

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
24. März 2022 (24.03.2022)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/058193 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01J 37/32 (2006.01) H01J 37/34 (2006.01)
C23C 14/34 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2021/074470

(22) Internationales Anmeldedatum:
06. September 2021 (06.09.2021)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2020 124 032.5
15. September 2020 (15.09.2020) DE

(71) Anmelder: CEMECON AG [DE/DE]; Adenauerstraße
20A4, 52146 Würselen (DE).

(72) Erfinder: MAY, Walter; Grauenhofer Weg 117, 52078
Aachen (DE). KÖLKER, Werner; Wilsberger Straße 46,
52134 Herzogenrath (DE). BOLZ, Stephan; Josef-Pon-
ten-Straße 55, 52072 Aachen (DE).

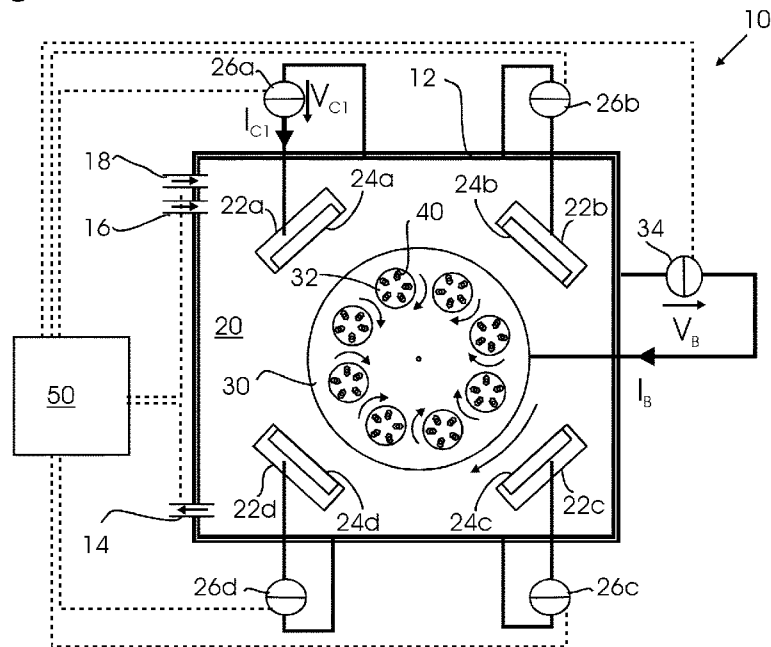
(74) Anwalt: KALKOFF & PARTNER PATENTANWÄL-
TE MBB; Martin-Schmeisser-Weg 3a-3b, 44227 Dort-
mund (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA,
MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,

(54) Title: COATING APPARATUS AND COATING METHOD HAVING DIVIDED PULSES

(54) Bezeichnung: BESCHICHTUNGSVORRICHTUNG UND BESCHICHTUNGSVERFAHREN MIT UNTERTEILTEN PULSEN

Fig. 1



(57) Abstract: The invention relates to a coating method and to a coating apparatus for coating a body (40). A magnetron-cathode (22a, 22b, 22c, 22d) having a target (24a, 24b, 24c, 24d) is arranged in the vacuum chamber (12). Electrical power is supplied to the magnetron-cathode (22a, 22b, 22c, 22d) such that a plasma is generated and the target (24a, 24b, 24c, 24d) is atomized in order to deposit a coating (44) on the body (40). The electrical power is periodically supplied within a period duration T according to the HIPIMS method as a cathode pulse (60), wherein each cathode pulse (60) comprises at least two cathode sub-pulses (62) and an intermediate cathode sub-pulse break (64). In order to be able to deposit coatings (44) having favorable properties, using the chopped HIP IMS method in a particularly favorable manner, a bias voltage is applied to the substrate (40) to be coated with bias voltage pulses (66),



WO 2022/058193 A1

RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

wherein each bias voltage pulse (66) comprises at least two bias sub-pulses (68) and an intermediate bias sub-pulse break (70).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Beschichtungsverfahren und eine Beschichtungsvorrichtung zum Beschichten eines Körpers (40). Eine Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) mit einem Target (24a, 24b, 24c, 24h) ist in der Vakuumkammer (12) angeordnet. Der Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) wird elektrische Leistung zugeführt, so dass ein Plasma generiert und das Target (24a, 24b, 24c, 24h) zerstäubt wird, um eine Beschichtung (44) auf dem Körper (40) abzuscheiden. Dabei wird die elektrische Leistung gemäß dem HIPIMS-Verfahren als Kathodenpulse (60) periodisch innerhalb einer Periodendauer T zugeführt, wobei jeder Kathodenpuls (60) mindestens zwei Kathodensubpulse (62) und eine dazwischenliegende Kathodensubpulspause (64) umfasst. Um unter Nutzung des chopped HIP IMS Verfahrens auf besonders günstige Weise Beschichtungen (44) mit günstigen Eigenschaften abscheiden zu können, wird am zu beschichtenden Substrat (40) eine Bias-Spannung mit Biasspannungspulsen (66) angelegt, wobei jeder Biasspannungspuls (66) mindestens zwei Biassubpulse (68) und eine dazwischenliegende Biassubpulspause (70) umfasst.

Beschreibung

5

Beschichtungsvorrichtung und Beschichtungsverfahren mit unterteilten Pulsen

Die Erfindung betrifft Beschichtungsverfahren und Beschichtungsvorrichtungen. Insbesondere betrifft die Erfindung Verfahren und Vorrichtungen zum Beschichten eines Körpers mittels Kathodenzerstäubung, wobei zumindest einer Kathode elektrische Leistung gemäß dem HIPIMS-Verfahren zugeführt wird.

Es ist bekannt, Körper oder Teile von Körpern mit einer Oberflächenbeschichtung zur Verbesserung der mechanischen oder chemischen Eigenschaften zu versehen. Insbesondere für Werkzeuge und Bauteile, die einem Verschleiß unterliegen, ist es bekannt, Funktionsflächen mit Beschichtungen zu versehen.

Als Beschichtungen sind insbesondere Hartstoffschichten bekannt. Zur Bildung von dünnen Beschichtungen sind neben CVD-Verfahren besonders PVD-Beschichtungsverfahren bekannt, insbesondere die Verfahren der Kathodenzerstäubung.

Im Bereich der Kathodenzerstäubung ist das HIPIMS-Verfahren (High Power Impulse Magnetron Sputtering) von besonderem Interesse. Im Gegensatz zu herkömmlicher Kathodenzerstäubung, bei der Kathoden mit gleichbleibender elektrischer Leistung, bspw. mittels Gleichspannung betrieben werden, werden bei HIPIMS kurze elektrische Pulse hoher Spannung an die Kathode angelegt und dabei sehr hohe Peak-Leistungen erreicht. Im Ergebnis wird eine gegenüber herkömmlicher Kathodenzerstäubung deutlich erhöhte Ionisation des Plasmas erzielt, woraus sich vorteilhafte Eigenschaften der damit erzeugten Beschichtungen ergeben.

