



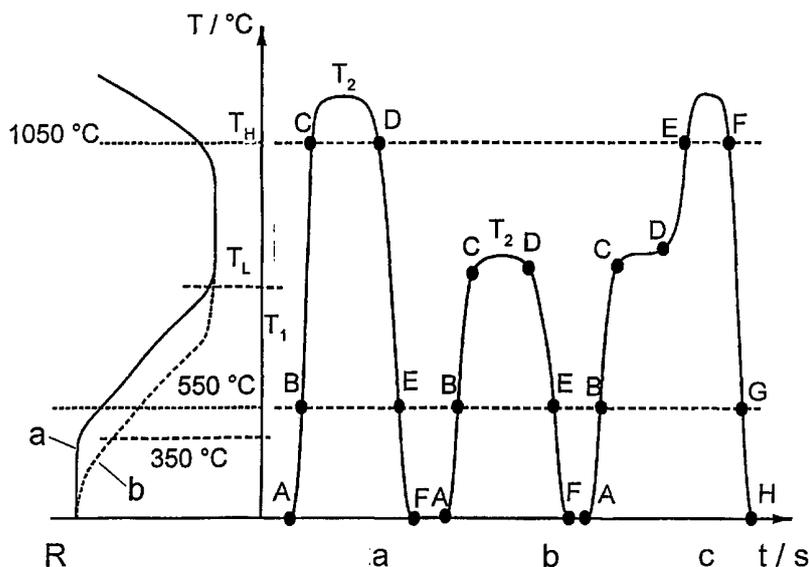
<p>(51) Internationale Patentklassifikation ⁷ : H01L 21/324, 21/477</p>	<p>A1</p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 00/68988 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 16. November 2000 (16.11.00)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP00/03666 (22) Internationales Anmeldedatum: 22. April 2000 (22.04.00) (30) Prioritätsdaten: 199 20 871.9 6. Mai 1999 (06.05.99) DE (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): STEAG RTP SYSTEMS GMBH [DE/DE]; Daimlerstrasse 10, D-89160 Dornstadt (DE). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): DRECHSLER, Martin [DE/DE]; Hintere Gerbergasse 17, D-87700 Memmingen (DE). PELZMANN, Arthur [DE/DE]; Karl-Danner-Strasse 1, D-89312 Günzburg (DE).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: JP, KR, SG, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Veröffentlicht Mit internationalem Recherchenbericht.</p>	

(54) Title: UV-SUPPORTED ACTIVATION OF A DOPING AGENT IN COMPOUND SEMICONDUCTORS BY MEANS OF RTP SYSTEMS

(54) Bezeichnung: UV-UNTERSTÜTZTE DOTIERSTOFFAKTIVIERUNG IN VERBINDUNGSHALBLEITERN MITTELS RTP-SYSTEMEN

(57) Abstract

A method for thermal treatment of at least one layer, preferably consisting of compound semiconductors, whereby hydrogen-passivated impurity atoms in said layer are activated. According to the inventive method, a layer is heated during a time period of less than 120 seconds to a temperature which is higher than the first temperature (T1) at which specific layer resistance decreases, whereby at least one layer is heated during the first time period to a second temperature (T2) which is higher than the first temperature for up to 60 seconds. Charge carriers are produced inside said layer during the course of the inventive method by means of electromagnetic radiation during at least one third time period. The method is particularly suitable of use in the activation of Mg acceptors in GaN.



(57) Zusammenfassung

Verfahren zur thermischen Behandlung von wenigstens einer Schicht, vorzugsweise bestehend aus Verbindungshalbleitern, zur Aktivierung von in der Schicht durch Wasserstoff passivierten Fremdatomen. Das Verfahren umfaßt das Erwärmen von wenigstens einer Schicht auf eine Temperatur höher als eine erste Temperatur, bei der der spezifische Schichtwiderstand abnimmt (T1) für ein erstes Zeitintervall kleiner als 120 sec, wobei innerhalb des ersten Zeitintervalls wenigstens eine Schicht auf eine zweite Temperatur (T2) höher als die erste Temperatur für ein zweites Zeitintervall von bis zu 60 sec erwärmt wird. Ferner werden während des Verfahrens in wenigstens einem dritten Zeitintervall durch elektromagnetische Strahlung innerhalb der Schicht Ladungsträger erzeugt. Das Verfahren ist besonders geeignet zur Aktivierung von Mg-Akzeptoren in GaN.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland			TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	ML	Mali	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MN	Mongolei	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MR	Mauretanien	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MW	Malawi	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	MX	Mexiko		
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CG	Kongo	KE	Kenia	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CM	Kamerun			PL	Polen		
CN	China	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CU	Kuba	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CZ	Tschechische Republik	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
DE	Deutschland	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DK	Dänemark	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
EE	Estland	LR	Liberia	SG	Singapur		

UV-UNTERSTÜTZTE DOTIERSTOFFAKTIVIERUNG IN VERBINDUNGSHALBLEITERN MITTELS RTP-SYSTEMEN

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur thermischen Behandlung von wenigstens einer Schicht, vorzugsweise bestehend aus Verbindungshalbleitern, zur Aktivierung von in der Schicht durch Wasserstoff passivierten Fremdatomen, bei dem wenigstens eine Schicht auf eine Temperatur höher als eine erste Temperatur, bei der der spezifische Schichtwiderstand abnimmt, für ein erstes
10 Zeitintervall kleiner als 120 Sekunden erwärmt wird.

