



(10) **DE 10 2004 062 639 B4** 2013.05.02

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 062 639.1**
 (22) Anmeldetag: **21.12.2004**
 (43) Offenlegungstag: **08.09.2005**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **02.05.2013**

(51) Int Cl.: **H01S 3/10** (2006.01)
H01S 3/109 (2006.01)
H01S 3/23 (2006.01)
G02F 1/35 (2006.01)
G02F 1/39 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:
10 2004 006 478.4 04.02.2004

(73) Patentinhaber:
Koch, Ralf, Dr., Lidingö, SE

(74) Vertreter:
**Hoffmann, Heinz-Dietrich, Dipl.-Ing., 16356,
 Ahrensfelde, DE**

(72) Erfinder:
gleich Patentinhaber

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

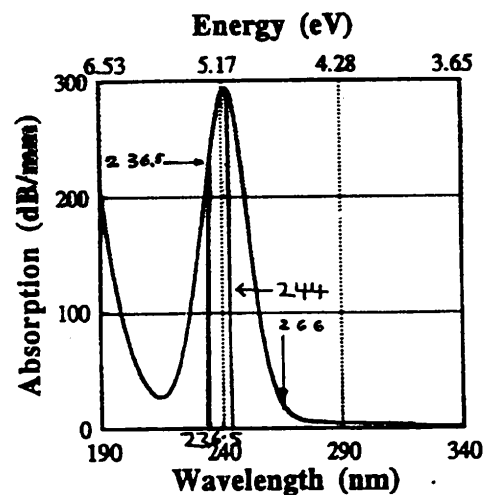
US	6 304 584	B1
US	2002 / 0 126 715	A1
EP	0 943 167	B1
WO	02/ 103 863	A1

**H. Schnitzler et al.: All-solid-state tunable
 continuous-wave ultraviolet source with high
 spectral purity and frequency stability. In: Appl.
 Opt., Vol. 41, No. 33, 2002, S. 7000-7005.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtungen zur Erzeugung von kohärentem UV-Licht**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Erzeugung von kohärentem UV-Licht mit einer vorgegebenen Wellenlänge durch Summenfrequenzbildung oder Frequenzverdopplung von Laserstrahlen, dadurch gekennzeichnet, dass die Grundwellenlaser-Strahlen von zwei Quasi-Drei-Niveau-Lasern erzeugt werden, von denen mindestens einer durchstimmbar ist, die nacheinander in beliebiger Reihenfolge durch Summenfrequenzbildung und Frequenzverdopplung frequenzumgewandelt werden, so dass ein kohärenter Laserstrahl mit der gewünschten Wellenlänge erzeugt wird.

Absorptionsmaximum bei 242 nm bei Ge-Dotierung



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Vorrichtungen und Verfahren zur Erzeugung von ultraviolettem Licht (UV). Das UV Licht wird durch Summenfrequenzbildung (SFG – vom englischen „Sum Frequency Generation“) von Wellenlängen im Sichtbaren, die durch Erzeugung der zweiten Harmonischen (SHG – vom englischen „Second Harmonics Generation“) entstanden sind, oder durch die Verdopplung von Wellenlängen im Sichtbaren, die von vorheriger SFG herkommen, erzeugt. Durch Nutzung der Vielzahl von existierenden Laserwellenlängen in üblichen Lasermaterialien sind zahlreiche Wellenlängen zugänglich. Die möglichen Anwendungen umfassen wissenschaftliche und industrielle Anwendungen. Ein spezielles „Konzept“ betrifft ein kontinuierliches (cw) All-Festkörperlaser-System bei etwa 242 nm zum Schreiben von Faser-Bragg-Gittern.

[0002] Es gibt viele wissenschaftliche und industrielle Anwendungen, die ultraviolettes Laserlicht mit guter Strahlqualität erfordern. Solche Anwendungen umfassen, ohne darauf beschränkt zu sein, Photolithographie, Mikrobearbeitung, das Bohren von Präzisionslöchern in Mehrfachlagen-Leiterplatten, sowie das Herstellen von Faser-Bragg-Gittern.

[0003] Bragg-Gitter (BG) sind Abschnitte von optischen Wellenleitern, wie ebenen Wellenleitern oder optischen Fasern, die behandelt wurden, um bestimmte Wellenlängen zu reflektieren und zu transmittieren. Die Herstellung von FBG beinhaltet das Belichten der photoempfindlichen Faser mit UV-Licht, dessen Intensität zwischen hell und dunkel entlang der Faser wechselt. Die hellen und dunklen Bänder der Belichtung sind entlang der Faser in Abständen angeordnet, die mit der Wellenlänge des Lichts vergleichbar sind, das von der Faser im Betrieb reflektiert werden soll. Das UV-Licht verändert den Brechungsindex der Faser, wobei ein Brechungsindex-Gitter entlang der Länge der Faser erzeugt wird.

[0004] Eine Lichtquelle, die für die Belichtung einer Faser zum Erzeugen von FBG benutzt wird, muß Licht innerhalb eines spezifischen Wellenlängenbereichs im UV-Bereich des Spektrums bereitstellen. Der primäre Wellenlängenbereich der Absorption einer typischen Ge-dotierten Faser hat ein Maximum nahe von 242 nm; und Wellenlängen, die von diesem Scheitelwert um mehr als etwa 10 nm abweichen, sind signifikant weniger effektiv. Sogar bei der Spitzenwertwellenlänge wird nur ein kleiner Anteil der Laserleistung absorbiert, sodaß es hocherwünscht ist, daß die Lichtquelle Licht bei einer Wellenlänge nahe dem Absorptionsmaximum zur Verfügung stellt.

[0005] Die gegenwärtigen Quellen für UV-Licht, die für das Schreiben von FBG angewandt werden, haben verschiedene Nachteile; keine ist völlig zufriedenstellend.

[0006] [Fig. 1](#) zeigt die Wellenlängenabhängigkeit der Absorption in Ge-dotierten Quarzglas-Fasern. Die Absorption bei ausgesuchten Wellenlängen ist ebenfalls angezeigt. Laser, die bei diesen Wellenlängen arbeiten, werden entweder gegenwärtig zum Schreiben von FBG genutzt oder wurden für diese Anwendung beschrieben.

[0007] In Laboratorien werden häufig frequenzverdoppelte Argonionen-Laser, die bei 244 nm arbeiten, für diese Anwendung genutzt. Kommerzielle Laser dieses Typs sind z. B. „FRED“ (Coherent, Inc.) und der „iTrain“ (Spectra Physics Lasers). Diese Laser sind recht zufriedenstellend hinsichtlich der Wellenlänge, da die Absorption sehr dicht an der maximalen Absorption liegt. Jedoch leiden sie unter den üblichen Nachteilen von Ionen-Lasern wie kurzer Betriebslebensdauer und hohen Betriebskosten. Die letzteren werden durch die geringe Effizienz hervorgerufen, die hohen Energieverbrauch und externe Wasserkühlung erfordert.

[0008] Weiterhin benutzt werden KrF-Excimer-Laser (248 nm) oder frequenzverdoppelte Kupferdampf-Laser (255 nm). Diese gepulsten Laser beinhalten jedoch ein deutlich höheres Risiko für ein versehentliches Zerstören der Fasern. Die hohen Spitzen-Ausgangsleistungen rufen eine Beschädigung der Fasern hervor, schwächen diese und machen sie empfänglich für Bruch. Darüber hinaus erfordern Excimer-Laser toxische, korrosive Gase für den Betrieb; sie haben hohe Betriebs- und Unterhaltskosten. Frequenzverdoppelte Kupferdampf-Laser erfordern externe Wasserkühlung und ihre Wellenlänge ist zu lang, um optimal zu sein.

[0009] Frequenzumgewandelte Flüssigkeits-Farbstoff-Laser sind unpraktisch da sie häufiges Wechseln der flüssigen Farbstoff-Lösung erfordern, um den Betrieb aufrecht zu erhalten.

[0010] Festkörperlaser, die aktive Materialien wie Nd:YAG, Nd:YLF, Yb:YAG enthalten, können effizient sein und können Ausgangsleistungen mit hoher Strahlqualität liefern. Der effizienteste Ausgang solcher Laser liegt im Infrarot-Bereich des Spektrums (IR), etwas länger als 1 µm zwischen 1000 nm and 1100 nm. Ein Yb:YAG-

Laser kann durch das Einfügen eines doppelbrechenden Filters durchgestimmt werden, was zu einem breit durchstimmbaren Laser (mehr als 35 nm) im IR nahe von 1030 nm führt [U. Brauch et al., Opt. Lett. 20 (1995) 713–715].

[0011] Die IR-Strahlung eines solchen diodengepumpten Lasers, der bei etwa 1 μm arbeitet, kann durch optisch nichtlineare Frequenzumwandlung wie die Bildung der zweiten Harmonischen (auch Frequenzverdopplung genannt) effizient in den grünen Bereich des Spektrums umgewandelt werden. Eine Anzahl von kristallinen Materialien werden für diese nichtlineare Frequenzumwandlung genutzt; z. B. Lithiumniobat, Lithiumtriborat (LBO) oder Kaliumtitanylphosphat (KTP), oder periodisch gepolte (quasi-phasenangepaßte) Kristalle.