In aktuellen Weiterentwicklungen des HIPIMS-Verfahrens ist vorgeschlagen worden, die den Kathoden zugeführten elektrischen Pulse zu unterteilen, d.h. statt eines durchgehenden Kathodenpulses eine Abfolge von kürzeren Pulsen anzulegen, die hier als Kathodensubpulse

bezeichnet werden und in ihrer Abfolge einen unterteilten Kathodenpuls bilden. Dieses Verfahren wird als „chopped HIPIMS“ oder auch als DOMS (deep oscillation magnetron sputtering) bezeichnet.

- 5 So offenbart Barker et al, „Modified high power impulse magnetron sputtering process for increased deposition rate of titanium“, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films 31, 060604 (2013) die Abscheidung von Titan-Schichten mittels eines modifizierten HIPIMS-Verfahrens, bei dem HIPIMS-Pulse in eine Puls-Sequenz unterteilt werden. Puls-Sequenzen einer Dauer von 100 μ s werden bei einer Frequenz von
10 200 Hz und durchschnittlicher Leistung von 0,75 kW in verschiedenen Sequenzfolgen angelegt mit 4 oder 2 Mikropulsen unterschiedlicher Dauer sowie mit unterschiedlicher Ausschaltdauer. Es wird von einem maßgeblichen Effekt der unterteilten HIPIMS-Pulse auf die Abscheiderate berichtet, die über der von herkömmlichen HIPIMS-Verfahren liegt.
- 15 Barker et al, „An investigation of c-HiPIMPS discharges during titanium deposition“, Surface & Coatings Technology 258 (2014) 631 – 638 berichten von mittels chopped HIPIMS abgeschiedenen Titan-Schichten unter Nutzung von Pulssequenzen mit 4 oder 8 Mikropulsen. Es wird bei längerer Verzögerung zwischen Mikropulsen von einer deutlich erhöhten Abscheiderate berichtet, die aus der Ionisierung des Plasmas erklärt wird.
- 20 Die EP 2 587 518 A1 offenbart eine Vorrichtung zur Herstellung von mindestens im Wesentlichen wasserstofffreien ta-C-Schichten auf Substraten (Werkstücken) aus Metall oder Keramikmaterialien. Eine Vakuumkammer ist mit einer Vakuumpumpe und mit einer Quelle für inertes Gas verbunden. Eine Stützvorrichtung ist für die Substrate (Werkstücke)
25 vorgesehen. Mindestens eine Graphitkathode mit einer zugeordneten Magnetanordnung, die ein Magnetron bildet, dient als Quelle für Kohlenstoffmaterial. Eine Bias-Leistungsversorgung dient zum Anlegen einer negativen Vorspannung an das Substrat. Eine Kathodenleistungsversorgung ist mit der Graphit-Kathode und einer zugehörigen Anode verbunden und zur Übertragung von Hochleistungsimpulssequenzen in (vorzugsweise
30 programmierbaren) Zeitintervallen ausgelegt. Jede Hochleistungsimpulssequenz umfasst eine Reihe von Hochfrequenz-Gleichstromimpulsen, die angepasst sind, um gegebenenfalls nach einer Aufbauphase, der mindestens einen Graphitkathode zugeführt zu werden.

Die EP 3 457 428 A1 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Verarbeiten eines Substrats in einem Halbleiterbearbeitungssystem. Das Verfahren beginnt mit der Initialisierung eines Impulssynchronisationsreglers, der zwischen einem Impuls-HF-Vorspannungsgenerator und einem HIPIM-Generator gekoppelt ist. Ein erstes Zeitsignal wird von der Impulssynchronisationssteuerung an den Impuls-HF-Vorspannungsgenerator und den HIPIM-Generator gesendet. Ein Sputtertarget und eine HF-Elektrode, die in einem Substratträger angeordnet sind, werden basierend auf dem ersten Zeitsignal erregt. Das Target und die Elektrode werden basierend auf einem Ende des Zeitsteuerungssignals abgeschaltet. Ein zweites Zeitsignal wird von der Impulssynchronisationssteuerung an den Impuls-HF-Vorspannungsgenerator gesendet, und die Elektrode wird erregt und abgeschaltet, ohne das Target als Reaktion auf das zweite Zeitsteuerungssignal zu erregen.

Die US 2008/0135400 A1 offenbart eine Vorrichtung zum Sputtern eines Targets zur Erzeugung einer Beschichtung auf einem Substrat. Die Vorrichtung umfasst ein Magnetron mit einer Kathode und einer Anode. Eine Stromversorgung ist mit dem Magnetron verbunden und mindestens ein Kondensator ist mit der Stromversorgung verbunden. Die Vorrichtung umfasst auch eine Induktivität, die betriebsmäßig mit dem Kondensator verbunden ist. Ein erster Schalter verbindet die Stromversorgung funktionsfähig mit dem Magnetron, um das Magnetron gemäß einem ersten Impuls aufzuladen. Ein zweiter Schalter ist angeschlossen, um das Magnetron gemäß einem zweiten Impuls zu entladen.

Es kann als Aufgabe angesehen werden, Verfahren und Vorrichtungen vorzuschlagen, mit denen unter Nutzung des chopped HIPIMS Verfahrens auf besonders günstige Weise Beschichtungen mit vorteilhaften Eigenschaften abgeschieden werden können.

Zur Lösung der Aufgabe wird ein Beschichtungsverfahren gemäß Anspruch 1 und eine Beschichtungsvorrichtung gemäß Anspruch 19 vorgeschlagen, bei denen am zu beschichtenden Substrat eine Bias-Spannung mit einer speziellen Pulsform angelegt wird.

Abhängige Ansprüche beziehen sich auf jeweils vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung.

Erfindungsgemäß wird ein Beschichtungsverfahren bzw. eine Beschichtungsvorrichtung

vorgeschlagen zum Beschichten eines Körpers, auch bezeichnet als Substrat. Bei dem Substrat kann es sich insbesondere um ein Werkzeug handeln. Üblicherweise wird eine Vielzahl einzelner Körper gleichzeitig beschichtet.

- 5 Erfindungsgemäß ist eine Vakuumkammer mit zumindest einer Magnetron-Kathode mit einem Target vorgesehen, in der der Körper (Substrat) angeordnet wird. Durch Zuführung elektrischer Leistung zur der Magnetron-Kathode wird ein Plasma generiert, das Target zerstäubt und eine Beschichtung auf dem Körper abgeschieden, indem Bestandteile des Plasmas auf der Substratoberfläche abgelagert werden. Dabei wird die elektrische Leistung
- 10 gemäß dem HIPIMS-Verfahren pulsförmig zugeführt in Form von Kathodenpulsen, periodisch mit einer Periodendauer T . Gemäß der chopped HIPIMS Variante des Verfahrens ist dabei jeder Kathodenpuls unterteilt in mindestens zwei Kathodensubpulse, zwischen denen eine Kathodensubpulpause liegt, in der keine oder eine gegenüber den Kathodensubpulsen deutlich verringerte elektrische Leistung anliegt. Die Kathodenpulse bilden somit Sequen-
- 15 zen aus zeitlich beabstandeten Kathodensubpulsen.