Das beschriebene Verfahren wird zur elektrischen Aktivierung der p-Dotierung von II-VI- und III-V-Halbleitern verwendet, die durch CVD- (Chemical Vapor Deposition), insbesondere durch MOCVD- (Metal Organic Chemical Vapor De-
15 position) Prozesse hergestellt wurden. Derartige Halbleiter werden z.B. für die Herstellung optoelektronischer Bauelemente (z.B. lichtemittierender Bauteile wie z.B. blaue Leuchtdioden oder Laserdioden) verwendet. Während der CVD-Prozesse wird neben dem Akzeptor bei der p-Dotierung (z.B. in III-V-Halbleitern Mg, C, Zn, Be, Cd, Ca, Ba, oder in II-VI-Halbleitern N) auch Wasserstoff in die
20 Halbleiterschicht eingebaut. Dieser bildet mit den Akzeptoratomen einen elektrisch inaktiven Komplex, was zu einer Passivierung der Akzeptoratome (z.B. Mg) und damit zu einem hohen Schichtwiderstand führt. Es sind mehrere Verfahren zur Aktivierung der passivierten Akzeptoratome bekannt, bei denen die elektrisch inaktiven Wasserstoff-Akzeptor-Komplexe (oder allgemein Wasserstoff-Fremdatom-Komplex) aufgebrochen werden, und der Wasserstoff durch
25 Diffusion aus der p-dotierten Schicht entfernt wird.

Ein Verfahren nach der eingangs beschriebenen Art zur Aktivierung der Wasserstoff-Akzeptor-Komplexe ist in US 5,786,233 beschrieben, wobei während
30 des Verfahrens das Substrat mit kurzweiligem Licht bestrahlt wird, dessen Photonenergie größer als der Bandabstand bei der Verfahrenstemperatur ist.

Vorzugsweise werden die Substrate für eine Dauer von zwei bis 30 Minuten auf Temperaturen von ca. 650 C bis 800 C erhitzt. Dabei werden die Komplexe aufgebrochen und die zuvor passivierten Akzeptoren (z.B. GaN:Mg) aktiviert, wodurch sich der Schichtwiderstand um bis zu mehreren Größenordnungen verringert bzw. die Löcherkonzentration entsprechend erhöht. Durch das Bestrahlen mit kurzwelligem Licht läßt sich die Aktivierung der Akzeptoren und damit die Löcherkonzentration deutlich erhöhen. Da bei noch höheren Temperaturen die Schicht jedoch thermisch geschädigt wird und die p-Leitfähigkeit mit zunehmender Behandlungsdauer wieder abnimmt, ist nach US 5,786,233 ein längeres annealen bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen vorzugsweise anzuwenden.

Yoichi Kamiura et al.; Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) L970-L971 beschreibt den Einfluß von UV-Strahlung auf die Mg-Aktivierung bei GaN-Filmen. Dabei werden die GaN-Filme in einem Ofen für ca. eine Stunde auf einer Temperatur höher als eine Aktivierungstemperatur von ca. 550 C gehalten. Bei Bestrahlung der Mg-dotierten GaN-Schicht mit UV-Strahlung läßt sich die Aktivierungstemperatur etwa um 100 C reduzieren, wodurch sich die thermische Belastung der Substrate ebenfalls reduziert.

In EP 0723303 wird ein aus Heterostrukturen aufgebautes, lichtemittierendes elektronisches Bauteil und ein Verfahren zu dessen Herstellung beschrieben, bei dem bei etwa 600 C mit Hilfe von UV-Laserstrahlung ein Annealing durchgeführt wird, um die Akzeptoraktivierung in den Schichten zu erhöhen bzw. den Schichtwiderstand zu erniedrigen.

In Mamoru Miyachi et al.; Appl. Phys. Lett., Vol 72, No 9, 1101 (1998) wird die thermische Aktivierung von Mg in GaN mit zusätzlicher Generation von Ladungsträgern beschrieben, die durch Anlegen einer Spannung an die Halbleiterstruktur erzeugt werden. Ebenso wird darauf verwiesen, daß ein p-leitendes Verhalten von Mg enthaltendem GaN auch durch ein Bestrahlen mit niedere-

nergetischen Elektronen erzielt und beeinflußt werden kann.

Alle bisher beschriebenen Verfahren dienen zur Aktivierung der durch Wasserstoff passivierten Akzeptoren. Der Nachteil der oben beschriebenen Verfahren ist, daß zur Aktivierung vergleichsweise lange Prozeßzeiten notwendig sind, wobei im allgemeinen die Substrate (z.B. Saphir, SiC, Si, AlN, ZnO oder Al₂O₃) mit den darauf befindlichen Halbleiterfilmen einer hohen thermischen Belastung ausgesetzt sind, und die Durchsatzzahlen zudem sehr niedrig sind.

10 Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es diese Nachteile zu beseitigen.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß bei dem eingangs beschriebenen Verfahren innerhalb des ersten Zeitintervalls wenigstens eine Schicht auf eine zweite Temperatur höher als die erste Temperatur für ein zweites Zeitintervall von bis zu 60 Sekunden erwärmt wird, wobei während des Verfahrens in wenigstens einem dritten Zeitintervall durch elektromagnetische Strahlung innerhalb der Schicht Ladungsträger erzeugt werden.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird vorteilhaft die Prozessdauer zur Aktivierung der durch Wasserstoff passivierten Fremdatome (z.B. Mg) in einer oder mehreren aus Verbindungshalbleitern bestehenden Schichten (z.B. GaN) wesentlich verkürzt, wobei Schichtwiderstand und Löcherkonzentration mit den oben beschriebenen bekannten Verfahren vergleichbar sind.

25 Das erfindungsgemäße Verfahren wird bevorzugt in Schnellheiz- oder RTP- (Rapid Thermal Processing) Systemen durchgeführt, da in RTP-Systemen die Halbleiter mit sehr präzisen Temperatur-Zeit-Prozessen und sehr hoher Gleichförmigkeit prozessierbar sind.