[0012] Die Ausgangsstrahlung von frequenzverdoppelten Lasern im sichtbaren Spektralbereich kann nachfolgend in das UV durch SHG oder SFG umgewandelt werden. In einem optisch nichtlinearen Kristall kombiniert Summenfrequenzerzeugung zwei Photonen niedriger Energie zu einem Hochenergie-Photon ($\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ oder $1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$; wobei ω und λ die Kreisfrequenz und die Wellenlänge bezeichnen). SFG wird häufig genutzt, um langwellige Strahlung, z. B. infrarote Strahlung, in kurzwellige Strahlung, nämlich sichtbares oder ultraviolettes Licht umzuwandeln. Es sei angemerkt, daß die Erzeugung der zweiten Harmonischen ein Spezialfall der Summenfrequenzbildung mit $\omega_1 = \omega_2$ ist, und daß SFG der inverse Prozess zu optisch parametrischer Oszillation (OPO) ist [V. G. Dmitriev et al., "Handbook of nonlinear optical crystals". 3rd Edition, Springer (Berlin, Heidelberg, New York), 1999]. SFG wird auch Summenfrequenzmischung (SFM) genannt. Der Vollständigkeit halber soll die Differenzfrequenzbildung erwähnt werden. Dieser Prozess, auch Differenzfrequenzmischung genannt, ist nicht relevant im Kontext der Erfindung, da er für die Umwandlung von kurzwelliger Strahlung in langwellige Strahlung genutzt wird ($\omega_1 - \omega_2 = \omega_3$ oder $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$). Wann immer im folgenden der Begriff Mischung benutzt wird, so ist SFM (SFG) damit gemeint. Die Umwandlung von IR-Wellenlängen in das UV mit aufeinanderfolgenden SFG- und/oder SHG-Prozessen ist typischerweise ineffizient [V. G. Dmitriev et al., "Handbook of nonlinear optical crystals". 3rd Edition, Springer (Berlin, Heidelberg, New York), 1999]. Das rührt vorrangig von den Eigenschaften der optisch nichtlinearen Materialien her, die zur UV-Licht-Erzeugung benutzt werden. Die Aufgabe ist besonders fordernd im Falle von cw-Lasern, da die Ausgangsleistung eines jeden NLO-Prozesses quadratisch von der Eingangsleistung abhängt. Folglich ist die Umwandlungseffizienz für gepulste (gütegeschaltete) oder modensynchronisierte Laser mit hohen Spitzenleistungen üblicherweise viel höher als für kontinuierliche Laser.

[0013] Unlängst wurde eine Umwandlungseffizienz (optisch-optisch) so hoch wie nahezu 60% erzielt. Dies wurde in einem doppelt resonanten SFG-Ring erreicht, der einen NLO-Kristall enthielt, und von zwei injektions-synchronisierten („injection locked“) Ringlasern gepumpt wurde. Dieses besonders vielversprechende Beispiel war eine Strahlungsquelle bei 589 nm für Laser-Guidestar-Anwendungen, die auf der SFG von zwei "Standard"-Wellenlängen für Nd:YAG-Laser (1064 nm und 1319 nm) basierte [J. C. Bienfang et al., Advanced Solid-State Photonics 2003, Paper PD6]. Ähnliche Effizienzen können für andere Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich und für einen zusätzlichen Frequenzumwandlungsschritt angestrebt werden.

[0014] OPOs haben das Potential, sogar noch vielseitiger als die oben diskutierten aufeinanderfolgenden Frequenzumwandlungsprozesse zu sein. Da jedoch ein weiterer Frequenzumwandlungsschritt notwendig ist (bereits zwei Schritte erforderlich, um den UV-Bereich zu erreichen, um den OPO zu "pumpen"), würden die Effizienz und die Leistung deutlich weiter reduziert werden.

[0015] Die Offenlegungsschrift US 2002/0126715 A1 schlägt vor, die fünfte Harmonische (5 HG) eines bei 1047 nm arbeitenden Nd:YLF-Lasers für die SFG mit einem Laser bei etwa 1305 nm zu benutzen, um einen Ausgangsstrahl bei etwa 180 nm zu erzeugen. Jedoch ist die Effizienz eines solchen komplexen aufeinanderfolgenden NLO-Prozesses zu gering für Anwendungen im kontinuierlichen Betrieb (Insgesamt zwei SFG-Schritte und zwei SHG-Schritte sind involviert, da die 5 HG auf der vorherigen Erzeugung der vierten Harmonischen beruht.).

[0016] Die Erzeugung der vierten Harmonischen (4 HG) durch aufeinanderfolgende Frequenzverdopplung wird auch Vervierfachung genannt. Vervierfachte 1064-nm Strahlung bei 266 nm wird in diodengepumpten Festkörperlasern (DPSSL) genutzt, die zum Schreiben von FBG angewandt werden. Beispiele für Produkte sind der „Millennia UV“ von Spectra Physics Lasers und der „AZURE“ von Coherent, Inc. Jedoch sind diese Systeme Lasern bei 242 nm unterlegen, da die Leistungswerte oder Belichtungszeiten für die FBG-Produktion bei 266 nm um Größenordnungen höher als die am Absorptionsspitzenwert bei 242 nm sein müssen. Der Absorptionskoeffizient bei 242 nm ist mehr als 10 mal größer als der bei 266 nm. Es ist erwähnenswert, dass der externe resonante Verdopplungsschritt (SHG zu 4 HG) im Falle des „Millennia UV“ für Multimodelaser erfolgt. Selbständige Einheiten zur Durchführung der externen resonanten Frequenzverdopplung bei Multimode-

lasern, die auf dem „DeltaTrain“-Konzept basieren, werden ebenfalls von Spectra Physics Lasers angeboten. Die Frequenzverdopplung von Einmodenlasern (longitudinalen Einmodenlaser – SLM-Laser – vom englischen „Single Longitudinal Mode Laser“) ist sogar noch besser etabliert.

[0017] In den vergangenen Jahren hat es einen deutlichen Fortschritt bei Lasern gegeben, die auf sogenannten Quasi-Drei-Niveau-Übergängen arbeiten. Beispiele sind die Übergänge bei 946 nm in Nd:YAG und bei 914 nm in Nd:YVO₄. Effektives Lasern auf diesen Quasi-Drei-Niveau-Übergängen ist beträchtlich schwieriger zu erzielen als auf dem starken Übergang jenseits von 1 µm. Laser auf diesen Quasi-Drei-Niveau-Übergängen haben jedoch beträchtliches Interesse und Forschungsanstrengungen auf sich gezogen, da sie die Erzeugung von blauem Licht durch Frequenzverdopplung ermöglichen. Solch eine leuchtstarke kohärente blaue Lichtquelle ist für viele Anwendungen wie Display-Anwendungen, Unter-Wasser-Anwendungen und für Anwendungen in Life Sciences erforderlich.

[0018] In EP 0 943 167 B1 werden verschiedene Resonatoranordnungen für eine effiziente resonatorinterne Frequenzverdopplung von Laserstrahlung vorgestellt. Die Konzepte finden sowohl für Vier-Niveau-Übergänge als auch für Quasi-Drei-Niveau-Übergänge Anwendung, wobei der Schwerpunkt auf Quasi-Drei-Niveau-Übergängen und der dadurch ermöglichten Erzeugung von blauem Licht bei z. B. 457 nm durch die Verdopplung von 914 nm liegt.

[0019] In der US 6304584 B1 wird die Erzeugung blauer Laserstrahlung durch die Ausnutzung von speziellen Übergängen in Yb-dotierten Materialien angesprochen. Die üblicherweise verwendeten Yb-dotierten Materialien und Übergänge generieren IR-Strahlung im Bereich von etwa 1000 nm und 1100 nm, die durch Frequenzverdopplung in Strahlung im grünen Spektralbereich umgewandelt werden kann. Die in der genannten Patentschrift diskutierten speziellen Übergänge in Yb-dotierten Materialien emittieren bei etwa 986 nm (+/-6 nm) mit resultierender Laserstrahlung im blauen Spektralbereich zwischen etwa 490 nm und 496 nm.

[0020] Die US 2002/0126715 A1 schlägt die Anwendung der 4 HG eines bei 946 nm arbeitenden Nd:YAG-Lasers zum Schreiben von FBG vor. Ein Laser bei dieser Wellenlänge von 236,5 nm ist eine recht gute Lösung im Vergleich zu bei 266 nm arbeitenden DPSSL, da der Absorptionskoeffizient bei dieser Wellenlänge nahezu 10 mal größer ist. Aber ein bei 236,5 nm arbeitender Laser ist weiterhin einem beim Absorptionsspitzenwert für Gedotierte Quarzfasern bei 242 nm arbeitenden System klar unterlegen. Der erforderliche Leistungswert bei 236,5 nm (die Belichtungszeit) ist mehr als 10 mal größer als bei 242 nm, wenn das Schreiben im linearen Bereich der Photoempfindlichkeit bezüglich der Leistung (Belichtungszeit) betrachtet wird. Die US 2002/0126715 A1 schlägt einen gepulsten Laser vor und beschreibt bestimmte Ausführungsformen. Die Eignung der Wellenlänge von 236,5 nm für das Schreiben von FBG wurde klar so früh wie bereits 1999 durch W. A. Clarkson [W. A. Clarkson, "Diode pumped lasers – Latest developments". Vortrag auf "Optik + Elektronik" (26 Oktober 1999, Kista, Schweden) – Projektorfolien] hervorgehoben.