- Die erfindungsgemäße Beschichtungsvorrichtung weist eine Vakuumkammer auf mit einer Aufnahme für den Körper und mit mindestens einer Magnetron-Kathode mit einem Target sowie eine elektrischen Kathoden-Leistungsversorgung und eine Steuervorrichtung. Die
- 20 Kathoden-Leistungsversorgung ist zur Zuführung elektrischer Leistung zu der Magnetron-Kathode gemäß dem HIPIMS-Verfahren ausgebildet, so dass Kathodenpulse periodisch innerhalb der Periodendauer T zum Generieren des Plasmas und Zerstäubung des Targets zugeführt werden. Die Steuervorrichtung ist ausgebildet zur Ansteuerung der elektrischen Kathoden-Leistungsversorgung, so dass einzelne, einige oder alle Parameter der der Magnetron-Kathode zugeführten elektrischen Leistung gesteuert werden können, insbesondere
- 25 Leistung, Frequenz, Pulsform und/oder -abfolge, etc. Die Steuervorrichtung ist ausgebildet zur Ansteuerung der elektrischen Kathoden-Leistungsversorgung gemäß einer solchen Sequenz, dass jeder der Kathode zugeführte Kathodenpuls mindestens zwei Kathodensubpulse und eine dazwischenliegende Kathodensubpulpause umfasst. Die Steuervorrichtung
- 30 kann insbesondere eine programmierbare Steuerung sein, mit der bevorzugt neben der Kathoden-Leistungsversorgung auch weitere Funktionen der Beschichtungsvorrichtung gemäß einem Beschichtungsprogramm zeitabhängig gesteuert werden, insbesondere eine Bias-Leistungsversorgung und/oder die Zuführung von Prozess- und/oder Reaktivgasen.

Die gemäß dem chopped HIPIMS-Verfahren vorgesehenen Sequenzen von Kathodensubpuls-
pulsen haben als Vorteil, dass die Gefahr der Ausbildung von elektrischen Bogenentladun-
gen verringert wird bzw. sich ausbildende Bogenentladungen durch eine folgende Subpuls-
5 pause beendet werden. Zudem kann durch die Sequenzen von Kathodensubpuls-
puls-
pausen eine noch höhere Ionisation des Plasmas erreicht werden als bei durchgängigen HIPIMS-
Kathodenpulsen.

Die Kathodenpulse werden dabei als Spannungspulse angelegt, so dass sich nachfolgende
10 Darstellungen und Angaben zu Dauer, Pulsform, Abfolge etc. stets auf eine Betrachtung der
Spannung an der Magnetron-Kathode beziehen. Der sich dabei einstellende Strom und
damit die elektrische Leistung hängen dabei von Verhältnissen im Plasma, insbesondere der
Ionisierung ab.

15 Die Kathodenpulse können verschiedene Sequenzen von Kathodensubpuls-
puls-
umfassen. Bevorzugt handelt es sich um Spannungspulse. Als vorteilhaft erwiesen haben sich Sequen-
zen von bspw. 2 – 10 Kathodensubpuls-
puls-
je Kathodenpuls, bevorzugt 3 – 8 Kathodensub-
puls-
puls-
puls-
weiter bevorzugt 4 – 6 Kathodensubpuls-
puls-
puls-
Die Dauer der Kathodensubpuls-
puls-
puls-
generell bspw. bei 4 – 80 μ s liegen, bevorzugt bei 5 – 50 μ s oder 6 – 35 μ s, besonders
20 bevorzugt bei 8 – 25 μ s. Dabei können, wie nachfolgend erläutert wird, die Kathodensubpuls-
puls-
puls-
se stets gleiche Dauer haben, wobei allerdings Sequenzen bevorzugt sind, innerhalb derer
Kathodensubpuls-
puls-
puls-
unterschiedliche Dauer haben.

Innerhalb der jeweiligen Sequenzen von Kathodensubpuls-
25 densubpuls-
puls-
pausen zwischen den Kathodensubpuls-
puls-
pausen. Die Dauer der Kathodensubpuls-
puls-
pausen ist bevorzugt im Mittel kürzer als die Dauer der Kathodensubpuls-
puls-
pausen. Bspw. kann die
Dauer der Kathodensubpuls-
puls-
pausen bei 2 – 30 μ s liegen, bevorzugt bei 5 – 25 μ s, besonders
bevorzugt bei 8 – 20 μ s. Dabei kann die Dauer der Kathodensubpuls-
puls-
pausen innerhalb der
Sequenz gleich oder unterschiedlich sein.

30

Erfindungsgemäß wird an den Körper eine Biasspannung in Form von Biasspannungs-
puls-
puls-
angelegt, die periodisch innerhalb der Periodendauer sind. Jeder Biasspannungs-
puls-
puls-
puls-
ist dabei unterteilt, d.h. umfasst mindestens zwei Biassubpuls-
puls-
puls-
und eine dazwi-

schenliegende Biassubpulpause.

Die am Substrat angelegte Bias-Spannung ist negativ, so dass positive Ionen des Plasmas in Richtung auf die Substratoberfläche beschleunigt werden. Im Gegensatz zur bekannten Verwendung einer Gleichspannung wird die Bias-Spannung gemäß der Erfindung pulsförmig angelegt, und zwar ebenfalls mit Sequenzen von einzelnen Biassubpulsen, jeweils mit Biassubpulpause(n) dazwischen. Die Frequenz bzw. Periodendauer der Pulsfolge der Bias-Spannung ist dabei dieselbe wie die der elektrischen Leistung bzw. Spannung an der Kathode.

10

Durch eine solche Vorgabe eines zum Zeitverlauf der Spannung an der Kathode synchronisierten Zeitverlaufs der Biasspannung ergeben sich insbesondere Steuerungsmöglichkeiten hinsichtlich einer Auswahl der die Beschichtung bildenden Bestandteile des Plasmas. Wie sich gezeigt hat, ist die Zusammensetzung der Ionen des Plasmas bei Betrieb der Kathode im chopped HIPIMS Verfahren, d.h. mit zeitlich beabstandeten Kathodensubpulsen, zeitabhängig, d.h. zu unterschiedlichen Zeitpunkten herrschen im Plasma unterschiedliche Ionen vor. Durch eine Abstimmung des zeitlichen Verlaufs der Bias-Spannung hierauf ergibt sich so die Möglichkeit der gezielten Auswahl an Typen von Ionen, die in die Schicht integriert werden.

20

Dies betrifft insbesondere eine durch geeignete zeitliche Abstimmung mögliche Beeinflussung der jeweiligen Menge an Metall- und Gasionen im Aufbau der Beschichtung. So konnte beobachtet werden, dass die im Plasma enthaltene Menge an Gasionen, insbesondere Ionen des Prozessgases, bspw. Argon, einen von der Menge an Metallionen abweichenden Zeitverlauf ab Start eines Kathodensubpulses aufweist. Durch geeignete Wahl von Dauer und Startzeitpunkt der Biassubpulse relativ zu den Kathodensubpulsen kann so die jeweilige Menge an Gas- und Metallionen in der Beschichtung gezielt eingestellt werden. Dabei hat insbesondere die Menge an dem als Prozessgas bevorzugt verwendeten Argon entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Beschichtung: So hat sich gezeigt, dass bei vergleichsweise hohen Argon-Anteilen Beschichtungen erzielbar sind mit sehr hoher Härte und hohen Eigenspannungen, d.h. harte und spröde Schichten, während Schichten ohne Argon oder mit geringerem Anteil im Vergleich eher duktil sind.