30 Die erste Temperatur des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zwischen 350 C und 900 C gewählt, wobei z.B. bei Mg enthaltendem GaN (oder allgemein bei

- Gruppe-III-Nitriden) eine Temperatur zwischen 350 C und 600 C bevorzugt wird. Abhängig vom Halbleitertyp kann die erste Temperatur auch von der Wahl des dritten Zeitintervalls und von der Intensität der elektromagnetischen Strahlung und der damit verbundenen Generation an Minoritätsladungsträger abhängen. Mit zunehmender Länge des dritten Zeitintervalls und mit zunehmender Intensität der elektromagnetischen Strahlung läßt sich je nach Halbleitertyp die erste Temperatur absenken, was vorteilhaft zu einer Reduktion der thermischen Belastung der Schicht führt.
- 5
- 10 Die zweite Temperatur während des zweiten Zeitintervalls wird vorzugsweise zwischen 700 C und 1400 C gewählt. Die Wahl dieser Temperatur hängt wesentlich vom Material des Verbindungshalbleiters ab, wobei z.B. bei Mg enthaltendem GaN vorzugsweise eine zweite Temperatur zwischen 850 C und 1200 C gewählt wird. Durch die Wahl einer höheren zweiten Temperatur kann vorteilhaft das zweite Zeitintervall wesentlich verkürzt werden, was ebenfalls wieder zu einer Reduktion der thermischen Belastung der Halbleiterschicht bzw. des Halbleiterschichtsystems führt.
- 15
- Eine Erwärmung des Halbleiters auf eine zweite Temperatur höher als die Zersetzungstemperatur kann für kurze Zeit erfolgen. Wird die Halbleiterschicht an ihrer Oberfläche mit einer Beschichtung (z.B. SiO₂) versehen, oder wird die Halbleiterschicht unter Überdruck z.B. in einer wasserstofffreien N₂-Atmosphäre erhitzt, so findet eine Zersetzung der Verbindungshalbleiter erst bei höheren Temperaturen statt, wodurch die zweite Temperatur weiter erhöht werden kann. Zeit und Temperatur werden dabei so gewählt, daß z.B. im Falle von Mg dotiertem GaN die durch Stickstofffehlstellen entstandenen Donatorzentren die Zahl der aktiven Mg-Zentren (allgemein aktiven Aktivatorzentren) nicht übersteigt, so daß insbesondere ein p-leitendes Verhalten der Schicht resultiert. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit die Konzentration und Aktivierung von Donator- und Akzeptorzentren in weiten Bereichen einzustellen.
- 20
- 25
- 30

Die Dauer des dritten Zeitintervalls, in dem innerhalb der Halbleiterschicht Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung erzeugt werden, kann gleich der Dauer des ersten Zeitintervall sein. Dabei werden während des gesamten Prozessabschnitts des Verfahrens, bei dem die Halbleiterschicht eine Temperatur größer als die erste Temperatur hat, Minoritätsladungsträger generiert.

Das dritte Zeitintervall kann aber auch ganz oder teilweise außerhalb des ersten Zeitintervalls liegen. Dann wird die Schicht auch oder nur während der Aufheiz- und/oder Abkühlphase, oder eines anderen, vor oder nach dem ersten Zeitintervall liegenden, beliebigen Temperatur-Zeit-Prozeßschritts bestrahlt, innerhalb der die Schichttemperatur noch unterhalb der ersten Temperatur ist. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn ein Repassivieren aktivierter Fremdatome (z.B. Mg) durch Wasserstoff beim Abkühlen vermieden werden soll, oder wenn wie oben beschrieben, die erste Temperatur schon früher, d.h. bei einer niedrigeren Temperatur erreicht werden soll.

Insgesamt läßt sich durch die Lage und die Länge des zweiten und dritten Zeitintervalls, sowie durch die erste und die zweite Temperatur auch das räumliche Konzentrationsprofil der aktivierten und passivierten Fremdatome einstellen. Liegt die zweite Temperatur oberhalb der Zersetzungstemperatur, so ist auch die Defektkonzentration und deren räumliche Verteilung ebenso einstellbar. So kann z.B. das dritte Zeitintervall das zweite umfassen, gleich oder innerhalb des zweiten Zeitintervalls sein, vor dem zweiten Zeitintervall liegen, Zeitbereiche vor und aus dem zweiten Zeitintervall oder Zeitbereiche aus dem zweiten und nach dem zweiten Zeitintervall aber auch Zeitbereiche nach dem zweiten Zeitintervall umfassen.

Die Schichten können Gruppe III-V und/oder Gruppe II-VI der Verbindungshalbleiter umfassen, insbesondere Gruppe-III-Nitride wie z.B. GaN.

Die Energie der elektromagnetischen Strahlung des erfindungsgemäßen Ver-

fahrens wird vorteilhaft größer als der Bandabstand wenigstens einer Schicht gewählt. Dadurch werden durch die elektromagnetische Strahlung Minoritätsträger innerhalb der Schicht produziert, wodurch die Aktivierung der durch Wasserstoff passivierten Fremdatome erleichtert, eine Repassivierung der Fremdatome vermieden und die Diffusion des Wasserstoffs unterstützt wird.

Vorteilhafterweise wird das erfindungsgemäße Verfahren wie oben erwähnt mittels eines Schnellheizsystems (RTP-Systems) durchgeführt, da mittels des RTP-Systems definiert sehr kurze Heizprozesse im Bereich von einer Sekunde bis hin zu 30 Minuten durchgeführt werden können. Die Temperatur-Zeit-Kurven der Substrate lassen sich in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis ca. 1400 C sekundengenau einstellen, wobei das Substrat sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Temperaturen extrem gleichmäßig beheizt wird. Ebenso lassen sich in RTP-Systemen auch unterschiedliche Prozessgase, die das Substrat umgeben, verwenden, wobei der Prozessgasdruck von Vakuum- bis hin zu Überdruckbedingungen einstellbar ist.