[0021] In der WO 02/103863 A1 wird die Summenfrequenzbildung der Strahlung von einem Vier-Niveau-Laser und von einem Quasi-Drei-Niveau-Laser zur Erzeugung kürzerer Wellenlängen beschrieben. Die resultierenden Wellenlängen bei z. B. 491 nm oder 488 nm ermöglichen in vielen Fällen den Einsatz dieser Laser als Ersatz für Gaslaser, z. B. Ar-Ionen-Laser. Wenn auch die Kombination von verschiedenen Materialien und Übergängen (jeweils ein Vier-Niveau und ein Quasi-Drei-Niveau-Übergang) eine gewisse Variation der resultierenden Wellenlänge im Sichtbaren zulässt, so ist eine Abstimmbarkeit nicht gegeben.

[0022] Die sogenannten „vibronischen“ Laser sind spezielle Festkörperlaser, die sich durch Durchstimmbarkeit auszeichnen. Ein prominentes Beispiel ist der Ti:Saphir-Laser, welcher zwischen etwa 670 nm und 1070 nm durchstimmbar sind, wobei das Maximum der Verstärkungskurve bei etwa 800 nm liegt. Aus der Literatur ist die Verwendung eines solchen abstimmbaren Ti:Saphir-Lasers in Kombination mit einem frequenzverdoppelten Nd-dotierten Laser für die Erzeugung von UV-Licht durch Summenfrequenzbildung bekannt (H. Schnitzler et al., Appl. Opt. 41 (2002) 7000–7005).

[0023] Keiner dieser bekannten Laser kann effizient einen Ausgangsstrahl mit einer hohen Strahlqualität bei einer Wellenlänge dicht bei 242 nm bereitstellen, der geeignet für eine FBG-Produktion und andere Anwendungen wäre.

[0024] Die Aufgabe besteht darin, Verfahren zur Erzeugung von kohärentem UV-Licht mit einer vorgegebenen Wellenlänge, z. B. bei etwa 242 nm zum Schreiben von Faser-Bragg-Gittern, durch Summenfrequenzbildung oder Frequenzverdopplung von Laserstrahlen vorzuschlagen, wobei die Grundwellenlaser-Strahlen von her-

kömmlichen IR-Lasern erzeugt werden. Es werden Vorrichtungen angegeben, mit denen die erfindungsgemäßen Verfahren realisierbar sind.

[0025] Die vorliegende Erfindung stellt Verfahren und Vorrichtungen zur effizienten Erzeugung von kohärentem ultraviolettem Licht zur Verfügung. Das UV Licht wird durch Summenfrequenzbildung von Wellenlängen, die durch Erzeugung der zweiten Harmonischen entstanden sind (SHG + SFG), oder durch die Verdopplung von Wellenlängen, die von vorheriger Summenfrequenzbildung herkommen (SFG + SHG), erzeugt.

[0026] Die Nutzung der Vielzahl von existierenden Laserwellenlängen in üblichen Lasermaterialien erzeugt zahlreiche diskrete Wellenlängen im UV. Das Resultat ist im Prinzip ein „quasi-durchstimmbarer“ Laser, nur durch praktische Gesichtspunkte eingeschränkt. Um einen wirklich durchstimmbaren Laser zu ermöglichen, ist zumindest einer der für die SFG genutzten Laser ein einfacher durchstimmbarer Laser wie ein Yb:YAG-Laser (oder frequenzverdoppelter Yb:YAG-Laser), d. h., zumindest einer der IR-Laser ist ein einfacher durchstimmbarer Laser. „Einfach“ bedeutet direkt diodengepumpt im Gegensatz zu z. B. Ti:Saphir-Lasern, die Ionen-Laser oder frequenzverdoppelte DPSSL als Pumpquelle erfordern.

[0027] Die Erfindung betrifft kontinuierliche Laser, gepulste (gütegeschaltete) Laser und modensynchronisierte Laser. Für einige Anwendungen wie das Schreiben von FBG ist ein cw-Laser, für andere wie das Bohren von Löchern ein gepulster Laser mit hoher Spitzenleistung vorteilhaft. In anderen Fällen ist ein modensynchronisierter Laser die beste Alternative. Modensynchronisierte ermöglichen kurze Impulse und hohe Umwandlungseffizienzen bei den einbezogenen NLO-Prozessen mit gleichzeitig reduziertem Beschädigungsrisiko aufgrund der geringeren Impulsenergie im Vergleich zu gepulsten Laser.

[0028] Ein spezifischer „Teil“ der Erfindung stellt ein All-Festkörper-UV-Laser-System, das bei 242 nm arbeitet, zur Verfügung. Ein solches Lasersystem, bevorzugt ein kontinuierliches, ist einfach die beste Wahl für ein Lasersystem für das Schreiben von Faser-Bragg-Gittern, insbesondere in Ge-dotierten Quarzglasfasern.

[0029] [Fig. 1](#) zeigt die Wellenlängenabhängigkeit der Absorption in Ge-dotierten Quarzglasfasern.

[0030] [Fig. 2](#) zeigt die möglichen Kombinationen von Wellenlängen, um 242 nm und 484 nm durch Summenfrequenzbildung zu erreichen. Die Erzeugung von kohärentem Licht bei 484 nm resultiert in 242-nm-Licht nach Frequenzverdopplung. Viele der Vielzahl der „interessanten“ Wellenlängen werden durch Gaslaser wie z. B. Ar-Ionen-Laser abgedeckt oder könnten durch (frequenzverdoppelte) Ti:Saphir-Laser erreicht werden. Jedoch war eine der Zielsetzungen der vorliegenden Erfindung das Vermeiden der energieverbrauchenden Ionen-Lasersysteme oder der komplexen Ti:Saphir-Laser, die Ionen-Laser oder frequenzverdoppelte DPSSL als Pumpquelle benötigen. Diese Laser sind einfach zu komplex für die angestrebte kompakte Lösung für praktische Anwendungen.

[0031] Eine bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung umfaßt zwei frequenzverdoppelte Festkörperlaser, die bei etwa 457 nm und bei 514,5 nm emittieren, und einen optisch nichtlinearen Kristall für die Summenfrequenzbildung zu einem ultraviolettem Ausgangsstrahl, der eine Wellenlänge von etwa 242 nm hat.

[0032] In einer anderen Ausführung werden die Grundwellen der obigen Laser bei etwa 914 nm und 1029 nm erst in einer Summenfrequenzanordnung gemischt, was in Laserbetrieb im blauen Spektralbereich bei etwa 484 nm resultiert, bevor die endgültige Erzeugung der zweiten Harmonischen erfolgt.

[0033] In einer bevorzugten Ausgestaltung sind die „Basis“-IR-Laser (Grundwellenlaser) ein bei 914 nm arbeitender Nd:YVO₄-Laser (SHG bei 457 nm) und ein Yb:YAG-Laser, der bei 1029 nm arbeitet. Die Wellenlänge von 914 nm ist die „natürliche“ Wellenlänge eines Grundzustands-Nd:YVO₄-Lasers. Die 1029-nm-Wellenlänge kann durch Durchstimmen des Yb:YAG-Lasers, z. B. durch Einfügen eines Doppelbrechungsfilters, erreicht werden.

[0034] Die SHG-Wellenlängen in der blauen und grünen Spektralregion werden aus Effizienzgründen bevorzugt resonatorintern oder extern resonant erzeugt.

[0035] Die Grundwellenlaser sind vorzugsweise Scheibenlaser. Das Scheibenlaserkonzept ist im Vergleich zu endgepumpten DPSSL aufgrund der signifikant reduzierten thermischen Probleme überlegen [A. Giesen et al., Appl. Phys. B58 (1994) 365–372]. Der Hauptnachteil von Faserlasern in diesem Kontext ist, daß sie keine effiziente resonatorinterne SHG oder resonante externe SHG zulassen.

[0036] Mit realistischen Effizienzen für die SFG ist es kein Problem, einen Leistungsbereich von etwa 100 mW bei 242 nm zu erreichen, was ausreichend für das Schreiben von FBG im industriellen Maßstab ist. Die erforderlichen Leistungswerte im Blauen und grünen sind deutlich geringer als die bereits erzielten Leistungswerte. Werte in jüngsten Datenblättern für Scheibenlaser sind 800 mW im Blauen bei 457 nm (Nd:YVO₄) [Jen Las. D2-APUS – JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH, 2003] und > 10 W im Grünen bei etwa 514 nm (Yb:YAG) [VersaDisk-515 – Datenblatt, ELS Elektronik Laser System GmbH, 2003]. Die Leistungen, die im longitudinalen Einmodenbetrieb erzielt wurden, sind etwa 500 mW im Blauen bei 457 nm (Nd:YVO₄) [Persönliche Mitteilung auf der LASER 2003, München] und > 10 W im Grünen bei etwa 514 nm (Yb:YAG) [VersaDisk-515 – Datenblatt, ELS Elektronik Laser System GmbH, 2003]. Durch Anwendung von doppelt resonanter Summenfrequenzerzeugung ist eine Leistung von etwa 500 mW bei 242 nm erzielbar, nur durch die verfügbare Leistung im Blauen beschränkt.