30

Die erfindungsgemäße Verwendung eines „chopped Bias“, d.h. einer unterteilten Bias-Spannung unterstützt auch einen Vorteil des chopped HIPIMS-Verfahrens, nämlich die Unterdrückung von Bogenentladungen (Arcs). Durch die Unterteilung der Kathodenpulse in zumindest zwei Kathodensubpulse mit einer Kathodensubpulpause dazwischen
5 wird die Ausbildung von Bogenentladungen gehemmt – aufgrund der Abschaltung der Leistung in der Kathodensubpulpause kann sich ein evtl. entstehender Lichtbogen nicht voll ausbilden und richtet so kaum Schäden an der Anlage (bspw. Targets) und vor allem an der Beschichtung des Körpers an. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Effekt zusätzlich unterstützt wird, wenn auch die Biasspannungspulse unterteilt sind und
10 mindestens eine Biassubpulpause je Periode aufweisen. In der Biassubpulpause ist auch die elektrische Leistung direkt am Körper verringert oder vollständig abgeschaltet, so dass u.U. beginnende Lichtbögen in ihrer Ausbildung gehemmt werden und erlöschen. Dies gilt nicht nur dann, wenn die Biassubpulpausen mit den Kathodensubpulpausen überlappen oder vollständig deckungsgleich sind, sondern auch im Fall einer
15 zeitlichen Verzögerung.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung betreffen insbesondere die zeitliche Abstimmung von Biasspannungspulsen und Kathodenpulsen bzw. von Biassubpulsen und Kathodensubpulsen.

20 Bevorzugt beginnt zumindest einer der Biassubpulse mit einer Verzögerungszeit nach dem Beginn eines der Kathodensubpulse, weiter bevorzugt können mehrere oder alle Biassubpulse jeweils mit einer Verzögerungszeit nach dem Beginn eines zugeordneten Kathodensubpulses beginnen. Bspw. können die Verzögerungszeiten mehrerer oder aller
25 Biassubpulse zu einem jeweils zugeordneten Kathodensubpuls gleich sein.

Die jeweiligen Sequenzen von Biassubpulsen und Kathodensubpulsen können zeitlich aufeinander abgestimmt sein, die Sequenzen müssen aber nicht deckungsgleich sein und können auch bspw. unterschiedliche Anzahl und Dauer der jeweiligen Subpulse aufweisen.
30 So kann bspw. der zeitliche Abstand zwischen zwei Biassubpulsen mit dem zeitlichen Abstand zweier Kathodensubpulse übereinstimmen, zumindest im Wesentlichen (d.h. Abweichungen bevorzugt weniger als von +/- 10%). Der zeitliche Abstand ist dabei bevorzugt zu messen zwischen dem jeweiligen Beginn von Biassubpulsen und Kathodensubpul-

sen. Die in dem Vergleich betrachteten Biassubpulse und Kathodensubpulse können zeitlich direkt aufeinanderfolgen oder es können weitere Biassubpulse bzw. Kathodensubpulse dazwischen angeordnet sein. Bevorzugt können eine, mehrere oder alle Biassubpuls-
5 pulspausen. zumindest im Wesentlichen gleich lange Dauer haben wie jeweils zugeordnete Kathoden-

Die Anzahl der Biassubpulse kann gleich der Anzahl der Kathodensubpulse sein oder hiervon abweichen. In einigen bevorzugten Ausführungen kann die Anzahl der Biassubpulse geringer sein als die Anzahl der Kathodensubpulse, d.h. nicht für jeden der Kathodensub-
10 pulse gibt es einen zugeordneten Biassubpuls. Bspw. können gezielt Biassubpulse nur zugeordnet zu Kathodensubpulsen höherer Leistung vorgesehen sein, während für einen oder mehrere Kathodensubpulse geringerer Leistung kein zugeordneter Biassubpuls vorge-
sehen ist.

15 Die Dauer der Biassubpulse und/oder der Biassubpuls-pausen kann bevorzugt im selben Intervall liegen die wie Dauer der Kathodenpulse bzw. Kathodensubpuls-pausen. Die Verzö-
gerungszeit zwischen dem Beginn eines Kathodensubpulses und dem Beginn eines zugeord-
neten Biassubpulses kann bspw. bei 5 - 200 μ s liegen, bevorzugt bei 10 - 150 μ s, besonders
bevorzugt bei 10 - 60 μ s.

20 Es ist möglich, dass sich die Biasspannungspulse zumindest zum Teil mit den Kathodenpul-
sen überschneiden, d.h. mindestens ein Teil jedes Biasspannungspulses kann zeitgleich mit
wenigstens einem Teil eines der Kathodenpulse anliegen. Dies ist jedoch nicht in allen
Fällen notwendig, es hat sich in einigen Anwendungen auch als vorteilhaft erwiesen, die
25 Biasspannungspulse gegenüber den Kathodenpulsen so weit zu verzögern, dass tatsächlich
keine zeitliche Überschneidung mehr stattfindet.

Die Sequenzen von Kathodensubpulsen und Biassubpulsen können aufeinander abgestimmt
sein, insbesondere kann jedem Kathodensubpuls ein Biassubpuls zugeordnet sein, der
30 bevorzugt mit einer zeitlichen Verzögerung beginnt und bspw. zumindest im Wesentlichen
gleiche Dauer hat. Somit kann die Anzahl der Biassubpulse gleich der Anzahl der Kathoden-
subpulse sein. Es kann aber auch bevorzugt sein, wenn die Anzahl der Biassubpulse geringer
ist als die Anzahl der Kathodensubpulse, so dass bspw. nicht jedem Kathodensubpuls,

sondern nur einigen der Kathodensubpulse ein Biassubpuls von bspw. zumindest im Wesentlichen gleicher Dauer zugeordnet sein kann, bspw. jeweils mit einer zeitlichen Verzögerung. Dies kann insbesondere bevorzugt sein im Fall von Kathodensubpulsen unterschiedlicher Dauer: Wenn bspw. in kurzen Kathodensubpulsen eine eher geringe Peak-Leistung
5 erreicht wird, kann es vorteilhaft sein, hierfür keinen zugeordneten Biassubpuls vorzusehen und somit auf eine Beschleunigung der bei der geringeren Peak-Leistung entstehenden Ionen auf den zu beschichtenden Körper hin zu verzichten.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform kann für die jeweilige Sequenz von Kathoden-
10 subpulsen die zeitliche Entwicklung des Plasmas und die Bildung und der Verlauf verschiedener Typen von Ionen betrachtet werden, um eine optimierte Sequenz von Biassubpulsen vorzugeben. So können bspw. Gas- und Metallionen separat betrachtet und eine Sequenz von Biassubpulsen so gewählt werden, dass gewünschte Typen von Ionen bevorzugt zur Bildung der Beschichtung verwendet werden. Besonders bevorzugt sind dies Metallionen.
15 Bspw. kann beobachtet werden, dass sich während und nach den Kathodenpulsen ein zeitabhängiger Verlauf des Auftretens verschiedener Typen von Ionen ergibt, und zwar von Gas- und Metallionen. Betrachtet man daraus einen Typ von Metallionen (wobei sich verschiedene Typen von Metallionen voneinander durch das jeweilige Metall unterscheiden und zusätzlich verschiedene Typen durch den Grad der Ionisation unterschieden werden
20 können), so kann in vielen Fällen hierfür ein Zeitverlauf festgestellt werden, der ein Maximum oder mehrere Maxima aufweist. Es ist dann bevorzugt, die Sequenz von Biassubpulsen so zu wählen, dass mindestens einer der Biassubpulse während mindestens eines Maximums anliegt. Weist der Zeitverlauf mehrere Maxima auf, werden bevorzugt zwei oder mehr Biassubpulse so angelegt, dass sie während jeweils mindestens einem der Maxima anliegen.
25 Weiter bevorzugt kann während eines zwischen zwei Maxima liegenden Minimums des Zeitverlaufs für mindestens einen Typ von Metallionen eine Subpulpause angeordnet sein. So ist es möglich, geeignete Sequenzen von Biassubpulsen so zu wählen, dass abgestimmt auf den zeitlichen Ablauf des Auftretens von Metallionen gewünschte Typen von Ionen ausgewählt und gegenüber anderen Ionen, insbesondere Gasionen, bevorzugt für den
30 Aufbau der Beschichtung genutzt werden.