Die Erfindung wird im folgenden unter Bezugnahme auf die nachfolgenden Figuren näher beschrieben. Es zeigen:

20

Fig. 1 schematisch den Schichtwiderstand als Funktion der Temperatur und den Einfluß elektromagnetischer Strahlung auf diesen,

25

Fig. 2a bis 2f verschiedene schematisch dargestellte Temperatur-Zeit-Kurven für eine in einem RTP-System behandelte Halbleiterschicht.

30

In Fig. 1 zeigt Kurve a schematisch einen typischen Verlauf eines Schichtwiderstands eines Verbindungshalbleiters, z.B. eines mit Mg versetzten GaN-Films, als Funktion der Temperatur. Bei niedrigen Temperaturen (z.B. GaN bei unter ca. 550 C) weist der Halbleiterfilm aufgrund der Passivierung der Fremdatome (z.B. Mg) durch Wasserstoff einen hohen elektrischen Widerstand

R auf. Mit zunehmender Temperatur verringert sich dieser, da immer mehr Wasserstoff-Akzeptor-(Fremdatom-) Komplexe aufbrechen und die Akzeptoren somit elektrisch aktiv werden. Sind alle Komplexe aufgebrochen und alle Akzeptoren aktiviert, so bleibt der Schichtwiderstand bei steigender Temperatur ab einem unteren Temperaturwert T_L bis zu einem oberen Temperaturwert T_H annähernd konstant. Ab dem oberen Temperaturwert T_H steigt der Schichtwiderstand R mit zunehmender Temperatur wieder deutlich an, da ab dieser Temperatur T_H eine Zersetzung der Halbleiterschicht auftritt. Bei Mg dotiertem GaN ist unter Atmosphärendruck T_L etwa 550 C und T_H etwa 1050 C.

10

Durch Erzeugung von Minoritätsladungsträger kann die Temperatur T_L verringert werden. Die Ladungsträger können dabei z.B. durch Bestrahlung mit UV-Licht erzeugt werden, wobei die eingestrahlte Photonenergie größer als der Bandabstand der Halbleiterschicht bei der entsprechenden Schichttemperatur ist. Die Ladungsträger können aber auch z.B. durch Anlegen eines Potentials oder einer Spannung an eine Halbleiterschicht bzw. an ein Halbleiterschichtsystem, oder durch Kombination von UV-Bestrahlung und einem Anlegen eines Potentials oder einer Spannung an die Schicht bzw. das Schichtsystem erzeugt werden. Die Verringerung des unteren Temperaturwertes T_L hängt von der Zahl der erzeugten Ladungsträger ab. Der untere Temperaturwert läßt sich mittels UV-Bestrahlung, z.B. im Falle von GaN mit einer Wellenlänge kleiner als etwa 360 nm, um ca. 100 C absenken, wie es in Fig. 1 mittels Kurve b dargestellt ist.

15

20

Fig. 2 a zeigt ein Beispiel einer Temperatur-Zeit-Kurve des erfindungsgemäßen Verfahrens. Die Halbleiterschicht oder allgemein das Halbleiterschichtsystem wird von Raumtemperatur (Punkt A) möglichst schnell auf die Temperatur T_1 , bei der der Schichtwiderstand des Halbleiters oder der Schichtwiderstand wenigstens einer Schicht des Halbleitersystems abnimmt (Punkt B), aufgeheizt. Nun wird für ein erstes Zeitintervall kleiner als 120 Sekunden (Zeitdifferenz BE zwischen B und E) die Temperatur der Schicht (oder allgemein wenigstens einer Schicht des Schichtsystems) über der Temperatur T_1 gehalten. Innerhalb

25

30

dieses ersten Zeitintervalls wird die Schicht für die Dauer eines zweiten Zeitintervalls (Zeitdifferenz CD zwischen Punkt D und C) auf eine zweite Temperatur T_2 erhitzt, wobei das zweite Zeitintervall kleiner 60 Sekunden ist. Die Temperatur-Zeit-Kurve kann innerhalb dieses zweiten Zeitintervalls im allgemeinen einen beliebigen Kurvenverlauf mit Schwankungen um bis zu 200 C um die zweite Temperatur T_2 aufweisen. Figur 2a zeigt für GaN ein T_1 von etwa 550 C und ein T_2 größer als die Zersetzungstemperatur von ca. 1050 C, weshalb das zweite Zeitintervall CD kleiner als 60 Sekunden, vorzugsweise kleiner als 30 Sekunden gewählt wird. Der untere Grenzwert für das zweite Zeitintervall ist im allgemeinen durch die Regelgeschwindigkeit bestimmt mit der der aufsteigende Teil der Temperaturzeitkurve (ramp up) in den abfallenden Teil (ramp down) übergeführt werden kann. Für moderne RTP-Systeme beträgt diese Zeit etwa 1 Sekunde. Mit zukünftigen Verbesserungen der RTP-Systeme kann dieser Wert unter Umständen unterschritten werden. Die Dauer des zweiten Zeitintervalls CD (in Fig 2a) bestimmt entscheidend, um wieviel die Temperatur T_2 die Zersetzungstemperatur T_H überschreiten kann, ohne das die Halbleiterschicht oder das Schichtsystem einen bleibenden Schaden erfährt. Je kürzer das zweite Zeitintervall CD ist, desto höher kann die Temperatur T_2 sein, da dann die insgesamt thermische Belastung der Schicht im Zeitintervall CD einen kritischen Wert nicht übersteigt. Liegt die thermische Belastung unterhalb dieses kritischen Wertes, so können abhängig vom Halbleitertyp die gebildeten Fehlstellen und Defekte durch ein anschließendes Annealing (Tempern) bei einer Temperatur kleiner als T_H größtenteils oder wenigstens zum Teil wieder beseitigt werden. Der kritische Wert der thermischen Belastung der Schicht oder des Schichtsystems ist experimentell zu ermitteln. Damit bei vorgegebener kritischer thermischer Belastung eine möglichst hohe Temperatur T_2 erzielbar ist, ist es wichtig, daß das RTP-System ein schnelles Aufheizen- bzw. Abkühlen des Halbleiters ermöglicht. Typische maximale Aufheizgeschwindigkeiten liegen anlagenabhängig zwischen 75 C/s und 500 C/s. Während des in Fig. 2a dargestellten Prozesses werden für die Dauer von zumindest einem dritten Zeitintervall durch elektromagnetische Strahlung, vorzugsweise durch UV-

