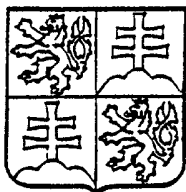


ČESKÁ A SLOVENSKÁ
FEDERATIVNÍ
REPUBLIKA
(19)



FEDERÁLNÍ ÚŘAD
PRO VYNÁLEZY

ZVEŘEJNĚNÁ PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

(12)

(21) 05294-90.K

(13) A3

(22) 29.10.90

(32) 30.10.89

(31) 89/22197

(33) IT

(40) 17.06.92

5(51) G 02 B 6/28.
G 02 F 1/36.
H 01 P 7/00.
5/22.

(71) SOCIETA CAVI PIRELLI S.p.A., Milano, IT

(72) Grasso Giorgio, Monza, IT
Righetti Aldo, Milano, IT
Fontana Flavio, Cormano, IT

(54) Širokopásmový optický zesilovač

(57) Optické vlákno obsahující dopovací látky laserové emise, zejména pro použití ve vláknových optických zesilovačích pro optické telekomunikační linky, obsahuje erbium (Er) jako dopovací látku laserové emise a je uzpůsobeno pro příjem telekomunikačního signálu z laserového vysílače v předem určeném rozsahu vlnových délek. Optické vlákno jako další dopovací látku, rozptýlenou podél optického vlákna, obsahuje samarium (Sm) ve formě trojmocného kationtu (Sm^{3+}). Obsah erbia (Er) v optickém vláknu je od 10 do 100 ppm hmotnostních. Koncentrace samaria (Sm) ve vztahu ke koncentraci erbia (Er) přítomného v optickém vláknu, vyjádřená jako procentní podíl hmotností obsažených oxidů, je:

1 je menší $\frac{8Sm_2O_3}{8Er_2O_3}$ je větší 10.

Vynález se týká optického vlákna obsahujícího dopovací látky laserové emise, zejména pro použití ve vláknových optických zesilovačích pro optické telekomunikační linky, dopovaného erbiem jako dopovací látkou laserové emise, a uzpůsobeného pro příjem telekomunikačního signálu z laserového vysílače v předem určeném rozsahu vlnových délek.

Je známo, že optická vlákna, ve kterých je jádro dopováno zvláštními látkami, například ionty vzácných zemin, mají charakteristiky stimulované emise vhodné pro použití jako laserové zdroje a optické zesilovače.

Tato vlákna mohou být napájena zdrojem světla o zvláštní vlnové délce, které je schopno přivést atomy dopovací látky do vybuzeného energetického stavu nebo čerpacího pásma, ze kterého atomy spontánně přecházejí ve velmi krátkém čase do stavu laserové emise, ve kterém zůstávají po poměrně dlouhý čas.

Když vlákno mající vysoký počet atomů vybuzených na úroveň emise je zatíženo světelným signálem o vlnové délce odpovídající stavu laserové emise, způsobí světelný signál přechod vybuzených atomů na nižší úroveň a světelná emise má stejnou vlnovou délku jako signál; vlákno tohoto druhu může být tedy užito k získání zesílení optického signálu.

Z vybuzeného stavu může přechod atomu proběhnout také spontánně, což dává vzniknout náhodné emisi tvořící "šum pozadí" překrývající stimulovanou emisi odpovídající zesilovanému signálu.

Tyto jevy probíhají na více vlnových délek v závislosti na dopovací látce a dávají vzniknout fluorescenčnímu spektru. Za účelem získání maximálního zesílení signálu pomocí vlákna výše popsaného typu současně s vysokým poměrem signál/šum se normálně používá signál o vlnové délce odpovídající maximu křivky fluorescenčního spektra vlákna obsahujícího použitou dopovací látku; tento signál je generován laserovým vysílačem.

Například může být jako zesilovací vlákno použito vlákno, jež jádro je dopováno ionty hliníku (Al^{3+}) a ionty erbia (Er^{3+}), jak je uvedeno v britské přihlášce vynálezu č.8813769. Nicméně fluorescenční spektrum erbia má v rozsahu požadovaných vlnových délek zvláště úzký emisní vrchol, který vyžaduje použít jako zdroj vysílacího signálu laserový vysílač pracující na velmi přesně definované vlnové délce při omezené odchylce, neboť signály přestupující tuto odchylku by nebyly správně zesíleny, protože by současně docházelo na příslušné vlnové délce k silnému zesílení šumu pozadí.

Laserové vysílače mající výše uvedené vlastnosti se nesnadně a nákladně vyrábějí, přičemž obecná průmyslová výroba těchto přístrojů má v emisní vlnové délce spíše větší odchylky.

Zatímco v některých aplikacích, například v podmořských komunikačních linkách, by měly být použity vysílače přenosového signálu pracující na přesné vlnové délce, získané například pečlivým výběrem mezi komerčně dostupnými lasery, takže by se použily pouze ty, které mají emisi těsně u vrcholu laserové emise zesilovacího vlákna, není tento postup přijatelný z ekonomického hlediska pro jiné druhy

linek, například pro městské komunikační linky, když je třeba důležité omezit zřizovací náklady.