Die Erfindung kann in verschiedenen Aspekten ergänzt und weitergebildet werden, bspw. durch einen Aspekt betreffend vorteilhafte Sequenzen von Kathodensubpulsen unterschied-

licher Dauer, einem Aspekt betreffend chopped HIPIMS Verfahren mit kurzer Periodendauer bzw. hoher Frequenz und einem Aspekt betreffend eine vorteilhafte Anlagentechnik mit einer Kapazität und einer Ladevorrichtung. Während jeder dieser Aspekte für sich individuelle Vorteile bietet, erweist sich insbesondere die Kombination von zwei oder mehr der
5 vorgeannten Aspekte als vorteilhaft.

Gemäß einem Aspekt als Weiterbildung der Erfindung unterscheiden sich zumindest zwei der Kathodensubpulse in ihrer Dauer. Die Kathodenpulse umfassen dabei zumindest einen ersten und einen zweiten Kathodensubpuls, die jeweils mindestens 8µs lang
10 andauern. Der erste und der zweite Kathodensubpuls unterscheiden sich in ihrer Dauer.

Dabei sind die Bezeichnungen „erster“ und „zweiter“ Kathodensubpuls zunächst allgemein so zu verstehen, dass der zweite Kathodensubpuls innerhalb der Sequenz von Kathodensubpulsen zeitlich später als der erste Kathodensubpuls auftritt, ohne dass notwendigerweise
15 der erste und zweite Kathodensubpuls unmittelbar aufeinander folgen müssen und unabhängig davon, ob der erste Kathodensubpuls der zeitlich erste Kathodensubpuls innerhalb der Sequenz an Kathodensubpulsen ist. Bevorzugt kann es sich aber bei dem genannten ersten Kathodensubpuls auch um den ersten, d.h. frühesten Kathodensubpuls innerhalb der Sequenz und bei dem genannten zweiten Kathodensubpuls um den unmittelbar nach der
20 anschließenden Kathodensubpulpause darauf folgenden Kathodensubpuls innerhalb der Sequenz handeln.

Durch eine derartige Variation der Dauer der Kathodensubpulse lässt sich das Plasma gezielt beeinflussen. Denn obgleich die angelegte Spannung in der die Kathodensubpulse trennenden Kathodensubpulpause auf oder nahe Null liegt, hat sich überraschend gezeigt,
25 dass sich das Plasma in aufeinanderfolgenden Kathodensubpuls unterschiedlich verhält, bspw. aufgrund von über die Kathodensubpulpause andauernder verbleibender Ionisation. Die vorgeschlagene Variation der Dauer der Kathodensubpulse ermöglicht es, derartige Effekte im Plasma zu nutzen und insbesondere optimierte Sequenzen von Kathodensubpuls
30 sen vorzugeben.

So kann bspw. eine Vorionisation durch einen oder mehrere kürzere Kathodensubpulse erreicht und in einem oder mehreren zeitlich – direkt oder beabstandet – nachfolgenden,

längeren Kathodensubpulsen die Vorionisation genutzt werden, um eine besonders hohe Spitzenleistung zu erreichen.

- Gemäß einer bevorzugten Ausführung ist der genannte erste Kathodensubpuls der zeitlich
5 erste Kathodensubpuls des Kathodenpulses, d.h. der Sequenz von Kathodensubpuls. Der
genannte zweite Kathodensubpuls folgt zeitlich später innerhalb der Sequenz, wobei er
unmittelbar auf den ersten Kathodensubpuls folgen kann oder weitere Kathodensubpulse
zeitlich zwischen dem ersten und zweiten Kathodensubpuls angeordnet sein können. Der
erste Kathodensubpuls ist dabei bevorzugt kürzer als der zweite Kathodensubpuls. Bspw.
10 kann die Dauer des zweiten Kathodensubpulses 110 % bis 600 % der Dauer des ersten
Kathodensubpulses betragen, bevorzugt 150% bis 400%, besonders bevorzugt 200% -
300%. Mit einer Sequenz solcher Kathodensubpulse kann während des zweiten Kathoden-
subpulses eine besonders hohe Spitzenleistung erzielt werden.
- 15 In bevorzugten Ausführungen kann der zweite Kathodensubpuls bspw. mindestens 15 μ s
andauern, bevorzugt mindestens 20 μ s, besonders bevorzugt mindestens 25 μ s. Der erste
Kathodensubpuls kann bspw. maximal 25 μ s andauern, bevorzugt maximal 20 μ s,
besonders bevorzugt maximal 15 μ s.
- 20 In Sequenzen mit mehr als zwei Kathodensubpuls ist bevorzugt, dass die Pulsdauern
zeitlich aufeinanderfolgender Kathodensubpulse monoton ansteigen, d.h. in der zeitlichen
Abfolge von einem zum nächsten Kathodensubpuls stets gleich oder länger dauern. Gemäß
einer bevorzugten Ausführung kann bspw. der Kathodenpuls einen dritten Kathoden-
subpuls umfassen, welcher zeitlich dem ersten und dem zweiten Kathodensubpuls nachfolgt
25 und mindestens so lange wie der erste und mindestens so lange wie der zweite Kathoden-
subpuls andauert.

- Gemäß einem Aspekt als Weiterbildung der Erfindung wird das chopped HIPIMS
Verfahren bei einer ungewöhnlich kurzen Periodendauer von maximal 1,5 ms, d.h.
30 ungewöhnlich hoher Frequenz der Pulse an der Magnetron-Kathode von mindestens 667
Hz durchgeführt. Übliche Implementationen des HIPIMS Verfahrens gehen von deutlich
geringerer Frequenz bzw. höherer Periodendauer aus. Die Erfinder haben erkannt, dass
durch das chopped HIPIMS Verfahren mit stark erhöhten Peak-Leistungen übertra-

schend auch die kurzen Periodendauern möglich und vorteilhaft sind. So sind sogar noch kürzere Periodendauern von bevorzugt 1,25 ms oder weniger (entspricht einer Frequenz von mindestens 800 Hz) oder 1 ms oder weniger (entspricht einer Frequenz von mindestens 1 kHz) möglich. In einigen Ausführungen sind sogar noch kürzere Periodendauern von 0,2 – 0,6 ms (1,7 - 5 kHz) anwendbar.