Strahlung, innerhalb der Schicht Ladungsträger erzeugt. Dabei kann das dritte gleich dem ersten Zeitintervall BE sein, wodurch die freien Ladungsträger erst erzeugt werden, wenn die Mg- (oder allgemein Fremdatom-) Wasserstoff-Komplexe thermisch bereits nahezu aufgebrochen sind. Durch die (photo)generierten freien Elektronen ist dann das Diffusionsverhalten des aufgebrochenen Wasserstoffs innerhalb der Halbleiterschicht zu beeinflussen. Alternativ kann das dritte Zeitintervall auch das zweite BE oder den gesamten Prozeß AF umfassen. Allgemein kann das dritte Zeitintervall beliebig innerhalb des Prozesses AF liegen, wobei seine Dauer bis zur gesamten Prozeßzeit AF betragen kann. Die unter Grenze des dritten Zeitintervalls wird durch die technischen Möglichkeiten eine ausreichende UV-Lichtleistung bereitzustellen begrenzt. Sie liegt derzeit bei etwa 10^{-9} s für gepulste Laser und bei etwa 10^{-6} s für Blitzlampen. Bevorzugt werden jedoch Zeitintervalle von 1 bis 120 Sekunden. Insbesondere ist es vorteilhaft das dritte Zeitintervall während der Abkühlphase so zu legen, daß während des Abkühlens der Schicht eine Repassivierung der Fremdatome (z.B. des Mg in GaN) weitgehend verhindert wird. Ferner ist es auch vorteilhaft während der Aufheizphase, z.B. im Bereich AB oder AC durch UV-Einstrahlung Ladungsträger zu erzeugen, wodurch wie in Fig. 1 dargestellt, die erste Temperatur T_1 und somit auch die thermische Belastung des Halbleiters reduziert werden kann. Ferner können innerhalb des Prozesses AF in mehreren (dritten) Zeitintervallen Ladungsträger durch UV-Strahlung erzeugt werden. Beispielsweise lassen sich die oben genannten Vorteile kombinieren, indem man zwischen AB oder AC im ramp up und im ramp down Ladungsträger erzeugt.

25

Fig. 2b zeigt ein weiteres Beispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens, bei dem die Temperatur T_2 unterhalb der Zersetzungstemperatur T_H liegt. Auch hier wird wenigstens eine Halbleiterschicht für wenigstens ein Zeitintervall BE kleiner 120 s auf eine Temperatur größer als die erste Temperatur T_1 geheizt und für ein zweites Zeitintervall CD kleiner 60 s auf einer Temperatur T_2 gehalten. Die

30

Länge des zweiten Zeitintervalls CD ist hier weniger kritisch, da die zweite Temperatur T_2 unterhalb der Zersetzungstemperatur T_H liegt. Die Lage und die Dauer des dritten Zeitintervalls kann entsprechend, wie oben in Verbindung mit Fig. 2a beschrieben, gewählt werden. Abhängig von der Beeinflussung der Diffusion des Wasserstoffs, der beim Aufbruch des Mg- (Fremdatom-) Wasserstoff-Komplexes entsteht, durch die durch die UV-Strahlung generierten freien Ladungsträger wird das dritte Zeitintervall in Lage und Dauer optimiert. Dies ist experimentell zu ermitteln und von der Halbleiterschicht abhängig. So kann es z.B. vorteilhaft sein, während des Prozeßbereichs AB (in Fig. 2b) die Schicht mit UV-Licht zu bestrahlen. Dadurch wird der Mg-H-Komplex schon bei niedrigen Temperaturen aufgebrochen. Während des Prozessabschnitts BD diffundiert der Wasserstoff mit sehr hoher Diffusionskonstante in die Oberflächenbereiche der Schicht. Während der Abkühlphase DF erfolgt eine erneute UV-Bestrahlung, um ein Repassivieren des Mg (der Fremdatome) in GaN (im II-VI oder III-V Halbleiter) zu verhindern. Insgesamt erhält man durch dieses Verfahren einen hohen Aktivierungsgrad.

In Fig 2c ist ein weiteres Ausführungsbeispiel dargestellt. Im Unterschied zu den vorherigen Beispielen wird die Halbleiterschicht im Temperaturbereich zwischen T_1 und T_H für ein Zeitintervall CD kleiner als 120 s getempert. Während dieser Zeit erfolgt die Aktivierung der Fremdatome durch Aufbruch des Wasserstoff-Fremdatomkomplexes und der Wasserstoff bzw. das Wasserstoffion diffundiert in Richtung Halbleiteroberfläche. Durch die weitere Temperaturerhöhung DEF wird die Wasserstoffdiffusion erhöht. Dabei kann die Temperatur wie in Fig. 2c dargestellt die Zersetzungstemperatur T_H übersteigen, oder wie Fig. 2d zeigt, unterhalb dieser liegen. Auch hier kann durch Lage und Dauer des dritten Zeitintervalls durch Bestrahlung mittels UV-Licht Einfluß auf den Aktivierungs- bzw. Repassivierungsgrad (bzw. deren räumlichen Verteilungen) genommen werden. Als zweites Zeitintervall bzw. zweite Temperatur T_2 kann in den Beispielen aus Fig. 2c und Fig. 2d sowohl das Zeitintervall CD als auch das