Například vlákno podle výše uvedeného patentového spisu, které bylo dopováno ionty hliníku (Al^{3+}) pro změnu indexu lomu a ionty erbia (Er^{3+}) pro umožnění laserové emise, má emisní vrchol na 1531 nm, který v rozsahu ± 5 nm od této hodnoty ukazuje vysokou intenzitu a mohl by být použit pro zesílení; tudíž pro práci s tímto optickým vláknem je lepší použít signál ve stejném rozsahu vlnových délek. Nicméně komerčně dostupný polovodičový laser, který by byl vhodný k použití, je obvykle vyráběn s hodnotami emisní vlnové délky v rozmezí od 1520 do 1570 nm.

Výsledek je ten, že velký počet komerčně dostupných laserů je mimo požadovaný rozsah a tedy nemůže vysílat signál uzpůsobený pro správné zesílení.

Na druhé straně je známo, že vlákna dopovaná erbiem (Er) mají v emisním spektru oblast s vysokou a v podstatě stálou intenzitou rozmezí vlnových délek přilehlou k výše popsanému vrcholu a mají rozsah signálu výše uvedených komerčně dostupných laserů. Nicméně v tomto optickém vlákně signál přiváděný na vlnové délce odlehle od maxima vrcholu emise by byl zesílen v omezené míře, neboť spontánní přechody ze stavu laserové emise ve vlákně hlavně nastávají při emisi na vlnové délce vrcholu spektra, na 1531 nm, takže vyvíjejí "šum pozadí", který by byl dále zesílen v délce vlákna a překrýval by užitečný signál.

Je možno uvažovat o provedení filtrace světelné emise tvořící "šum" na konci zesilovače přijetím pouze vlnové délky signálu pro účel zajištění vhodného filtru na konci aktivního vlákna. Nicméně přítomnost nežádoucí emise ve vláknu v rozsahu maximálního zesílení vlákna by odebírala čerpací energii, tudíž by činila vlákno v podstatě neúčinným s ohledem na zesílení signálu.

Jsou rovněž známy interferenční foltry, které mohou být umístěny na rozličných místech podél zesilovacího vlákna, leč známé filtry tohoto druhu jsou vytvořeny z diskretních součástí, které nejsou vyrobeny z vlákna a tedy vyžadují ve vzduchu svazky světla, což je činí nevhodnými pro průmyslové využití.

Problém tedy spočívá ve vytvoření aktivního optického vlákna použitelného v optických zesilovačích a vhodného k použití současně s komerčně dostupnými lasery pro emisi přenosového signálu bez dalších omezení.

Úkolem předloženého vynálezu je tedy vytvoření dopovaného optického vlákna schopného dát uspokojivé zesílení v dostatečně širokém rozsahu vlnových délek, aby bylo umožněno použít komerčně dostupné lasery při zamezení spontánních emisí materiálu na nežádoucích vlnových délkách, které by vedly ke snížení zesilovací schopnosti vlákna a působily šum pozadí vysoké intenzity vzhledem k přenášenému signálu.

Vynález tudíž vytváří optické vlákno obsahující dopovací látky laserové emise, zejména pro použití ve vláknových optických zesilovačích pro optické telekomunikační linky, dopované erbiem jako dopovací látkou laserové emise, a uzpůsobené pro příjem telekomunikačního

signálu z laserového vysílače v předem určeném rozsahu vlnových délek, jehož podstata spočívá v tom, že obsahuje další dopovací látku rozptýlenou podél vlákna, kterážto dopovací látka má absorpci pro světlo vlnové délky nižší než 1540 nm podstatně vyšší, než je absorpce, kterou dává další dopovací látka pro světlo mající vlnovou délku měnící se od 1540 nm k horní mezi předem určeného rozsahu vlnových délek vysílacího signálu.

Ve zvláště výhodném provedení předloženého vynálezu další dopovací látkou je samarium ve formě trojmocného kationtu Sm^{3+} .

Koncentrace samaria ve vláknu s ohledem na koncentraci erbia přítomného ve vláknu, vyjádřená jako procentní podíl hmotnosti obsažených oxidů je:

$$1 \leq \frac{[\text{Sm}_2\text{O}_3]}{[\text{Er}_2\text{O}_3]} \leq 10.$$

Vynález dále vytváří optický zesilovač, zejména pro optické telekomunikační linky pracující s vysílacím signálem v předem určeném rozsahu vlnových délek, obsahující aktivní optické vlákno s laserovou emisí dopované erbiem, jehož podstata spočívá v tom, že aktivní optické vlákno obsahuje další dopovací látku rozptýlenou podél vlákna a mající absorpci pro světlo vlnové délky nižší než 1540 nm podstatně vyšší než má další dopovací látka pro světlo o vlnové délce měnící se z 1540 nm k horní mezi předem určeného rozsahu vlnových délek vysílacího signálu.