Bei den somit ungewöhnlich hohen Frequenzen wird die Leistung innerhalb sehr kurzer Zeiträume, dafür mit außergewöhnlich hoher elektrischer Peak-Leistung abgegeben, woraus eine hohe Ionisierung folgt. Als Vorteil der hohen Frequenz erweist sich vor allem eine hohe Abscheiderate, d.h. gegenüber geringeren Frequenzen ein schnellerer Schichtaufbau. Dies trägt entscheidend zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und der Vorrichtung bei industriellem Einsatz bei.

Der Kathodenpuls selbst, also die Gesamtdauer der Sequenz aus Kathodensubpulsen und damit die Zeit, innerhalb die elektrische Leistung in Form von Kathodensubpulsen anliegt, nimmt dabei bevorzugt nur einen geringen Teil der Periodendauer ein, bspw. weniger als die halbe Periodendauer und besonders bevorzugt maximal ein Drittel der Periodendauer. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn die Kathodenpulse aus einer geladenen Kapazität gespeist werden. Die Kapazität entlädt sich somit während der einzelnen Kathodensubpulse während der Gesamtdauer der Kathodenpulse und wird während der restlichen Periodendauer wieder aufgeladen. Durch eine Beschränkung der Dauer der Kathodenpulse kann so eine ausreichende Zeit zum Laden der Kapazitäten zur Verfügung gestellt werden. Die Dauer des Kathodenpulses liegt bevorzugt im Bereich von 30 µs – 400 µs, besonders bevorzugt bei 80µs – 300µs.

Gemäß einem Aspekt als Weiterbildung der Erfindung wird die elektrische Leistung, die in Form der Kathodensubpulse der Kathode zugeführt wird, aus zumindest einer geladenen Kapazität einer Kathoden-Leistungsversorgung bereitgestellt. Die Kathoden-Leistungsversorgung umfasst eine Kapazität, bevorzugt bereitgestellt in Form einer Mehrzahl von einzelnen, parallel geschalteten Kapazitäten (Kondensatorbank), sowie eine Ladevorrichtung hierfür.

Ein solcher Aufbau hat sich als besonders geeignet erwiesen um elektrische Leistung gemäß

dem chopped HIPIMS Verfahren bereitzustellen. Dabei kann bevorzugt die gesamte elektrische Leistung aller Kathodensubpulse aus derselben Kapazität geliefert werden, wobei die elektrische Verbindung zur Kathode mittels eines Schalters während der Dauer der Kathodensubpulse geschlossen und während der Kathodensubpulpause(n) sowie während der
5 restlichen Periodendauer getrennt wird. Der Schalter ist bevorzugt durch die Steuervorrichtung ansteuerbar, bspw. kann es sich um einen IGBT handeln. Die Ladevorrichtung kann zumindest während der Periodendauer außerhalb der Kathodenpulse elektrische Leistung an die Kapazität liefern, um diese aufzuladen, bevorzugt auch während der Kathodensubpulpause(n). Besonders bevorzugt kann die Ladevorrichtung ständig mit der Kapazität
10 verbunden bleiben, so dass sie während der Kathodensubpulse bspw. parallel geschaltet ist.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform kann die Ladevorrichtung leistungskonstant geregelt werden, d.h. so ausgebildet, dass die der Kapazität (bzw. während des Pulses ggfs. einer Parallelschaltung aus Kapazität und Kammer) zugeführte, zeitlich gemittelte Leistung
15 auf einen festen Wert eingestellt wird. Dies hat sich gegenüber alternativ möglichen Konzepten wie bspw. die Einstellung einer festen Spannung, auf die die Kapazität aufgeladen wird, als besonders stabil erwiesen.

Die verschiedenen Aspekte und Weiterbildungen der Erfindung sind jeweils einzeln vorteilhaft, besonders jedoch in Kombination. Nachfolgend werden einige bevorzugte Ausführungen angegeben, die mit jedem einzelnen der Aspekte, ebenso aber auch mit Kombinationen von beliebigen zwei, drei oder aller vier Aspekte verwendbar sind.
20

Gemäß einer Weiterbildung ist der Kathodenpuls ein Spannungspuls mit einem Spitzenwert von 600 – 1200 V. Während die Werte im Einzelnen je nach Ausführung abweichen können, hat sich dieser Bereich des Spannungswertes als bevorzugt erwiesen.
25

Die Kathodensubpulse können verschiedene Verläufe und Pulsformen aufweisen, bspw. als Dreieckpulse. Bevorzugt sind die Kathodenpulse zumindest im Wesentlichen Rechteckpulse oder Trapezpulse, d.h. sie weisen einen Zeitverlauf mit steiler ansteigender sowie abfallender Flanke und dazwischen einen annähernd linearen Verlauf auf. Insbesondere im bevorzugten Fall der Speisung der Kathodenpulse aus einer geladenen Kapazität entspricht bei
30 näherer Betrachtung der Verlauf einer Entladungskurve, wobei allerdings bevorzugt ein so

- kurzer Abschnitt der Entladungskurve gewählt wird, dass der Verlauf von einem linearen Verlauf zwischen einer Anfangsspannung (nach der steilen Anstiegsflanke) zu einer Endspannung (vor der steilen abfallenden Flanke) bevorzugt an keiner Stelle mehr als 20%, besonders bevorzugt nicht mehr als 10% abweicht. Dabei hat es sich als vorteilhaft erwiesen, dass der Verlauf zwischen Anfangsspannung und Endspannung zumindest im Wesentlichen konstant ist, worunter hier verstanden wird, dass sich der Spannungswert nicht mehr als bevorzugt maximal 25%, besonders bevorzugt maximal 20% ändert. Derartige Pulse werden hier im Wesentlichen als Rechteckpulse angesehen.
- 10 In bevorzugten Ausführungen liegt die Spitzenleistung mindestens einer der Kathodensubpulse bei mindestens 50 kW. Weiter bevorzugt können deutlich höhere Peak-Leistungen erreicht werden, bspw. von mehr als 100 kW, von 200 kW oder höher, besonders bevorzugt von 300 kW oder höher. Es hat sich gezeigt, dass die Höhe der maximalen Peakleistung von Kathodensubpulsen einen wesentlichen Einfluss auf die Ionisation von Metallen des Targetmaterials hat. So zeigen bspw. Untersuchungen, dass bei Titan-Targetmaterial das Verhältnis von ionisierten zu nicht-ionisierten Teilchen (Ti^+/Ti) bei maximaler Peakleistung eines Kathodensubpulses von knapp 500 kW fast doppelt so hoch ist wie wenn die höchste Peakleistung der Kathodensubpulse bei 150 kW liegt.
- 15 20 Bevorzugt steigt die während der Kathodensubpulse erreichte Spitzenleistung innerhalb der zeitlichen Sequenz des Kathodenpulses an. Gemäß einer bevorzugten Ausführung kann bspw. der Kathodenpuls zumindest einen ersten Kathodensubpuls und einen zweiten, zeitlich nachfolgenden Kathodensubpuls umfassen. Der zweite Kathodensubpuls kann dem ersten Kathodensubpuls (nach einer dazwischen liegenden Kathodensubpulpause) zeitlich unmittelbar folgen, oder es können weitere Kathodensubpulse dazwischen angeordnet sein. Bevorzugt ist dann, dass die Spitzenleistung während des zweiten Kathodensubpulses um mindestens 30% höher ist als während des ersten Kathodensubpulses. Auf diese Weise können insgesamt besonders hohe Peak-Leistungen erreicht werden.
- 25 30 Die Erfindung ist mit verschiedensten Targetmaterialien sowie Materialkombinationen vorteilhaft anwendbar. Das Target kann sowohl metallische als auch nicht-metallische Materialien umfassen. Bevorzugt ist mindestens eines der Bestandteile des Targets ausgewählt aus der Gruppe umfassend die Materialien aus den Gruppen 4 - 6 des Periodensys-