Zeitintervall EF mit der jeweiligen zugehörigen (mittleren) Temperatur angesehen werden. Vorzugsweise wird bedingt durch den Diffusion- und Aktivierungsmechanismus das Zeitintervall EF der höheren Temperatur wesentlich kürzer gewählt als das Zeitintervall CD. Zusammen sind die Intervalle kürzer als
5 120 s, welches die maximal zulässige Zeit für das erste Zeitintervall BG ist.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist in Fig. 2e dargestellt. Hier folgt im Unterschied zu Fig. 2c und Fig. 2d einem hohen Temperaturschritt EF, dem ein niedrigerer Temperaturschritt CD (etwa wie in Fig. 2c)
10 vorausgeht, ein weiterer Temperaturschritt im Intervall GH. Dieser Schritt GH ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn durch einen hohen Temperaturschritt EF (der auch über der Zersetzungstemperatur liegen kann) merkliche Defektbildung (z.B. N-Fehlstellen in GaN) auftritt. Diese Defekte können dann je nach Halbleitermaterial im Schritt GH weitgehend oder wenigstens teilweise ausge-
15 heilt werden. Auch in diesem Beispiel kann sowohl das Zeitintervall CD als auch die Zeitintervalle EF und/oder GH als zweites Zeitintervall bzw. als zweite Zeitintervalle interpretiert werden, wobei dann die Intervalllänge kleiner als 60 s ist. Die Summe der Intervalle CD, EF und GH sind ebenfalls kürzer als 120 s, welches die maximal zulässige Zeit für das erste Zeitintervall BI ist. Bezüglich
20 der Lage und Dauer des dritten Zeitintervalls innerhalb dessen durch elektromagnetische Strahlung (z.B. UV-Licht) in der Halbleiterschicht Ladungsträger erzeugt werden gilt analog zu den vorhergehenden Ausführungsbeispielen, daß durch Bestrahlung mittels UV-Licht Einfluß auf den Aktivierungs- bzw. Repassivierungsgrad (bzw. deren Verteilungen) genommen wird. Hierzu wird die Lage
25 und die Dauer des dritten Zeitintervalls innerhalb des Prozesses AK geeignet gewählt, wobei wie oben beschrieben, vorzugsweise im Bereich des Hochheizens, also z.B. im Bereich AB oder AC und im Bereichen des Abkühlens, also z.B. in den Bereichen FG und / oder HI die Halbleiterschicht mit UV-Licht bestrahlt wird.

Durch Anlegen eines elektrischen Feldes an die Halbleiterschicht kann der Diffusionsprozeß des bei der Aktivierung entstehenden Wasserstoffs ebenfalls beeinflußt, d.h. die Diffusion durch die Halbleiterschicht beschleunigt werden. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, daß das Substrat mit der Halbleiterschicht
5 bzw. dem Halbleiterschichtsystem gegenüber dem Prozessgas, bzw. gegenüber einer über der Schicht beabstandet angeordneten Elektrode auf ein positives Potential gelegt wird. Eine derartige Anordnung oder ein derartiges Verfahren kann für sich oder in Kombination mit den oben dargestellten Verfahren angewandt werden. Allgemein kann im dritten Zeitintervall zusätzlich zu der
10 elektromagnetischen Strahlung ein Potential in der beschriebenen Art und Weise eingesetzt werden, oder es kann während des dritten Zeitintervalls für alle oben beschriebene Fälle nur ein Potential zur Anwendung kommen, d.h., daß auf eine UV-Bestrahlung verzichtet wird. Wird während des dritten Zeitintervalls nur ein Potential oder ein Feld an die Schicht gelegt, so werden durch dieses
15 nicht notwendigerweise Ladungsträger in der Schicht erzeugt. Alleine die Änderung des elektrochemischen Potentials ändert das Diffusionsverhalten des Wasserstoffs in der Schicht.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur thermischen Behandlung von wenigstens einer Schicht, vorzugsweise bestehend aus Verbindungshalbleitern, zur Aktivierung von in
5 der Schicht durch Wasserstoff passivierten Fremdatomen mit den Verfahrensschritten;

erwärmen von wenigstens einer Schicht auf eine Temperatur höher als eine
10 erste Temperatur, bei der der spezifische Schichtwiderstand abnimmt, für ein erstes Zeitintervall kleiner als 120 sec,

innerhalb des ersten Zeitintervalls erwärmen von wenigstens einer Schicht
auf eine zweite Temperatur höher als die erste Temperatur für ein zweites
15 Zeitintervall von bis zu 60 sec