[0037] Eine andere Vorrichtung, die auf eine Wellenlänge von etwa 242 nm für das Schreiben von FBG abzielt, nutzt Summenfrequenzbildung von frequenzverdoppelten Festkörperlasern, die bei 523,5 nm und 451,5 nm arbeiten, um einen Ausgang von 242,4 nm zu erzielen. Die betreffenden „Basis“-IR-Laser sind ein Nd:YLF-Laser, der bei 1047 nm arbeitet, und ein bei 903 nm arbeitender Nd:YLF-Laser.

[0038] In einer anderen Ausführung werden die Grundwellen obiger Laser bei etwa 1047 nm und 903 nm erst in einer Summenfrequenzanordnung gemischt, was in Laserbetrieb im blauen Spektralbereich bei etwa 484,8 nm resultiert, bevor die endgültige Bildung der zweiten Harmonischen erfolgt.

[0039] Andere Ausführungsbeispiele verwenden einen bei 908 nm arbeitenden Nd:YLF-Laser und einen mittels Doppelbrechungsfilters durchgestimmten Yb:YAG-Laser, der bei 1036 nm arbeitet. Durch Summenfrequenzbildung der Wellenlängen der zweiten Harmonischen (bei 454 nm und 518 nm) oder durch Verdopplung der 484 nm, die aus der vorhergehenden Summenfrequenzbildung resultiert, wird kohärentes UV-Licht bei etwa 242,2 nm erhalten.

[0040] Die letztere Ausführung ist nur ein Beispiel für Ausführungen, die auf einem Nd-dotierten Laser, der auf Quasi-Drei-Niveau-Übergängen im Bereich zwischen etwa 903 nm und etwa 915 nm arbeitet, und einem Yb:YAG-Laser, der auf eine passende Wellenlänge abgestimmt ist, beruhen. Der notwendige Durchstimmbereich zwischen etwa 1043 nm und 1027 nm, um 242 nm zu erhalten, ist gut abgedeckt durch diesen Lasertyp. Die spezifische feste Wellenlänge des Nd-dotierten Lasers wird durch das Wirtsmaterial bestimmt. Für die früher erwähnten Materialien sind diese Wellenlängen etwa 914 nm (π -Polarisation) und 915 nm (σ -Polarisation) in Nd:YVO₄ und 903 nm (π) und 908 nm (σ) in Nd:YLF. Übergänge mit ähnlichen Wellenlängen existieren in anderen Wirtsmaterialien. Beispiele sind Nd:GdVO₄ mit Übergängen bei etwa 912 nm (π , σ) und Nd:LiLu₄, das bei etwa 905 nm (π) und etwa 910 nm (σ) arbeitet.

[0041] Die Wellenlängen der Vier-Niveau-Übergänge in den genannten aktiven Materialien betragen in Nd:YLF 1047 nm (π) und 1054 nm (σ), in Nd:LiLu₄ 1047 nm (π) und 1053 nm (σ), 1063 nm in Nd:GdVO₄ – und 1064 nm in Nd:YAG und in Nd:YVO₄. Berücksichtigt man noch andere Materialien wie z. B. Nd:YAlO₃, mit einem Vier-Niveau Übergang bei 1080 nm, so kann man unter Ausnutzung der bekannten Wellenlängen in diesen Materialien zwischen 903 nm und 1080 nm in aufeinanderfolgenden Frequenzumwandlungs-Anordnungen zahlreiche diskrete Wellenlängen zwischen etwa 226 nm und 270 nm in erzielen. Da hier ausschließlich die „natürlichen“ Wellenlängen der Quasi-Drei-Niveau-Übergänge bzw. Vier-Niveau-Übergänge ausgenutzt werden, sind keine Elemente zum Durchstimmen erforderlich.

[0042] Von besonderem Interesse sind Kombinationen, bei denen die Lasermaterialien mit einer gemeinsamen Pumpwellenlänge angeregt werden können. Beispiele hierfür unter den bereits genannten Laserkristallen sind Nd:YAG, Nd:GdVO₄ und Nd:YVO₄, deren Anregung bei etwa 808 nm erfolgt. Dies bietet die Möglichkeit, anstelle von zwei separaten Pumplichtquellen eine einzige Pumpquelle zu nutzen, und so die Kosten und Komplexität weiter zu verringern.

[0043] Unter Nutzung der Lasermaterialien Nd:GdVO₄, Nd:YVO₄ und Nd:YAG läßt sich in aufeinanderfolgenden Frequenzumwandlungsschritten auf der Basis jeweils eines Quasi-Drei-Niveau-Lasers (im Wellenlängenbereich von etwa 912 nm bis etwa 915 nm) und eines Vier-Niveau-Lasers (mit einer Wellenlänge von etwa 1063 nm oder 1064 nm) kohärentes UV-Licht mit einer Wellenlänge von etwa 245 nm bis etwa 246 nm erzeugen, die sehr dicht am Optimum zum Schreiben von FBG liegt. Die für die Kombination gewählten Lasermaterialien müssen nicht notwendigerweise gleich sein.

[0044] Eine besonders vielversprechende Variante ist die Verwendung eines Grundzustands-Nd:YVO₄-Lasers (Quasi-Drei-Niveau) und eines gewöhnlichen Vier-Niveau-Nd:YVO₄-Lasers. Die Wellenlängen von etwa 914 nm und 1064 nm resultieren nach aufeinanderfolgenden Frequenzumwandlungsschritten in einer Wellenlänge von etwa 246 nm. Mit nur einem Lasermaterial und nur einer Pumpwellenlänge (einer Pumplichtquelle) läßt sich so kohärentes UV-Licht mit einer Wellenlänge, die sehr dicht am Optimum zum Schreiben von FBG liegt, erzeugen. Als Grundwellenlaser sind vorzugsweise Scheibenlaser einsetzbar; vor allem für den 914-nm-Laser.

[0045] Bei Wahl von Nd:GdVO₄ als Lasermaterial resultieren die entsprechenden Wellenlängen von etwa 912 nm (Quasi-Drei-Niveau) und 1063 nm (Vier-Niveau) in einer für das Schreiben von FBG noch etwas günstigeren Wellenlänge von etwa 245 nm.

[0046] Die Anwendung eines durchstimmbaren Yb:YAG-Lasers in Kombination mit einem üblichen Nd-dotierten Laser für aufeinanderfolgende Frequenzumwandlung (SHG + SFG) oder (SFG + SHG) ermöglicht UV-Licht-Erzeugung in einem weiten Wellenlängenbereich. Im Kontext einer UV-Quelle zum Schreiben von FBG sind Nd-dotierte Laser, die auf Quasi-Drei-Niveau-Übergängen zwischen etwa 903 nm und 915 nm arbeiten, von besonderem Interesse. Zum Beispiel ergibt das Anwenden von (SHG + SFG) oder (SFG + SHG) auf einen bei 914 nm arbeitenden Nd:YVO₄-Laser und einen bei 1047 nm emittierenden Yb:YAG-Laser in 244-nm-Strahlung. Da diese Wellenlänge gegenwärtig die bevorzugte Arbeitswellenlänge zum Schreiben von FBG ist, ist ein All-Festkörperlaser-System bei dieser Wellenlänge sehr attraktiv.

[0047] Durchstimmbare Yb-dotierte Laser sind nicht auf Yb:YAG-Laser beschränkt. Jüngst wurde ein gewaltiger Fortschritt bezüglich anderer Wirtsmaterialien erzielt, die bei Yb-Dotierung ein breites Emissionsband aufweisen (meistens für die Erzeugung ultrakurzer Impulse genutzt). Diese Materialien umfassen, ohne darauf beschränkt zu sein, Yb:KYW und Yb:CS-FAP.

[0048] Es gibt weitere durchstimmbare Laser, insbesondere sogenannte „vibronische“ Laser. Die stimulierte Emission von Photonen ist innig mit der Emission von Phononen in einem Kristallgitter verknüpft. Obwohl die Gesamtenergie des Laserübergangs festgelegt ist, kann die Energie zwischen Photonen und Phononen in einer kontinuierlichen Art und Weise aufgeteilt werden, wobei Durchstimbarkeit erzielt wird. Prominente Beispiele sind Alexandrit-Laser mit einer Wellenlänge zwischen etwa 700 nm und 820 nm, Cr:LiSAF-Laser mit einem typischen Durchstimmbereich zwischen etwa 780 nm und 950 nm und Ti:Saphir-Laser, welche zwischen etwa 670 nm und 1070 nm durchstimmbare sind, wobei das Maximum der Verstärkungskurve bei etwa 800 nm liegt. Die Verwendung eines solchen abstimmbaren Lasers in Kombination mit einem üblichen Nd-dotierten Laser für aufeinanderfolgende Frequenzumwandlung (SHG + SFG) oder (SFG + SHG) ermöglicht die Erzeugung von UV-Licht in einem extrem breiten Wellenlängenbereich.