Vynález je znázorněn na výkrese, kde obr.1 je schema optického zesilovače s aktivním vláknem, obr.2 je diagram energetických přechodů vlákna vhodného pro zesilovač podle obr.1, kteréžto přechody jsou uzpůsobeny k vyvíjení stimulované (laserové) emise, obr.3 je

diagram křivky stimulované emise křemíkového optického vlákna dopovaného (kationty hliníku) (Al^{3+}) a (erbia) (Er^{3+}) , obr.4 je diagram křivky stimulované emise optického vlákna z obr.1 dopovaného (kationty hliníku) (Al^{3+}) a (erbia) (Er^{3+}) a (samarie) (Sm^{3+}) a obr.5 je diagram absorpce světla optického křemíkového vlákna dopovaného (kationty hliníku) (Al^{3+}) a (erbia) (Er^{3+}) a (samarie) (Sm^{3+}) .

K zesilování telekomunikačních signálů v optickém vlákně může být výhodně použit zesilovač vytvořený z vlákna. Struktura takového zesilovače je schematicky znázorněna v obr.1, kde je optické telekomunikační vlákno 1, do kterého se vysílá přenosový signál vlnové délky λ_s generovaný laserem 2 emitujícím signál. Tento signál, který se po projití určitou délkou vlákna zeslabí, se vede do dichroického vazebního členu 3, kde je na jediném výstupním vlákně 4 spojen s čerpacím signálem vlnové délky λ_p vyvíjeným čerpacím laserovým vysílačem 5. Aktivní vlákno 6 připojené k výstupnímu vlákně 4 dichroického vazebního členu 3 tvoří prvek zesilující signál, který je potom zaveden do vlákna 7 linky, aby byl veden k místu určení.

Pro vytvoření aktivního vlákna 6 tvořícího zesilovací prvek v jednotce je výhodné použít optické vlákno na bázi oxidu křemičitého v dopovaném roztoku obsahujícím (oxid hliníku) (Al_2O_3) a (erbia) (Er_2O_3) druhu popsaného například ve výše uvedené britské přihlášce vynálezu č.8813769, které umožňuje výhodné zesílení přenášeného signálu dosažené využitím laserových přechodů erbia.

Jak je patrné z diagramu v obr.2 týkajícího se vlákna zmíněného typu a znázorňujícího možné energetické stavy pro iont erbia v roztoku ve vlákně s matricí na bázi oxidu křemičitého, ^(SiO₂) zavedení světelné energie na čerpací vlnové délce λ_p nižší než je vlnové délka λ přenášeného signálu do aktivního vlákna uvede určitý počet iontů ^{erbium} (Er^{3+}) přítomných v matrici skla vlákna jako dopovací látka do "vybuzeného" energetického stavu 8, dále uváděného jako "čerpací" pásmo, ze kterého ionty spontánně přecházejí na energetickou úroveň 2 tvořící úroveň laserové emise.

Na úrovni laserové emise 2 mohou ionty ^{erbium} (Er^{3+}) setrvat poměrně dlouho než podstoupí spontánní přechod na základní úroveň 10.

Je známo, že zatímco přechod z pásma 8 na úroveň 2 je spojen s emisí termálního typu, která je rozptýlena do okolí vlákna (fononové záření), přechod z úrovně 2 na základní úroveň 10 vyvíjí světelnou emisi na vlnové délce odpovídající energetickým hodnotám úrovně 2 laserové emise. Když vlákno obsahující velké množství iontů na úrovni laserové emise je zatíženo signálem vlnové délky odpovídající této úrovni emise, tento signál způsobí stimulovaný přechod těchto iontů ze stavu emise do základního stavu před jejich spontánním přechodem kaskádním jevem vyvíjejícím emisi vysoce zesíleného signálu na výstupu aktivního vlákna.

Za nepřítomnosti přenášeného signálu způsobuje spontánní přechod ze stavu laserové emise, což je diskrétní číslo typické pro každou látku, luminiscenci mající vrcholy na rozličných frekvencích odpovídajících možným úrovním. Tak například, jak je patrné

z obr.3, vlákno na bazi Si/Al ^{ionty erbia} dopované (Er^{3+}) a vhodné pro použití v optických zesilovačích má na vlnové délce 1531 nm emisní vrchol vysoké intenzity, zatímco při větší vlnové délce, přibližně 1560 nm má oblast, ve které je emise také silná, avšak intenzita mnohem nižší.

V přítomnosti světelného signálu zavedeného do vlákna na vlnové délce odpovídající vrcholu emise ^{ionty erbia} (Er^{3+}) při 1531 nm nastává velmi silné zesílení signálu, zatímco šum pozadí způsobený spontánní emisí erbia je omezený, což činí vlákno vhodným pro použití v optickém zesilovači pro signál této vlnové délky.