tems sowie zusätzlich Bor, Kohlenstoff, Silizium, Yttrium und Aluminium. Bevorzugt sind alle Bestandteile des Targets aus der genannten Gruppe ausgewählt. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren sowie der erfindungsgemäßen Vorrichtung können Beschichtungen aus verschiedenen Materialsystemen erzeugt werden, die durch die Target-Bestandteile sowie
5 ggfs. gasförmig zugeführte Bestandteile gebildet werden. So kann insbesondere neben einem Prozessgas auch ein Reaktivgas wie bspw. Stickstoff, ein kohlenstoffhaltiges Gas oder Sauerstoff eingesetzt werden.

Die an den zu beschichtenden Körper angelegte Bias-Spannung ist bevorzugt gepulst mit
10 Biasspannungspulsen, die synchron zu den Kathodenpulsen sind, d.h. mit gleicher Frequenz und fester Phasenbeziehung angelegt werden. Dabei ist bevorzugt, dass ihre Lage und Dauer so gewählt ist, dass gezielt Typen von Ionen ausgewählt werden. Die Lage und/oder Dauer kann gewählt werden abhängig von einem Verlauf des Auftretens mindestens eines Typs von Metallionen während und nach den Kathodenpulsen, der zumindest ein Maximum
15 aufweist. Dann ist bevorzugt, dass der Biaspuls während dieses Maximums anliegt.

Nachfolgend werden Ausführungsformen der Erfindung anhand von Zeichnungen näher beschrieben. Dabei zeigen:

- | | | |
|----|-------------|--|
| 20 | Fig. 1 | in einer schematischen Darstellung eine Draufsicht auf eine Beschichtungsanlage als Ausführungsform der Erfindung; |
| | Fig. 2 | eine Wendeschneidplatte als zu beschichteten Körper; |
| | Fig. 3 | in einer schematischen Schnittansicht eine Beschichtung auf einem Substratmaterial; |
| 25 | Fig. 4 | ein Schaltbild einer Ausführungsform einer HIPIMS-Leistungsversorgung; |
| | Fig. 5a,5b | schematisch dargestellte Zeitverläufe einer Kathodenspannung sowie einer Bias-Spannung über die Zeit; |
| | Fig. 6a, 6b | gemessene Zeitverläufe von Kathodenspannung und Kathodenstrom sowie Menge und Typen von Ionen für ein erstes Ausführungsbeispiel; |
| 30 | Fig. 7a, 7b | gemessene Zeitverläufe von Kathodenspannung und Kathodenstrom sowie Menge und Typen von Ionen für ein zweites Ausführungsbeispiel; |

- spiel;
- Fig. 8a, 8b gemessene Zeitverläufe von Kathodenspannung und Kathodenstrom sowie Biasspannung und Biasstrom gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel;
- 5 Fig. 9a, 9b gemessene Zeitverläufe von Kathodenspannung und Kathodenstrom sowie Biasspannung und Biasstrom gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel;
- Fig. 10a, 10b Diagramme von gemessenen Zeitverläufen elektrischer Größen gemäß einem fünften und sechsten Beispiel;
- 10 Fig. 11a, 11b Diagramme von gemessenen Zeitverläufen elektrischer Größen gemäß einem siebten und achten Beispiel;
- Fig. 12 schematische Darstellung der Ausrichtung eines zu beschichtenden Körpers zu einem Target eine Kathode;
- Fig. 13a, 13b REM-Aufnahmen der Bruchmorphologie einer Beschichtung auf Frei-
 15 fläche und Spanfläche eines Körpers gemäß einem Vergleichsbeispiel;
- Fig. 14a, 14b REM-Aufnahmen der Bruchmorphologie einer Beschichtung auf Frei-
 fläche und Spanfläche eines Körpers gemäß einem Ausführungsbeispiel.
- 20 In Fig. 1 sind schematisch Bestandteile einer Ausführungsform einer PVD-Beschichtungsanlage 10 dargestellt. Ein Innenraum 20 einer Vakuum-Kammer 12 kann durch einen Abzug 14 zur Erzeugung eines Vakuums evakuiert werden. Durch einen Zugang 16 kann ein Prozessgas, bevorzugt ein Edelgas oder Mischung verschiedener Edelgase eingelassen werden, bspw. Argon und/oder Krypton. Durch einen Zugang 18 kann ein
 25 Reaktivgas wie bspw. Stickstoff eingelassen werden. In alternativen Ausführungen können die Einlässe 16, 18 auch durch einen gemeinsamen Einlass für ein Prozessgas und ein Reaktivgas ersetzt sein.
- Im Innenraum 20 der Vakuum-Kammer 12 sind in einer beispielhaften Bestückung vier
 30 Magnetron-Kathoden 22a, 22b, 22c, 22d angeordnet, jeweils mit plattenförmigen Sputter-Targets 24a, 24b, 24c, 24d. Die Magnetron-Kathoden 24a, 24b, 24c, 24d sind jeweils an eine steuerbare elektrische HIPIMS Leistungsversorgung 26a, 26b, 26c, 26d angeschlossen, mittels derer eine elektrische Spannung gegenüber der elektrisch leitenden Wandung der

Vakuum-Kammer 12 angelegt werden kann, wie nachfolgend im Detail erläutert wird.

5 Dabei sind die in Fig. 1 gezeigte Anordnung von vier Magnetron-Kathoden 22a, 22b, 22c, 22d sowie deren Verschaltung beispielhaft zu verstehen. In alternativen Ausführungsformen können andere Elektrodenkonfigurationen vorgesehen sein, bspw. nur eine Magnetron-Kathode 22, zwei, drei oder mehr als vier. Zusätzlich oder alternativ zu den gezeigten Magnetron-Kathoden 22a, 22b, 22c, 22d, die jeweils an HIPIMS-Leistungsversorgungen 26a, 26b, 26c, 26d angeschlossen sind, können auch Kathoden anderen Typs vorgesehen sein, bspw. DC-Magnetron-Kathoden, die an Gleichspannungs-Leistungsversorgungen
10 angeschlossen sind. Die Magnetron-Kathoden können elektrisch statt wie beispielhaft gezeigt gegen die Wandung der Vakuum-Kammer 12 alternativ anders angeschlossen sein, bspw. gegen eine separate Anode (nicht dargestellt).