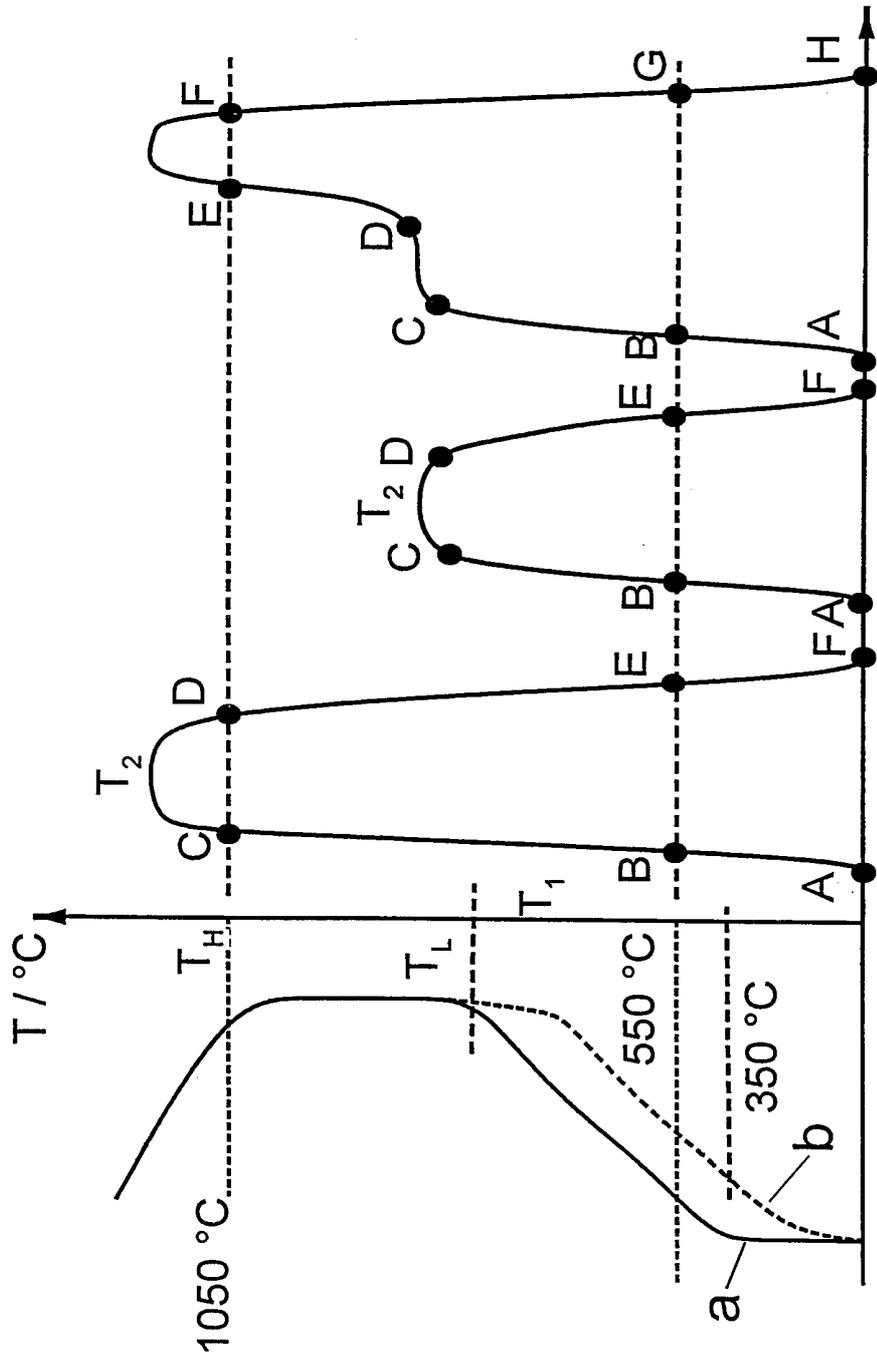
wobei während des Verfahrens in wenigstens einem dritten Zeitintervall
durch elektromagnetische Strahlung innerhalb der Schicht Ladungsträger
erzeugt werden.

20
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Temperatur zwischen 300 C und 1200 C ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die
25 zweite Temperatur zwischen 600 C und 1200 C ist.
4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß es außerhalb des ersten Zeitintervalls thermische Verfahrensschritte bei Temperaturen T kleiner T_1 beinhaltet.
30
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß

das dritte Zeitintervall teilweise außerhalb des ersten Zeitintervalls liegt.

- 5 6. Verfahren nach einem der bisherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das dritte Zeitintervall gleich dem ersten ist.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das dritte Zeitintervall außerhalb des ersten Zeitintervalls ist.
- 10 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das dritte Zeitintervall das zweite Zeitintervall umfaßt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung zeitlich vor dem
15 zweiten Zeitintervall gebildet werden.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung zeitlich vor und während des zweiten Zeitintervalls gebildet werden.
20
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung während und nach dem zweiten Zeitintervall gebildet werden.
- 25 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung nach dem zweiten Zeitintervall gebildet werden.
- 30 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung nur vor und nach dem zweiten Zeitintervall gebildet werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ladungsträger durch elektromagnetische Strahlung innerhalb des zweiten Zeitintervalls gebildet werden.
- 5
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine Schicht Verbindungshalbleiter der Gruppe III-V umfaßt.
- 10
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine Schicht Verbindungshalbleiter der Gruppe II-VI umfaßt.
- 15
17. Verfahren nach Ansprüchen 16, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine Schicht Verbindungshalbleiter der Gruppe III-Nitride umfaßt.
18. Verfahren nach wenigstens einem der bisherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Energie der elektromagnetischen Strahlung größer als der Bandabstand wenigsten einer Schicht ist.
- 20
19. Verfahren nach wenigstens einem der bisherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die thermische Behandlung der Schicht innerhalb eines RTP-Systems erfolgt.
- 25