[0049] Für die nichtlinearen optischen Prozesse ist es erforderlich, daß die Phasen der wechselwirkenden Wellen angepaßt sind. Periodisch gepolte Kristalle haben anders als konventionelle Kristalle den unikal Vorteil, daß sie so gestaltet werden können, daß sie für jede nichtlinear-optische Wechselwirkung im Transparenzbereich phasenangepaßt sind. Darüber hinaus weisen sie große nichtlineare Koeffizienten auf, was verbesserte Effizienz ermöglicht. Sie können für alle oben diskutierten nichtlinearen Prozesse ausgenutzt werden; sie sind aber von besonderem Vorteil für den zweiten (letzten) Schritt, d. h. SFG von SHG-Wellenlängen für (SHG + SFG) oder Verdopplung einer Wellenlänge, die aus vorheriger Summenfrequenzbildung resultiert (SFG + SHG).

[0050] Die SHG von infraroten Wellenlängen im Fall von (SHG + SFG) ist keine besondere Herausforderung. Die SHG-Wellenlängen werden aus Gründen der Effizienz bevorzugt resonatorintern bzw. extern resonant erzeugt. Abgesehen von periodisch gepolten (quasi-phasenangepaßten) Kristallen wie periodisch gepoltem KTP (PPKTP) oder periodisch gepoltem LiNbO₃ (PPLN) gibt es verschiedene Volumen-Kristalle, die für diese Anwendung der Erzeugung von sichtbarem Licht hoher Leistung erprobt sind. Beispiele sind KTP (für die Erzeugung von grünem Licht), LiNbO₃, LBO, BBO und BiBO. Diese Volumenkristalle und periodisch gepolten Kristalle sind ebenfalls für die Erzeugung von sichtbarem Licht durch Summenfrequenzbildung aus zwei IR-Wellenlängen geeignet.

[0051] Summenfrequenzbildung von Wellenlängen der zweiten Harmonischen (SHG + SFG) oder die Verdopplung einer Wellenlänge, die aus vorhergehender Summenfrequenzbildung resultiert (SFG + SHG), bewerkstelligt die endgültige Erzeugung von UV-Licht. Dieser zweite Schritt ist eine anspruchsvolle Aufgabe, besonders in Hinblick auf Leistung und Effizienz. Die prominenten periodisch gepolten (quasi-phasenange-

paßten) Kristalle PPKTP und PPLN sind nicht anwendbar, da ihre Transparenz unterhalb von etwa $0,35 \mu\text{m}$ (PPKTP) oder $0,4 \mu\text{m}$ (PPLN) nur unzureichend ist.

[0052] Geeignete NLO-Kristalle sind LBO, BBO, BiBO und CLBO. Sie werden bevorzugt in einer für Temperaturabstimmung oder nichtkritische Phasenanpassung (NCPM) geeigneten Weise geschnitten und angeordnet, um hohe Konversionseffizienz zu erzielen.

[0053] Wir müssen zwischen den geeigneten Resonatoren für die unterschiedlichen Betriebsregime gepulst (gütegeschaltet), modensynchronisiert und kontinuierlich unterscheiden. Für die letztgenannten ist der Spezialfall des Einmodenbetriebs, d. h. Betrieb auf einer einzigen longitudinalen Mode, von besonderer Bedeutung. Die verschiedenen Schemata für den SFG-Schritt wie z. B. externe nicht-resonante SFG, einfach resonante SFG, doppelt resonante resonatorinterne SFG und doppelt resonante externe SFG sind vom Stand der Technik bekannt. Jedoch ist die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch SFG von SHG-Wellenlängen (SHG + SFG) oder die Verdopplung von aus SFG resultierenden Wellenlängen (SFG + SHG) auf den spezifisch beschriebenen Wegen neu.

[0054] Die Erfindung wird nachstehend an Hand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Dabei zeigen die Figuren:

[0055] **Fig. 1** Darstellung der Wellenlängenabhängigkeit der Absorption in Ge-dotierten Quarzglasfasern und die Absorption für ausgewählte Wellenlängen, die gegenwärtig zum Schreiben von FBG genutzt werden

[0056] **Fig. 2** zeigt die möglichen Kombinationen von Wellenlängen, um 242 nm und 484 nm durch Summenfrequenzbildung zu erreichen

[0057] **Fig. 3** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch externe nicht-resonante SFG von SHG-Wellenlängen (SHG + SFG)

[0058] **Fig. 4** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch Verdopplung von Wellenlängen, die aus externer nicht-resonanter SFG resultieren (SFG + SHG)

[0059] **Fig. 5** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch die Verdopplung einer Wellenlänge, die aus SR resonatorinterner SFG resultiert (SFG + SHG)

[0060] **Fig. 6** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch Verdopplung einer Wellenlänge, die aus SR resonatorinterner SFG resultiert (SFG + SHG), wobei als Besonderheit ein gemeinsamer Spiegel für die beiden zu mischenden Laser auf dem NLK angeordnet ist, um eine gute Modenüberlagerung in dem NLK zu erreichen

[0061] **Fig. 7** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch die Verdopplung einer Wellenlänge, die aus doppelt resonanter (DR) resonatorinterner SFG resultiert (SFG + SHG)

[0062] **Fig. 8** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch doppelt resonante (DR) SFG aus SHG-Wellenlängen (SHG + SFG) in einem externen Resonator

[0063] **Fig. 9** zeigt die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch externe resonante Verdopplung einer Wellenlänge, die aus doppelt resonanter (DR) SFG in einem externen Resonator resultiert (SFG + SHG).

- Resonatoren für gütegeschaltete und modensynchronisierte Laser mit ihren hohen Spitzenintensitäten ermöglichen hinreichend effiziente externe nicht-resonante Frequenzumwandlungs-Schemata.

[0064] **Fig. 3** illustriert die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch externe nicht-resonante SFG von SHG-Wellenlängen (SHG + SFG). Die Abbildung zeigt eine Situation, in welcher die SHG ebenfalls extern nicht-resonant erfolgt. Jedoch ist auch resonatorinterne SHG im Sinne der Erfindung.

[0065] **Fig. 4** illustriert die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch Verdopplung von Wellenlängen, die aus externer nicht-resonanter SFG resultieren (SFG + SHG).

[0066] Diese externen nicht-resonanten Frequenzumwandlungs-Schemata bestechen durch ihre inhärente Einfachheit und die ausgezeichnete Strahlqualität, die erreicht werden kann. Im cw-Betrieb würden sie das sogenannte „green problem“ vermeiden und dadurch einen nahezu rauschfreien Ausgang liefern. Leider können

aufgrund der Beschränkungen in der Leistung der Grundwelle auf diesem Wege nur sehr geringe Umwandlungseffizienzen und vergleichsweise geringe Ausgangsleistungen erreicht werden.

- Die folgenden Schemata oder prinzipiellen Ausführungen konzentrieren sich auf die kontinuierliche Erzeugung von kohärentem UV-Licht.

[0067] Der erste Ansatz in Richtung von cw-SFG mit höherer Leistung ist einfach resonante (SR) resonatorinterne SFG. In diesem Aufbau ist der NLK innerhalb eines der Resonatoren angeordnet (im weiteren: der Intracavity-Laser), während Strahlung vom zweiten Laser („Seed-Laser“) in den NLK von außen mittels Einfachdurchlaufs eingespeist wird. Dieses Design vermeidet die Komplikationen, die auftreten, wenn zwei Laser innerhalb eines einzigen Laserresonators arbeiten müssen, wie bei DR SFG zu beobachten. Beide Laser können unabhängig voneinander hinsichtlich höchster Stabilität und maximaler Ausgangsleistung justiert werden. Da der NLK nur innerhalb eines Laserresonators angeordnet ist, weist der andere Laser geringere interne lineare Verluste und keinen nichtlinearen Verlust auf. Da weiterhin nur ein Laser über nichtlineare Verluste an den anderen gekoppelt ist, ist der zweite nicht beeinflusst. Leider ist der Vorteil des Nutzens der resonatorinternen Leistung, die um Größenordnungen größer als die externen Leistungen ist, auf einen Laser beschränkt.

[0068] [Fig. 5](#) illustriert die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch die Verdopplung einer Wellenlänge, die aus SR resonatorinterner SFG (SFG + SHG) resultiert. Details wie eine fokussierende Linse zwischen Seed-Laser und Intracavity-Laser und Blenden sind nicht gezeigt. Aus Gründen der Effizienz und der UV-Ausgangsleistung ist die externe SHG-Einheit (Ext-SHG) vorzugsweise eine externe resonante.

[0069] Für die bisher diskutierte Ausgestaltung (Erzeugung von 242 nm durch SHG von etwa 484 nm, die aus SFG von ungefähr 914 nm und ungefähr 1029 nm resultiert, wobei die IR-Laser ein bei 914 nm arbeitender Nd:YVO₄-Laser und ein bei 1029 nm arbeitender Yb:YAG-Laser sind; der Yb:YAG-Laser abgestimmt durch z. B. ein eingesetztes doppelbrechendes Filter), würde der Seed-Laser vorzugsweise der bei 914 nm arbeitende Nd:YVO₄-Laser sein. Solch ein Laser ist viel schwieriger zu betreiben (hauptsächlich aufgrund des konkurrierenden viel stärkeren Übergangs bei 1064 nm) als der (abstimmbare) Yb:YAG-Laser, welcher keine konkurrierenden Linien hat. So profitiert das Betriebsverhalten (Leistung und Stabilität) des Nd:YVO₄-Lasers mehr davon, durch nichtlineare Verluste „ungestört“ zu sein.