Komerčně dostupné a obvykle používané lasery generující signál polovodičového typu (In,Ga,As) mají typické emisní pásmo v rozsahu od 1,52 do 1,57 μm . To znamená, že jejich výrobní technika není schopna zajistit emisí přenášeného signálu na přesné hodnotě kmity odpovídající emisnímu vrcholu vlákna dopovaného erbiem používaného jako zesilovač, ale naopak dává vysoké procento vyrobených kusů, ve kterých je signál lokalizován v oblastech emisní křivky vlákna přilehlých ke zmíněnému emisnímu vrcholu.

Signál vyvíjený zmíněnými laserovými vysílači by nemohl být zesílen k dosažení dostatečného zisku v zesilovači s optickým ^{ionty erbia} vláknem dopovaným (Er^{3+}) výše popsaného typu, protože čerpací energie zavedená do aktivního vlákna by byla z největší části použita k zesílení šumu pozadí vyvíjeného uvnitř aktivního vlákna samotného zesilovače v souvislosti se spontánní emisí ^(Er) erbia na vlnové délce 1,531 nm.

Nicméně bylo pozorováno, že vlákno obsahující určité množství ^{kationtů} samaria (Sm^{3+}) jako další dopovací látky spolu s ^{ionty erbia} (Er^{3+}) má křivku stimulované emise v rozsahu vlnových délek typu znázorněného v obr.4,

prostou vrcholu lokalizovaného u 1,531 nm o vysoké intenzitě, a má na druhé straně vysokou a téměř stálou hodnotu v širokém rozsahu mezi 1,530 a 1,560 nm.

Toto vlákno by také mohlo být použito v optickém zesilovači pracujícím se signály vyvíjenými komerčně dosažitelnými laserovými vysílači, neboť má schopnost vyvíjet zesilovací účinek s uspokojivým ziskem na přenášeném signálu ve zmíněném rozsahu vlnových délek bez přidávání nepřijatelného množství "šumu".

Jako příklad byl sestaven zesilovač podle schematu znázorněného v obr.1, obsahující aktivní vlákno 6 typu "step index" Si/Al dopované ^(ionty erbia) (Er^{3+}) a ^(ionty samaria) (Sm^{3+}) při obsahu 40 ppm hmotnosti ^(oxidu erbia) (Er_2O_3) a 60 ppm ^(oxidu samaria) hmotnosti (Sm_2O_3) .

Délka aktivního vlákna je 30 m.

Byl použit čerpací laserový vysílač 2, laser s ionty argonu, pracující na 528 nm s výkonem 150 mW, zatímco jako laserový vysílač 2 signálu byl použit komerčně dostupný laser polovodičového typu (In,Ga,As), který měl výkon 1 mW a změřenou emisní vlnovou délku 1,560 nm.

S tímto pokusným uspořádáním byl za zesilovačem ve směru přenosu dosažen zisk 27 dB při vstupním signálu 1 mW.

V nepřítomnosti signálu byla změřena úroveň spontánní emise 10 μ W za zesilovačem ve směru přenosu.

Takováto emise tvořící šum pozadí vytvářená zesilovačem nepředstavuje významný šum v poměru k signálu, který je zesilován na mnohem vyšší úroveň (asi 250 μ W).

Pro srovnání byl použit stejný laserový vysílač 2 přenášeného signálu se zesilovačem majícím stejné uspořádání jako v předešlém případě, avšak při použití aktivního vlákna 6 typu "step index"

kationty erbia
Si/Al dopovaného (Er^{3+}) , obsahujícího 40 ppm erbia hmotnosti (Er^{3+}) , přičemž aktivní vlákno mělo délku 30 m.

Tento zesilovač dával při přenášení signálu na vlnové délce 1,560 nm zisk nižší než 15 dB, přičemž spontánní emise byla na úrovni srovnatelné s úrovní výstupního signálu.

Jak plyne z výše popsaných příkladů, zatímco zesilovač podle druhého příkladu dával snížený zisk a způsoboval takový šum, že příjem přenášeného signálu byl obtížný, takže zmíněný zesilovač byl prakticky nepoužitelný, zesilovač používající aktivní vlákno podle předloženého vynálezu, jak je zřejmé z prvního příkladu, dokázal schopnost vysokého zesilovacího zisku současně se zanedbatelným zavedeným šumem.

Získaný výsledek je způsoben přítomností samaria jako další dopovací látky v aktivním vláknu, ve skutečnosti se samarium chová jako absorbér emise na vlnové délce erbia na 1,531 nm a současně neabsorbuje v podstatné míře světelnou energii na vyšší vlnové délce, takže "srovnává" touto cestou emisní spektrum aktivního vlákna, takže toto může účinně působit na přenášené signály v rozsahu dostatečně širokém pro využití většiny komerčně dostupných polovodičových laserů (In,Ga,As).