R Fig. 1 Fig. 2a Fig. 2b Fig. 2c t/s

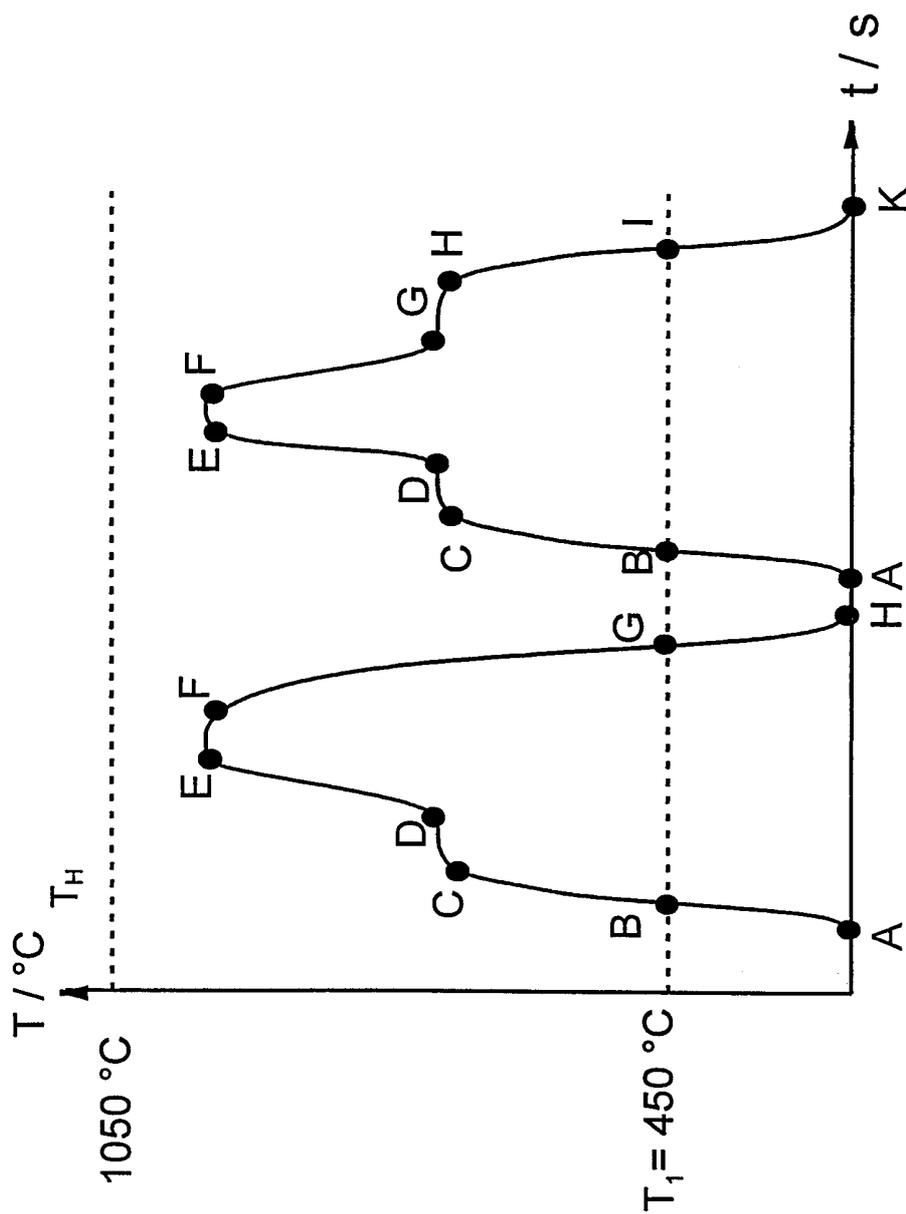


Fig. 2e

Fig. 2d

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 00/03666

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 H01L21/324 H01L21/477

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

INSPEC, COMPENDEX, EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 786 233 A (TASKAR NIKHIL R ET AL) 28 July 1998 (1998-07-28) cited in the application the whole document ---	1,2, 15-18
A	KAMIURA Y ET AL: "Photo-enhanced activation of hydrogen-passivated magnesium in p-type GaN films" JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, PART 2 (LETTERS), vol. 37, no. 8B, 15 August 1998 (1998-08-15), pages L970-L971, XP002144578 ISSN: 0021-4922 cited in the application the whole document ---	1,2,15, 17,18
	-/--	

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

9 August 2000

Date of mailing of the international search report

22/08/2000

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Köpf, C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 00/03666

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 399 662 A (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH CO) 28 November 1990 (1990-11-28) column 1, line 31 -column 3, line 30 column 7, line 24 - line 58; figure 3 -----	1-4, 15, 16, 19

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International Application No

PCT/EP 00/03666

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5786233 A	28-07-1998	NONE	
EP 0399662 A	28-11-1990	US 5011794 A	30-04-1991
		CA 2015411 A,C	01-11-1990
		DE 69020802 D	17-08-1995
		DE 69020802 T	07-12-1995
		ES 2074536 T	16-09-1995
		HK 100596 A	14-06-1996
		JP 2303121 A	17-12-1990
		JP 7050691 B	31-05-1995
		KR 9514610 B	11-12-1995

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/03666

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 IPK 7 H01L21/324 H01L21/477

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 IPK 7 H01L

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

INSPEC, COMPENDEX, EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 5 786 233 A (TASKAR NIKHIL R ET AL) 28. Juli 1998 (1998-07-28) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ---	1,2, 15-18
A	KAMIURA Y ET AL: "Photo-enhanced activation of hydrogen-passivated magnesium in p-type GaN films" JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, PART 2 (LETTERS), Bd. 37, Nr. 8B, 15. August 1998 (1998-08-15), Seiten L970-L971, XP002144578 ISSN: 0021-4922 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ---	1,2,15, 17,18
	-/--	

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- *E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- *L* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- *O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- *P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

- *T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- *X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- *Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- * & * Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

9. August 2000

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

22/08/2000

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Köpf, C

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/03666

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 0 399 662 A (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH CO) 28. November 1990 (1990-11-28) Spalte 1, Zeile 31 - Spalte 3, Zeile 30 Spalte 7, Zeile 24 - Zeile 58; Abbildung 3 -----	1-4, 15, 16, 19

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/03666

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5786233 A	28-07-1998	KEINE	
EP 0399662 A	28-11-1990	US 5011794 A	30-04-1991
		CA 2015411 A, C	01-11-1990
		DE 69020802 D	17-08-1995
		DE 69020802 T	07-12-1995
		ES 2074536 T	16-09-1995
		HK 100596 A	14-06-1996
		JP 2303121 A	17-12-1990
		JP 7050691 B	31-05-1995
		KR 9514610 B	11-12-1995