[0070] [Fig. 6](#) zeigt eine andere Anordnung für die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch Verdopplung einer Wellenlänge, die aus SR resonatorinterner SFG resultiert (SFG + SHG). Diese Ausführung weist als Besonderheit einen gemeinsamen Spiegel für die beiden zu mischenden Laser auf, der auf dem NLK angeordnet ist, um eine gute Modenüberlagerung in dem NLK zu erreichen. Das ist normalerweise eine andere Herausforderung im Kontext der NLO-Prozesse neben der Phasenanpassung. Der Spiegel fungiert als teildurchlässiger Reflektor (Auskoppelspiegel) für den Seed-Laser und als hochreflektierender Spiegel für den Intracavity-Laser (und die SFG).

[0071] Ein anderes Konzept für SFG ist doppelt resonante (DR) resonatorinterne SHG. Bei diesem Ansatz findet die Mischung innerhalb beider Resonatoren statt. So sind hohe resonatorinterne Leistungen, die Größenordnungen höher als die externen Leistungen sind, verfügbar. Mit diesen hohen Leistungen sind höhere Umwandlungseffizienzen in die SFG und höhere Ausgangsleistungen erreichbar.

[0072] [Fig. 7](#) illustriert die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch die Verdopplung einer Wellenlänge, die aus doppelt resonanter (DR) resonatorinterner SFG resultiert (SFG + SHG). Der gemeinsame Teil des „Mixers“ wird durch den dichroitischen Strahlteiler, der antirefleksionsbeschichtet für $\lambda 1$ und hochreflektierend für $\lambda 2$ (beide Seiten) ist, sowie die den NLK „einschließenden“ gekrümmten Spiegel gebildet. Der NLK ist an der Position der Strahltaile angeordnet, um die erhöhten resonatorinternen Intensitäten im Fokus zu nutzen. Aus Gründen der Effizienz und der UV-Ausgangsleistung ist die externe SHG-Einheit (Ext-SHG) vorzugsweise eine externe resonante. Der Hauptnachteil der DR resonatorinternen SFG ist das als „green problem“ bekannte Rausch-Problem.

[0073] Das effektivste SFG-Schema ist die doppelt resonante (DR) in einem externen Resonator. Das Mischen erfordert linear polarisierte Einfrequenz-Laser, die injektions-synchronisiert („injection locked“) sind. Zusätzlich zur hohen Effizienz wird dieser Ansatz eines externen Resonators nicht von chaotischen Leistungsschwankungen „heimgesucht“, d. h., durch das „green problem“, das ein Problem für resonatorinterne Ansätze sein kann. Die externen optischen Resonatoren können als diskrete oder monolithische Resonatoren ausgebildet sein.

[0074] [Fig. 8](#) illustriert die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch doppelt resonante (DR) SFG aus SHG-Wellenlängen (SHG + SFG) in einem externen Resonator. In dieser Anordnung sind die Einfrequenzlaser

resonatorintern frequenzverdoppelte longitudinale Einmodenlaser. Die SFG wird gleichzeitig mit beiden Lasern durch die Pound-Drever-Hall-Technik resonant gemacht.

[0075] In einer anderen Ausführung werden zwei Einmodenlaser erst jeweils frequenzverdoppelt in einem externen resonanten Verdoppler und schließlich in einem DR externen Resonator gemischt (SHG + SFG).

[0076] Fig. 9 illustriert ein anderes Herangehen. Die zwei Einmoden-IR-Laser werden erst in einem DR externen Resonator gemischt, gefolgt von der abschließenden externen resonanten Verdopplung (SFG + SHG).

[0077] Während das beste Vorgehen zur Ausübung der Erfindung im Detail beschrieben wurde, wird der Fachkundige erkennen, daß unzählige alternative Designs, Ausführungen, Modifikationen und Anwendungsbeispiele existieren, die im Sinne der vorliegenden Erfindung sind. Entsprechend ist der Anwendungsbereich der Erfindung nicht auf die vorstehend genannten Ausführungsformen beschränkt.

Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

"Terminologie"

• IR-Laser 1,2	Grundwellenlaser 1,2
• SHG 1, 2	SHG von IR-Laser 1, 2
• LK 1, 2	"Laserkristall" 1, 2 (Lasermaterial 1, 2)
• PD 1, 2	Pumpdiode 1, 2
• λ 1, 2, SFG	λ von IR-Laser 1, 2, und von SFG
• S	Spiegel
• Ext-SHG	Externe SHG-Einheit
• DR-Ext-SFG	Doppelt resonante externe SFG-Einheit
• IC-SLM-SHG-1, 2	Resonatorintern frequenzverdoppelter SLM-Laser 1, 2
• IR-SLM-1, 2	IR-SLM-Laser 1, 2
• NLK	Geeigneter nichtlinear optischer Kristall
• DS	Dichroitischer Spiegel
• HR-Spiegel	Hochreflektierender Spiegel

[0078] Wiederholtes Vorkommen einer Bezeichnung wie z. B. "NLK" in einer Abbildung oder in verschiedenen Abbildungen bedeutet nicht notwendigerweise, daß ein identisches Element z. B. als nichtlinearer optischer Kristall verwendet wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung von kohärentem UV-Licht mit einer vorgegebenen Wellenlänge durch Summenfrequenzbildung oder Frequenzverdopplung von Laserstrahlen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Grundwellenlaser-Strahlen von zwei Quasi-Drei-Niveau-Lasern erzeugt werden, von denen mindestens einer durchstimmbare ist, die nacheinander in beliebiger Reihenfolge durch Summenfrequenzbildung und Frequenzverdopplung frequenzumgewandelt werden, so dass ein kohärenter Laserstrahl mit der gewünschten Wellenlänge erzeugt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gewünschte Wellenlänge durch Summenfrequenzbildung von Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich, die durch vorhergehende Frequenzverdopplung entstanden sind, erzeugt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gewünschte Wellenlänge durch die Frequenzverdopplung von Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich, die durch vorherige Summenfrequenzbildung entstanden sind, erzeugt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Laser zur Erzeugung der Grundwellenlaser-Strahlen entweder in kontinuierlichem, gütegeschaltetem oder modensynchronisiertem Betriebsregime arbeiten.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein All-Festkörperlaser-System bei etwa 242 nm zum Schreiben von Faser-Bragg-Gittern, vorzugsweise in kontinuierlichem Betrieb erreicht wird.
6. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erzeugen von UV-Licht bei etwa 242 nm die Summenfrequenzbildung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 457 nm und von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 514.5 nm ausgenutzt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass UV-Licht bei etwa 242 nm durch Summenfrequenzbildung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 454 nm und von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 518 nm erzeugt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erzeugen von UV-Licht bei etwa 242 nm die Frequenzverdopplung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 484 nm, das aus Summenfrequenzbildung von Licht mit einer Wellenlänge etwa 914 nm und von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 1029 nm resultiert, ausgenutzt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass UV-Licht bei etwa 242 nm durch Frequenzverdopplung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 484 nm, das aus der Summenfrequenzbildung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 908 nm und von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 1036 nm resultiert, erzeugt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass UV-Licht bei etwa 242 nm durch Summenfrequenzbildung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 523,5 nm und von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 451,5 nm erzeugt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass UV-Licht bei etwa 242 nm durch Frequenzverdopplung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 484 nm erzeugt wird, das aus der Summenfrequenzbildung von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 1047 nm und von Licht mit einer Wellenlänge von etwa 903 nm resultiert.
12. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass zum Erzeugen von Licht bei etwa 242 nm als IR-Laser ein Nd-dotierter Laser, der auf einem Quasi-Drei-Niveau-Übergang im Bereich zwischen etwa 903 nm und etwa 915 nm arbeitet, und ein Yb:YAG-Laser, der auf einer passenden Wellenlänge im Bereich zwischen etwa 1043 nm und 1027 nm abgestimmt ist, verwendet werden.
13. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass, als IR-Laser ein bei etwa 908 nm arbeitender Nd:YLF-Laser sowie ein bei etwa 1036 nm arbeitender Yb:YAG-Laser verwendet werden, wobei der Yb:YAG-Laser durch z. B. den Einsatz eines Doppelbrechungsfilters abgestimmt ist.
14. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erzeugen von UV-Strahlung in einem weiten Wellenlängenbereich als IR-Laser ein durchstimmbarer Yb:YAG-Laser, der den gesamten Durchstimmbereich weiter als zwischen etwa 1027 nm und etwa 1047 nm ausnutzt, sowie ein Nd-dotierter Laser, der auf Quasi-Drei-Niveau-Übergängen zwischen etwa 903 nm und 915 nm arbeitet, verwendet werden.
15. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erzeugen von UV-Strahlung in einem weiten Wellenlängenbereich als ein IR-Laser ein durchstimmbarer Yb-dotierter Laser genutzt wird, der andere Yb-dotierte Materialien als Yb:YAG, z. B. Yb:KYW oder Yb:CS-FAP, verwendet.
16. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass, zum Erzeugen von 244-nm-Strahlung für z. B. FBG-Schreiben als IR-Laser ein bei 1047 nm arbeitender Yb:YAG-Laser und ein bei 914 nm arbeitender Nd:YVO₄-Laser verwendet werden.
17. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass im kontinuierlichen Betrieb aus Effizienzgründen die Frequenzverdopplung der Wellenlängen vorzugsweise resonatorintern oder extern resonant vorgenommen wird.

18. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens einer der IR-Laser ein Scheibenlaser ist.
19. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass beide IR-Laser SLM-Laser sind.
20. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass, einer der nachfolgend genannten passenden Nd-dotierten Laser unter Nutzung unterschiedlicher Wirtsmaterialien zur Erzeugung eines der Grundwellenlaser-Strahlen verwendet wird: Nd:YVO₄ mit Übergängen bei etwa 914 nm (π -Polarisation) und 915 nm (σ -Polarisation), Nd:YLF betrieben bei etwa 903 nm (π) und 908 nm (σ), Nd:GdVO₄ mit Übergängen bei etwa 912 nm (π , σ), und Nd:LiLu₄ betrieben bei etwa 905 nm (π) und etwa 910 nm (σ).
21. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass periodisch gepolte Kristalle (quasi-phasenangepaßte Kristalle) wie PPKTP oder PPLN für alle NLO-Prozesse benutzt werden, welche besonders vorteilhaft für den zweiten (finalen) Schritt sind, d. h. die Summenfrequenzbildung von Frequenzverdopplung-Wellenlängen für (SHG + SFG) oder die Verdopplung einer Wellenlänge, die aus vorhergehender Summenfrequenzbildung resultiert (SFG + SHG).
22. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass einer der nachfolgend genannten Volumenkristalle für die Erzeugung von sichtbarem Licht durch Frequenzverdopplung oder Summenfrequenzbildung von IR-Lasern genutzt wird: KTP (nur für grün), LiNbO₃, LBO, BBO, BiBO.
23. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass einer der nachfolgend genannten Volumenkristalle für die Erzeugung von UV-Licht durch Summenfrequenzbildung (SHG + SFG) oder Frequenzverdopplung (SFG + SHG) benutzt wird: LBO, BBO, BiBO, CLBO.
24. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das kohärente UV-Licht durch externe nicht-resonante Summenfrequenzbildung von frequenzverdoppelten Wellenlängen erzeugt wird (SHG + SFG).
25. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das kohärente UV-Licht durch Verdopplung einer Wellenlänge, die aus externer nicht-resonanter Summenfrequenzbildung SFG resultiert, erzeugt wird (SFG + SHG).
26. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch Verdopplung einer Wellenlänge, die aus einfach resonanter (SR) resonatorinterner SFG resultiert, erfolgt (SFG + SHG).
27. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass als IR-Laser ein bei 914 nm arbeitender Nd:YVO₄-Laser und ein bei 1029 nm arbeitender Yb:YAG-Laser verwendet werden, wobei der Yb:YAG-Laser z. B. durch Einsatz eines Doppelbrechungsfilters abgestimmt ist.
28. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch Verdopplung einer Wellenlänge, die aus zuvor erfolgter doppelt resonanter (DR) resonatorinterner Summenfrequenzbildung resultiert, geschieht (SFG + SHG).
29. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass, die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch doppelt resonante (DR) Summenfrequenzmischung von frequenzverdoppelten Wellenlängen in einem externen Resonator erfolgt (SHG + SFG).
30. Vorrichtung nach Anspruch 26 und 27, dadurch gekennzeichnet, dass der bei 914 nm arbeitende Nd:YVO₄-Laser als Seed-Laser fungiert und der bei 1029 nm arbeitende Yb:YAG-Laser, der durch z. B. das Einfügen eines Doppelbrechungsfilters abgestimmt ist, als Intracavity-Laser fungiert.
31. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenzverdopplung extern nicht-resonant erfolgt.
32. Vorrichtung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenzverdopplung resonatorintern erfolgt.

33. Vorrichtung nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, dass, zum Erzeugen von kohärentem UV-Licht durch doppelt resonante (DR) Summenfrequenzmischung von frequenzverdoppelten Wellenlängen die Einfrequenzlaser resonatorintern frequenzverdoppelte longitudinale Einmodenlaser sind.

34. Vorrichtung nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, dass zum Erzeugen von kohärentem UV-Licht durch doppelt resonante (DR) Summenfrequenzbildung von frequenzverdoppelten Wellenlängen die beiden IR-Einfrequenzlaser erst jeweils in einem externen resonanten Verdoppler frequenzverdoppelt werden.

35. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Erzeugung von kohärentem UV-Licht durch externe resonante Verdopplung einer Wellenlänge, die aus doppelt resonanter (DR) Summenfrequenzmischung in einem externen Resonator resultiert, erfolgt (SFG + SHG).

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FigurenUV-Schreiben von Brechungsindexänderungenin photoempfindlichem Glas