Jak je znázorněno v obr.5, který znázorňuje absorpční křivku pro jednotku délky vlákna typu Si/Al dopovaného samariem ^(Sm^{3+}), způsobuje přítomnost samaria ve vláknu pro vlnovou délku podstatně nižší než 1,540 nm značně vyšší absorpci, než je absorpce znázorněná mezi 1,540 nm a 1,560 nm. To znamená, že samarium zavedené do vlákna

podle předloženého vynálezu se chová jako "filtr" rozptýlený podél aktivního vlákna absorbující fotony vyslané na 1,531 nm, pokud jsou fotony vyvíjeny pro spontánní přechod úrovně laserové emise erbia iontů (Er^{3+}), takže se takto zamezí jejich dopředný pohyb v aktivním vláknu způsobující další přechody pro tuto vlnovou délku, tedy snižující čerpací energii v rozsahu vlnových délek blízkém hodnotě, na které je vysílán užitečný signál a vyvíjející zesílený šum pozadí.

Množství erbia obsažené v aktivním vláknu se volí podle žádaného zisku pro použitou délku vlákna, to znamená, že délka vlákna se volí podle množství erbia obsaženého ve vláknu v závislosti na požadovaném zisku. Obvykle se erbium obsažené ve vláknu ve formě erbia oxidu (Er_2O_3) mění od 10 do 100 ppm hmotnosti vlákna.

V souvislosti s těmito hodnotami koncentrace erbia ve vláknu je koncentrace samaria podle hmotnosti ve formě samaria oxidu (Sm_2O_3) stejná nebo s výhodou vyšší než koncentrace erbia a její rozsah je dán vztahem

$$1 \leq \frac{[\text{Sm}_2\text{O}_3]}{[\text{Er}_2\text{O}_3]} \leq 10$$

Dopovací látky mohou být do vlákna zavedeny například technikou "dopování roztokem", která je dobře známa a dává uspokojivé kvalitativní výsledky, nebo jinými známými technikami podle specifických okolností. Nehledíc na skutečnost, že vynález byl popsán ve vztahu k použití samaria jako dopovací látky v aktivním vláknu, mohou být pro stejný účel použity i jiné dopovací látky za předpokladu, že mají vysokou absorpci světla odpovídající vlnové délce

maxima spontánní emise erbia, zejména na 1,531 nm a mající současně absorpci světla podstatně nižší pro vlnové délky vyšší než tato vlnová délka, přednostně vyšší než 1,540 nm pro celý rozsah vlnových délek odchylky komerčně dostupných laserových vysílačů signálu.

Aby nebyl ovlivněn čerpací výkon zesilovače požadovaný pro provádění populační inverze způsobující laserovou emisí v optickém vláknu, kterýžto čerpací výkon se přivádí do vlákna ve formě světelného záření na vlnové délce nižší než je vlnová délka přenášeného signálu, dopovací látka přidávaná k erbiu ve vláknu nemůže mít, jako samarium, podstatnou absorpci světla na čerpací vlnové délce, to je především na 528 nm nebo 980 nm.

Je zřejmé, že lze provést řadu obměn, aniž by se vybočilo z rámce ~~patentky~~ vynálezu.

P A T E N T O V É N Á R O K Y

1. Optické vlákno obsahující dopovací látky laserové emise, zejména pro optické zesilovače pro optické telekomunikační linky, přičemž zmíněné optické vlákno obsahuje erbium jako dopovací látku laserové emise a je uzpůsobeno pro příjem telekomunikačního signálu z laserového vysílače v předem určeném rozsahu vlnových délek, vyznačující se tím, že obsahuje samarium (Sm) ve formě trojmocného kationtu (Sm^{3+}), jako další dopovací látku rozptýlenou podél zmíněného optického vlákna

2. Optické vlákno podle bodu 1, vyznačující se tím, že obsah erbia (Er) v optickém vláknu je od 10 do 100 ppm hmotnostních.

3. Optické vlákno podle bodu 2, vyznačující se tím, že koncentrace samaria (Sm) ve vztahu ke koncentraci erbia (Er) ve zmíněném optickém vláknu vyjádřená jako procentní podíl hmotností obsažených oxidů je

