření odraženého od předmětu se stejným zářením vycházejícím ze zdroje. Záznam obrazu se děje tak, že se částí světla z laseru ozáří předmět, druhá část se odrazí od zrcadla a dopadá spolu s prvou částí světla do místa záznamu (obr. 28.3). Místem záznamu bývá zpravidla fotografická deska. Světlo

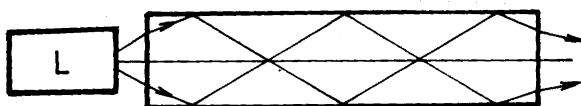
plexisklo).



Obr. 28.3 Záznam hologramu: 1 - laser, 2 - optický systém, 3 - zobrazované těleso, 4 - zrcadlo, 5 - hologram



Obr. 28.4 Rekonstrukce hologramu: 1 - laser, 2 - optický systém, 3 - hologram, 4 - trojrozměrný obraz tělesa



Obr. 28.5 Činnost světlovodu

ze zdroje interferuje se světlem odraženým od předmětu (nebo které jím prochází) a vytvoří složitý obrazec, který se zaznamenává na fotografickou emulsi. Na rozdíl od obyčejné fotografie nepřipomíná tento obrazec ničím předmět - je to systém světlých a tmavých míst, který ani pod mikroskopem neposkytuje žádnou informaci o zobrazovaném předmětu. Tento záznam se nazývá hologram.

Rekonstrukce obrazu se uskutečňuje tak, že se ozáří deska se záznamem světlem z laseru (pod stejným úhlem, pod jakým na ni dopadal svazek paprsků odražených od zrcadla). Tím se vytvoří světelné pole, které oko vnímá jako prostorový obraz původního předmětu (obr. 28.4).

Vznik prostorového obrazu pochopíme na základě této jednoduché úvahy. Jednoduchá (plošná) fotografie zobrazovaného předmětu vzniká následkem "intenzitního" pole od předmětu odraženého světla vznikajícího v místě uložení fotografické desky. I když použité světlo vyjádřené např. pomocí intenzity elektrického pole

$$E = E_0 \sin(\omega t - \varphi) = E_0 \sin(\omega t - kx)$$

odražené od různých bodů předmětu má různou fázovou konstantu, samotná fotografie vznikající následkem chemických procesů úměrných intenzitě dopadajícího záření, tj. druhé mocnině amplitudy E_0^2 představuje jen registraci amplitudy. Jinými slovy: fázové konstanty, charakterizující "hloubku" osvětleného předmětu, nejsou na fotografii zaznamenány, proto je obraz plošný. Jestliže bychom však nechali na vhodnou fotografickou desku dopadnout monochromatické světlo odražené od předmětu a současně od zrcadla (obr. 28.3) tak, že by tyto složky mohly navzájem interferovat, objevilo by se na této desce podle vztahu (24.19) intenzitní pole

$$A^2 = E_o^2 + E_{op}^2 + 2E_o E_{op} \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

kde E_o je amplituda vlny odražené od zrcadla a E_{op} je amplituda vlny odražené od předmětu. Rozdíl fází musí splňovat vztah $\varphi_2 - \varphi_1 = k(x_2 - x_1)$, kde x_2 a x_1 představuje dráhu paprsku odraženého od předmětu a od zrcadla. Vidíme, že nyní je na fotografické desce zaznamenáme i pole fázových konstant podávajících informaci o hloubce předmětu. Při vhodné rekonstrukci (obr. 28.4) takové fotografie bychom tedy měli dostat prostorový obraz předmětu. Experiment můžeme úspěšně realizovat.

Hologram můžeme uskutečnit i pomocí zvukové monochromatické vlny (akustická holografie).

Holografie má velké perspektivy uplatnění ve filmu, v televizi, ve stereografii, v pamětech počítačů a jinde.

Náhrada elektrických spojů v elektronických zařízeních světlem je velmi lákavá, protože problém kontaktů a spojů při obrovském množství součástek, které dnešní složité aparatury mají, je jedním z nejchoulostivějších. Převážná část poruch elektronických zařízení je v kontaktech a spojích. Objev laseru poskytl dostatečně intenzivní koherentní paprsek, který může vykonávat funkci spoje. Předpokladem však je, že se vyřeší otázka přenosu energie světlem a že se najdou prvky citlivé na světlo.

Zařízení, které obstarává přenos světelné energie se nazývá světlovod. Jeho úlohou je sbírat rozbíhavé paprsky a odevzdat světelnou energii na žádaném místě. Tuto funkci vykonává na základě úplného odrazu (obr. 28.5). Čím průhlednější je materiál a čím má větší index lomu, tím s větší účinností se světelná energie přenáší. V případě silných výkonů laserového záření se s výhodou využívá i efekt autofokuse.

Kromě zdrojů vhodného záření poskytuje současná technika i celou řadu citlivých na světlo, takže optoelektronické obvody se již začínají zavádět do praxe.

GÁBOR Denis, 1900-1979, fyzik maďarského původu, po vystudování fyziky a několikaletém působení v Německu pracoval v Anglii. Dlouhá léta se zabýval výzkumem katodových paprsků, výbojů v plynech a plazmatech. Při svých experimentech objevil v r. 1942 nový princip optického záznamu prostorových předmětů na fotografickou desku využívající koherentní světelné svazky, pomocí kterých můžeme dostat úplnou informaci o daném předmětu. Tuto metodu nazval holografie a za její objev mu byla v r. 1971 udělena Nobelova cena. Holografický princip záznamu informace můžeme použít i v oblasti mikrovln, akustických vln, resp. i rentgenového záření.