Absorptionsmaximum bei 242 nm bei Ge-Dotierung

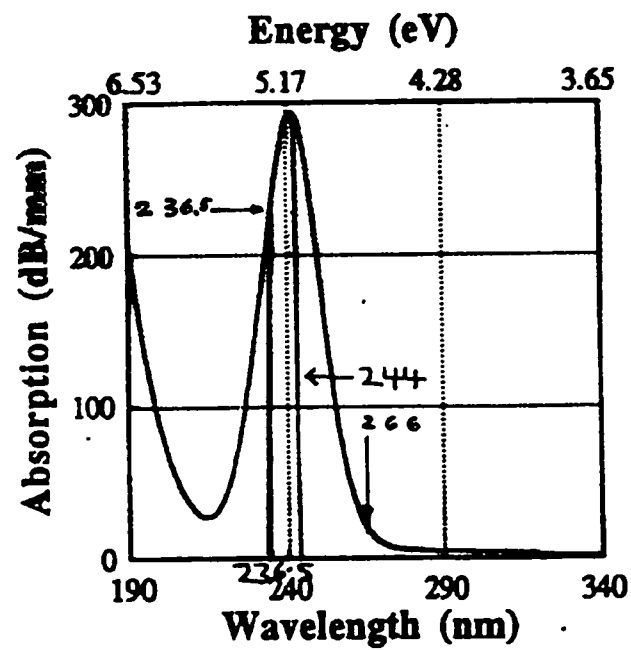


Fig. 1

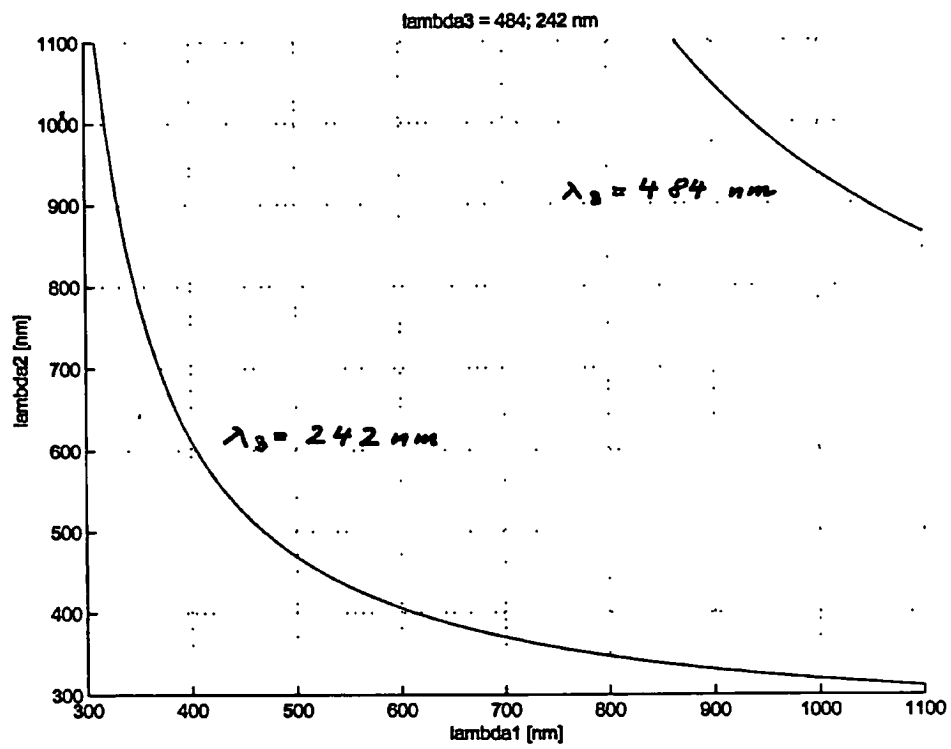


Fig. 2

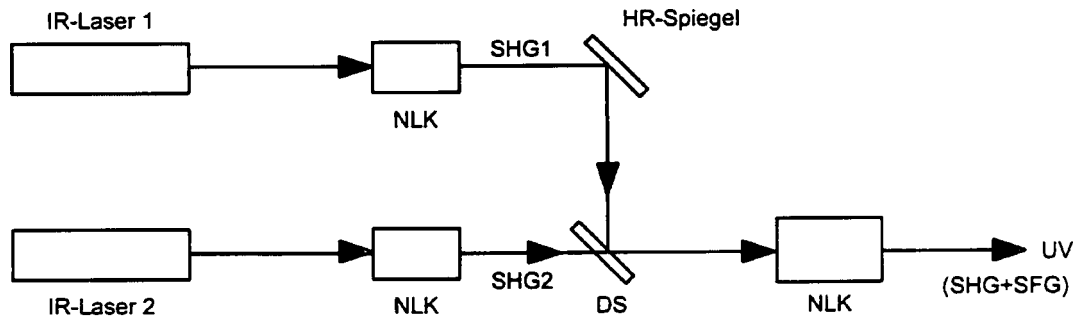


Fig. 3

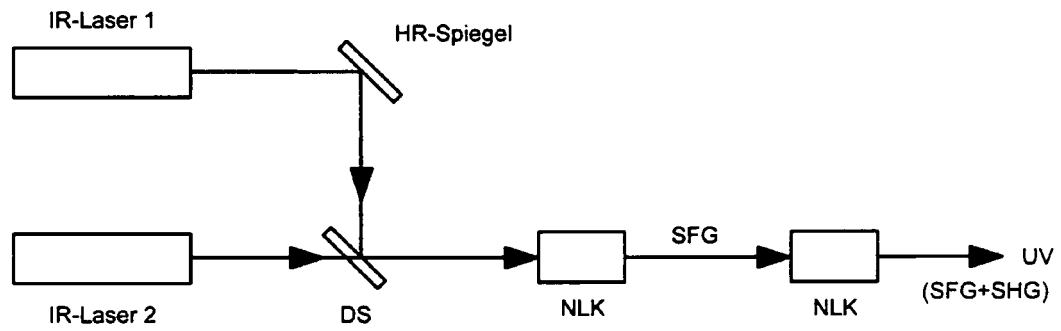


Fig. 4

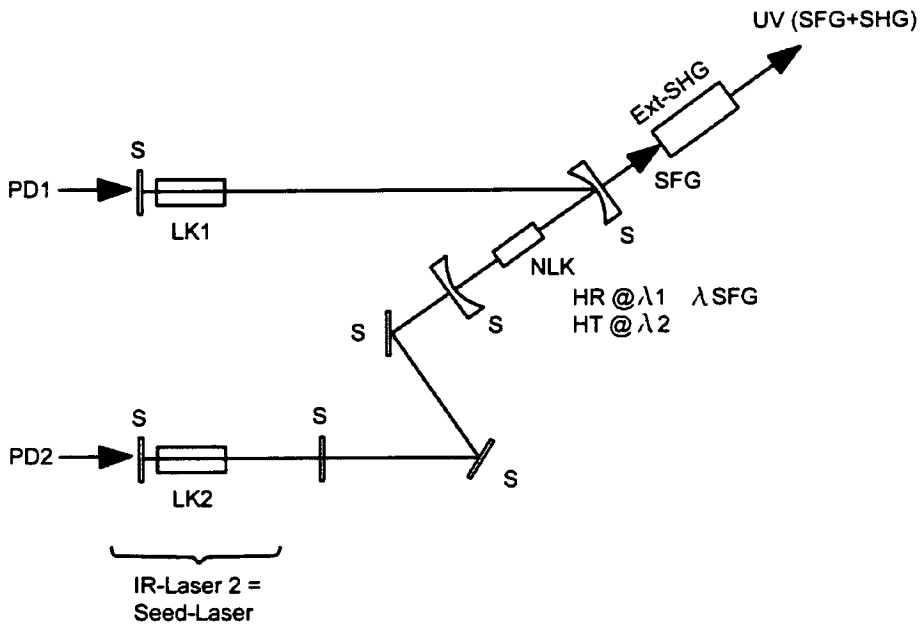


Fig. 5

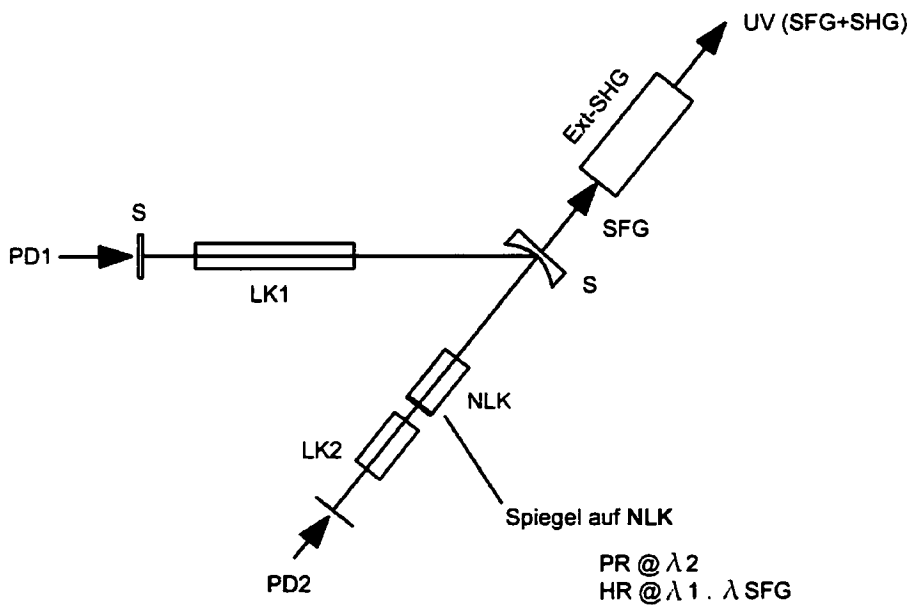


Fig. 6

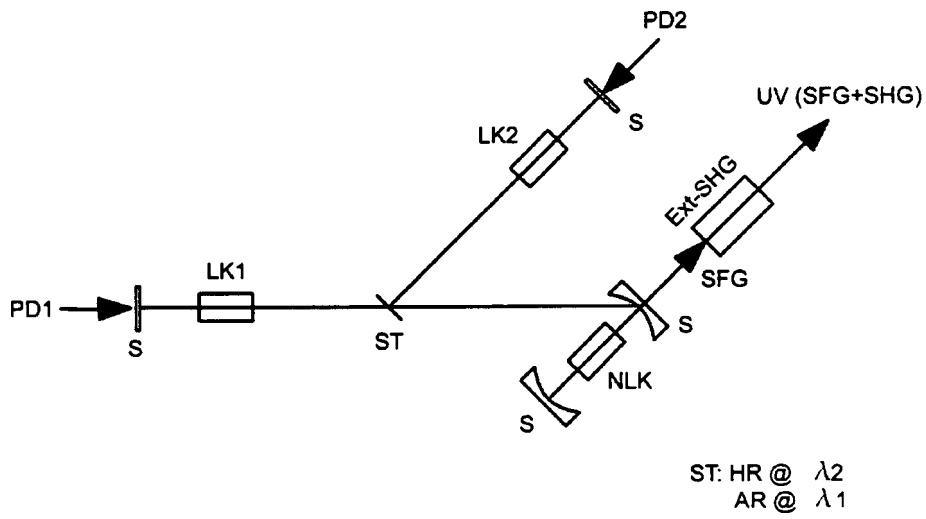


Fig. 7

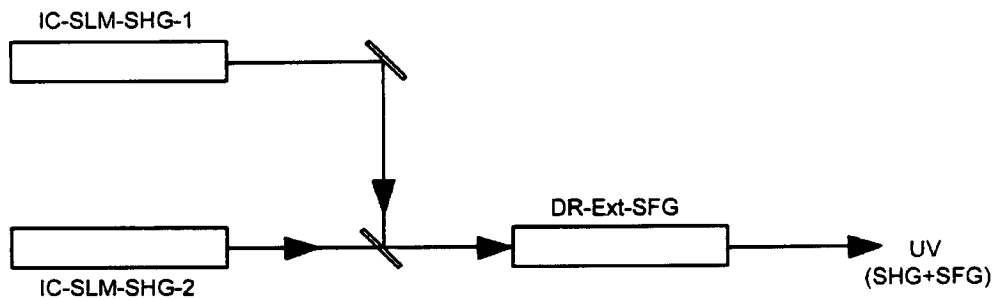


Fig. 8

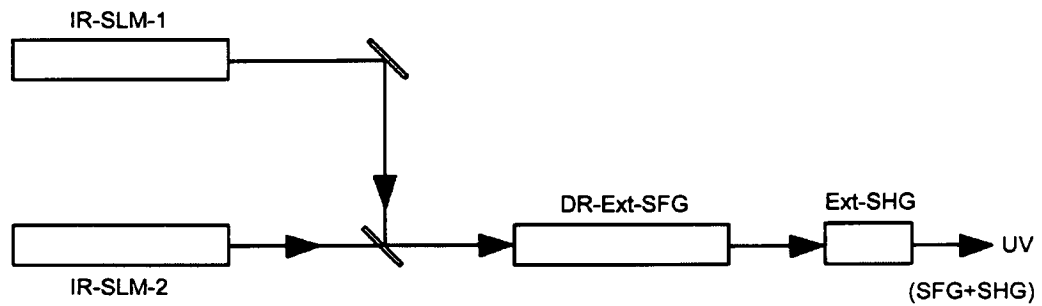


Fig. 9