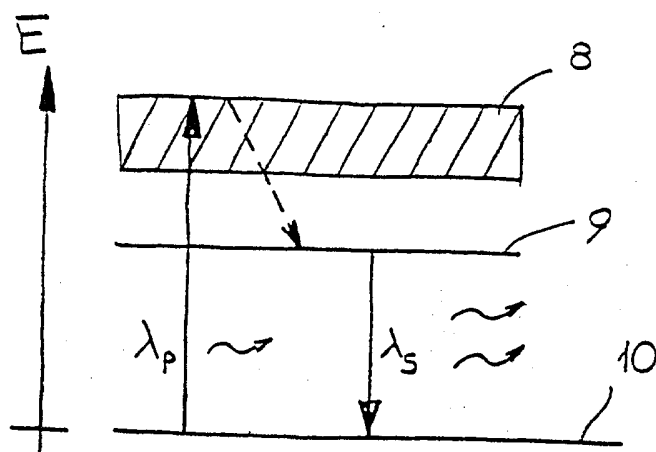
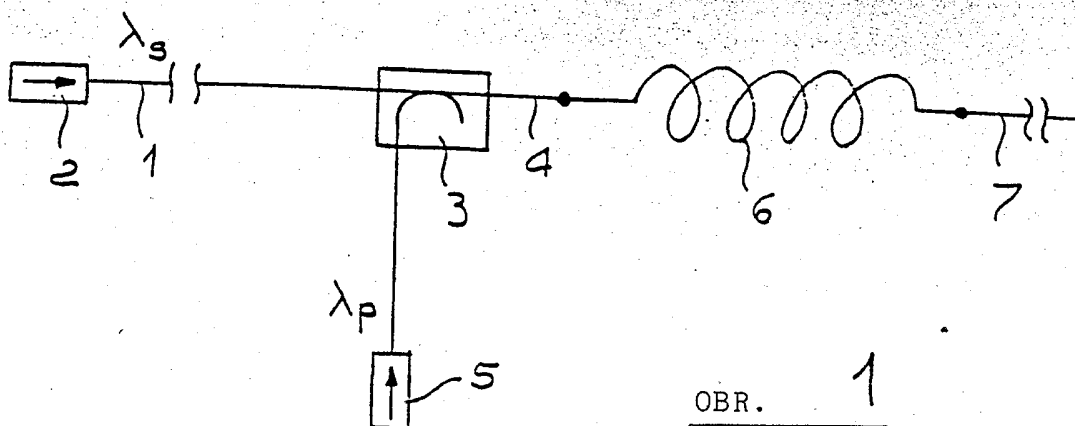
$$1 \leq \frac{[\text{Sm}_2\text{O}_3]}{[\text{Er}_2\text{O}_3]} \leq 10.$$

Zastupuje:

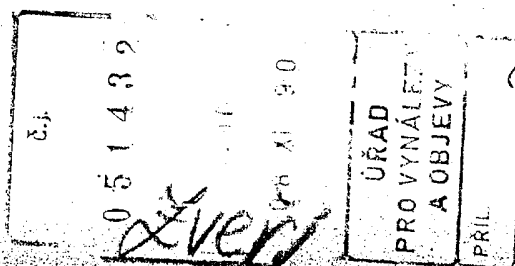
JUDr. Pavel ZELENÝ
advokát
Žitná 25, 115 04 Praha 1

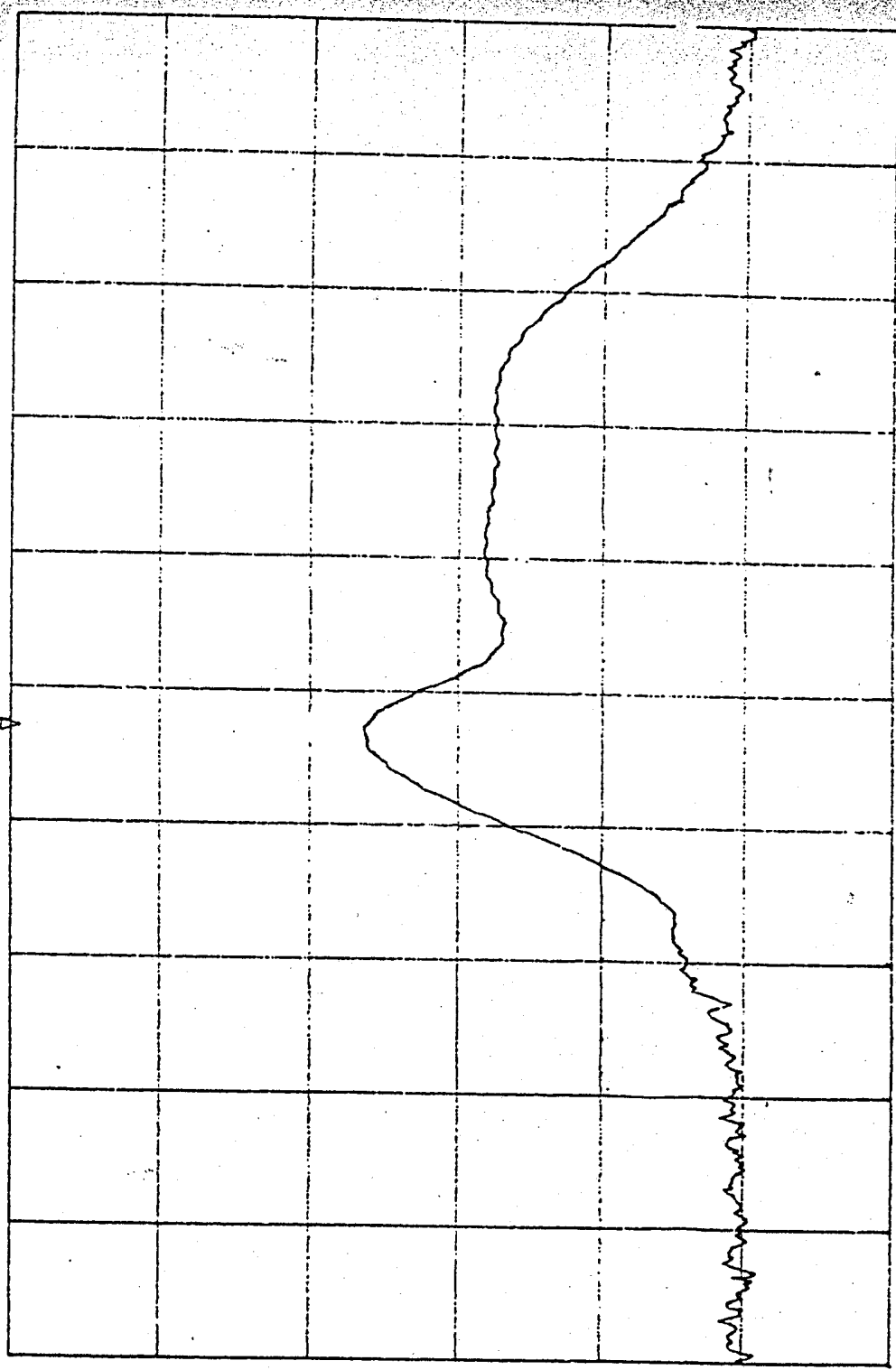
PŘÍL	ÚŘAD PRO VYNÁLEZY A OBJEVY	20. III. 92	015545
		20. III. 92	015545

2. ver.



JUDr. Pavel ZELENÝ
advokát





-20 dBm
 -80 dBm
 10dB/

1.484 μm λ 1.584 μm

JUD. PAVEL ZELENÝ
 advokát

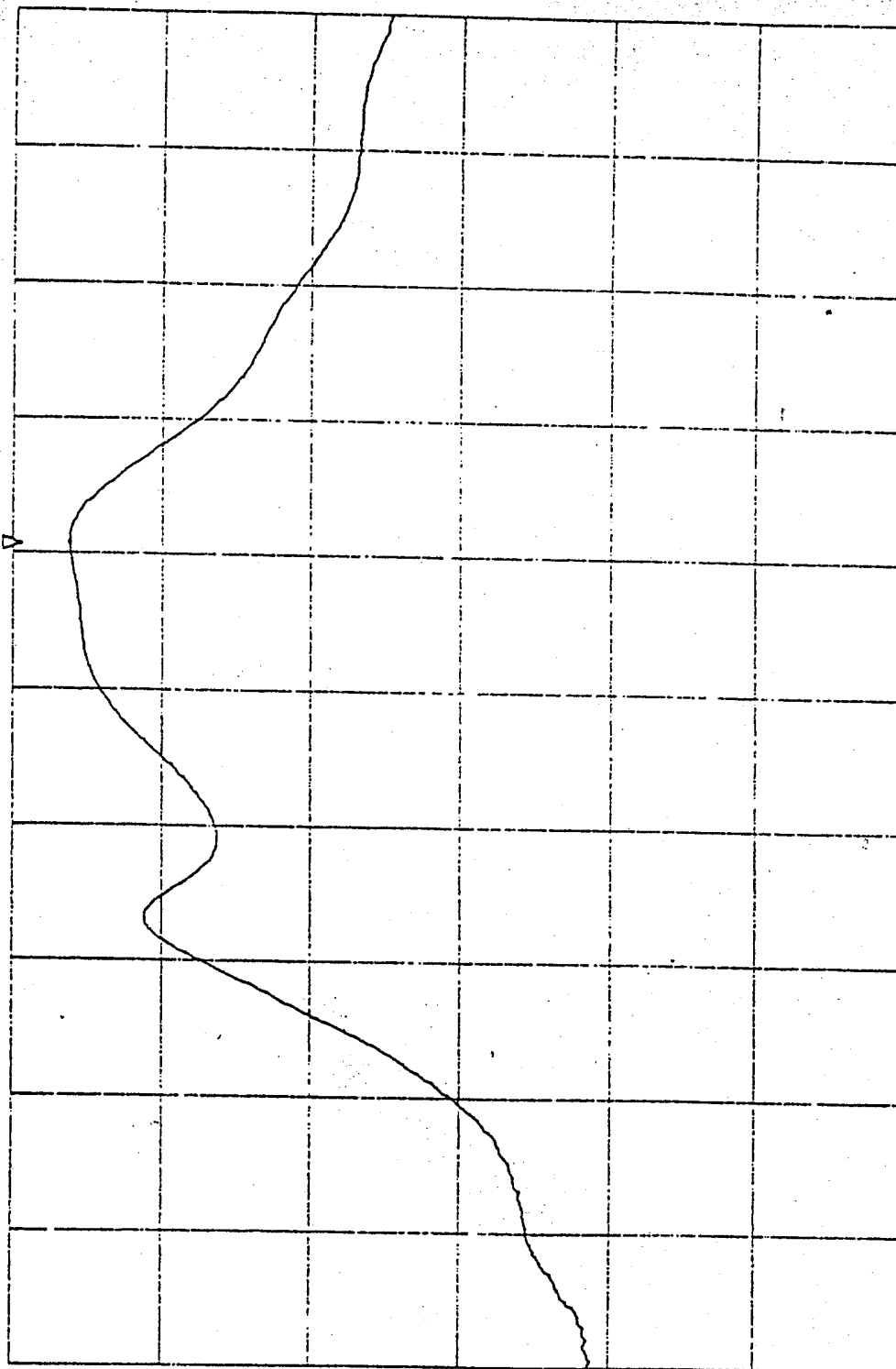
OBR. 3

051432

08 X 9

ÚŘAD
 PRO VYNÁLEZY
 A OBJEVY

PRIL



-35
dBm

5dB/

-65
dBm

051432

00510

008 XI 90

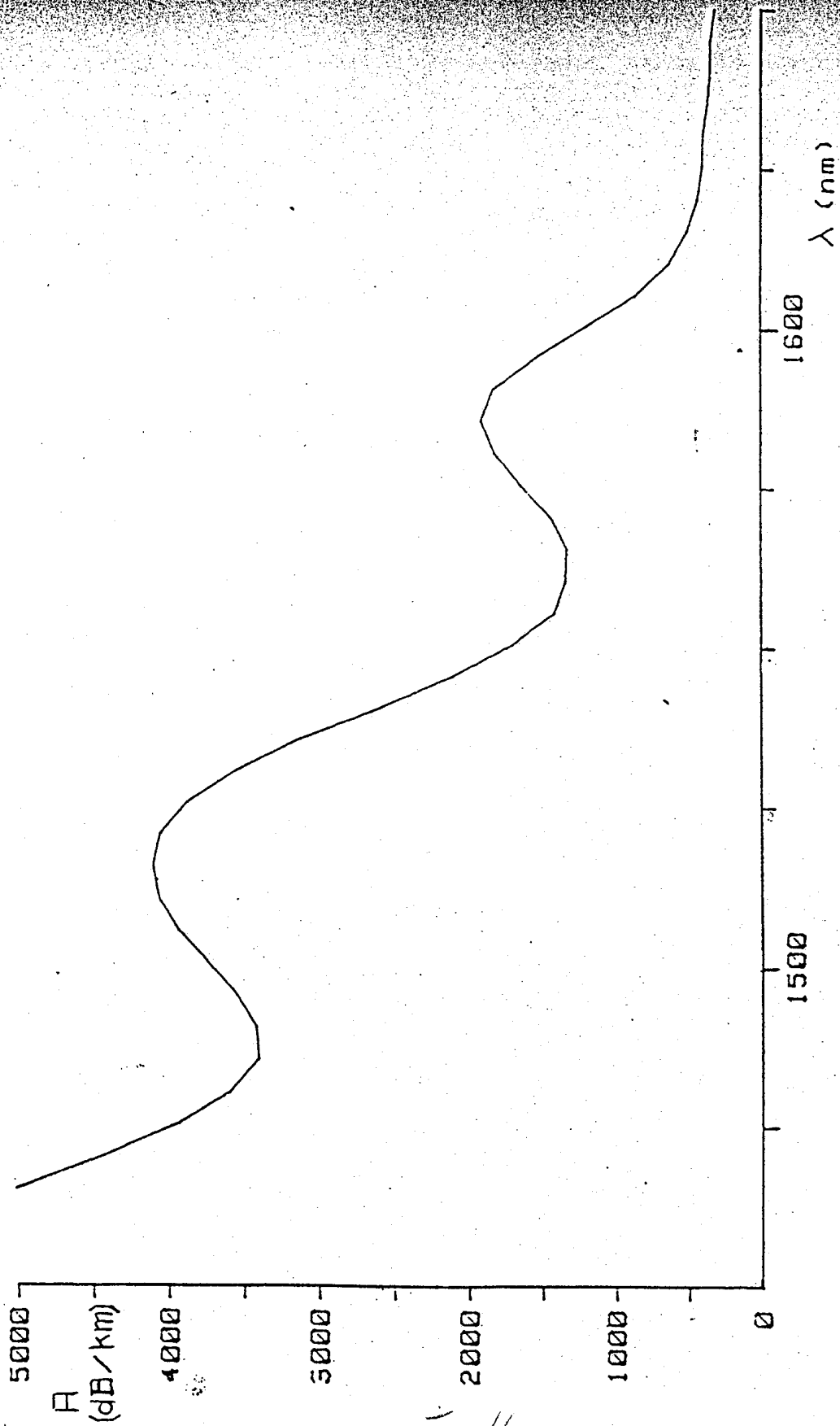
URAD <Gaa>
PROVÍZÁLE DBMag
A OBJEVY

PRIL

λ 1.500 1.600 μm

OBR. 4

JUDr. Pavel ZELENÝ
advokát



~~JUD. PAVEL ZELENÝ~~
~~adnotat~~

OBR. 5

51432
Fover
URAD
KRAJ
A02JELV