Die Leistungsversorgungen 26a, 26b, 26c, 26d sind in Fig. 1 jeweils lediglich schematisch
15 dargestellt. Fig. 4 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild einer HIPIMS Leistungsversorgung 26a. Diese umfasst als Kapazität 48 eine Kondensatorbank aus einer Anzahl parallel geschalteter Kondensatoren, eine Ladevorrichtung 46 für die Kapazität 48 und einen steuerbaren Schalter 36, der bevorzugt als IGBT ausgebildet ist.

20 In der dargestellten Ausführung ist die Ladevorrichtung 46 eine leistungsgeregelte Spannungsquelle, die parallel zur Kapazität 48 angeschlossen ist. Die Kapazität 48 ist über den Schalter 36 mit Ausgangsanschlüssen 28 der HIPIMS Leistungsversorgung 26a verbunden. Bei geöffnetem Schalter 36 lädt die Ladevorrichtung 46 die Kapazität 48 auf. Bei geschlossenem Schalter wird die in der Kapazität 48 gespeicherte Ladung an den Ausgangsanschlüssen 28 bereitgestellt, d.h. der Magnetron-Kathode 22a zugeführt (Fig. 1), wobei zusätzlich
25 auch die parallel geschaltete Ladevorrichtung 46 Leistung bereitstellt. Der Schalter 36 wird dabei über die Ansteuerung 38 von einer Steuerung 50 der Anlage 10 gesteuert.

Die Magnetron-Kathoden 22a, 22b, 22c, 22d sind mit ihren Sputter-Targets 24a, 24b, 24c,
30 24d in Richtung der Mitte der Vakuum-Kammer 12 ausgerichtet. Dort befindet sich ein drehbarer Substrat-Tisch 30, auf dem eine Anzahl von drehbaren Substratträgern 32 zum Tragen von Substraten 40, d.h. zu beschichtender Körpern angeordnet sind. Im gezeigten Beispiel sind als Substrate Wendeschneidplatten 40 wie in Fig. 2 dargestellt chargiert. Die

Substrate 40 bestehen aus einem Substratmaterial 42, bspw. im Fall der Wendeschneidplatten 40 aus WC/Co Sintermaterial. Dabei handelt es sich lediglich um ein Beispiel eines zu beschichtenden Substrats 40; alternativ können Bauteile oder Werkzeuge verschiedener Form und verschiedener Materialien beschichtet werden.

5

Die Substrate 40 sind über die Substratträger 32 elektrisch mit dem Substrat-Tisch 30 verbunden. Am Substrattisch 30 ist eine steuerbare Bias-Leistungsversorgung 34 angeschlossen, mittels derer eine elektrische Bias-Spannung V_B gegenüber der Wandung der Vakuum-Kammer 12 an den Substrattisch 30 und somit die Substrate 40 angelegt werden
10 kann. Hierdurch ergibt sich ein Ionenstrom im Plasma, der am Anschluss des Substrattisches als Bias-Strom I_B messbar ist. Dabei ist der Anschluss der Bias-Leistungsversorgung gegen die Wandung der Vakuum-Kammer beispielhaft zu verstehen, alternativ kann diese auch gegen eine separate Anode geschaltet sein.

15 Die HIMPS-Leistungsversorgungen 26a, 26b, 26c, 26d, Bias-Leistungsversorgung 34 sowie Pumpen (nicht dargestellt) an den Ein- und Auslässen 14, 16, 18 sind jeweils an die zentrale Steuerung 50 der Anlage 10 angeschlossen. Die zentrale Steuerung 50 ist programmierbar, so dass sämtliche Parameter der im Innenraum 20 der Vakuumkammer 12 ablaufenden Vorbehandlungs- und Beschichtungsverfahren durch die Steuerung 50 gemäß einem
20 festgelegten und gespeicherten zeitabhängigen Steuerprogramm gesteuert werden. Dabei kann das Steuerprogramm geändert werden und die Steuerung 50 kann mehrere unterschiedliche Steuerprogramme speichern, die selektiv abgerufen werden können. Soweit nachfolgend auf Abläufe und Einstellungen im Betrieb der Anlage 10 Bezug genommen wird, sind diese in einem Steuerprogramm vorgegeben, das durch die Steuerung 50 ausge-
25 führt wird.

Im Betrieb der Anlage 10 wird – nach Vorgabe durch das jeweilige in der Steuerung 50 ablaufende Steuerprogramm – zunächst ein Vakuum im Innenraum 20 der Vakuum-Kammer 12 erzeugt und es erfolgt ein Einlass von Prozessgas, bevorzugt Argon. Dann erfolgt
30 eine Vorbehandlung der Substrate 40 mittels Ionen-Ätzen. Beim Ätzen wird die Bias-Leistungsversorgung 34 so angesteuert, dass sie eine hohe (negative) Bias-Spannung V_B liefert, durch die (positive) Ionen auf das Substrat beschleunigt werden. Dabei können Gas- und/oder Metallionen zum Ätzen verwendet werden und es sind verschiedene Abläufe

möglich.

In einer bevorzugten Ausführung erfolgt zunächst ein Gasionenätzen ohne den Betrieb der Magnetron-Kathoden 20 im HIPIMS-Betriebsmodus. Das Gasionenätzen kann als DC-
5 Ätzen ausgeführt werden unter Anlegen einer Bias-Spannung I_B als Gleichspannung bspw. im Bereich von -100 bis -400 V, oder alternativ als MF-Ätzen (Bias-Spannung I_B -100 bis -700 V). Beim DC-Ätzen werden die Elektronen durch eine Hohlkathode (nicht dargestellt) erzeugt und an einer Anode (nicht dargestellt) abgeführt. Der Substrattisch 30 liegt zwischen der Anode und Hohlkathode. Beim MF-Ätzen ist eine MF Leistungsversorgung (nicht
10 dargestellt) für die Erzeugung der Elektronen verantwortlich, die wiederum das Gas ionisieren. Diese Elektronen werden an der Wandung der Vakuumkammer 12 (Betriebsmasse) abgeführt.

Nach dem Gasionenätzen kann bevorzugt ein Metallionenätzen zur weiteren Verbesserung
15 der Haftung genutzt werden. Dabei werden bspw. eine oder zwei der Magnetron-Kathoden 22a-d (bestückt bspw. mit Targets aus Cr, Ti, V) im HiPIMS-Betriebsmodus betrieben mit so hoher Peakleistung, dass das Spendermaterial ionisiert wird. Zusätzlich wird eine Biasspannung V_B entweder als Gleichspannung (DC) oder gepulst angelegt, wobei Pulse der Biasspannung V_B zu den Kathodenpulsen synchronisiert sein können. Die Bias-Spannung
20 V_B liegt bevorzugt zwischen -300 bis -1200 V.

Anschließend wird auf die somit vorbehandelte Substratoberfläche eine Beschichtung 44 (Fig. 3) abgeschieden. Dafür werden die HIMPS-Leistungsversorgungen 26a, 26b, 26c, 26d sowie die Bias-Leistungsversorgung 34 zur Lieferung geeigneter Bias-Spannung V_B sowie
25 Kathodenspannungen V_C angesteuert; Beispiele hierfür werden nachfolgend erläutert. Die Einlässe 16, 18 werden zur Zuführung von Prozessgas (Argon) sowie ggfs. Reaktivgas (bspw. Stickstoff) angesteuert. Im Innenraum 20 der Vakuum-Kammer 12 wird so ein Plasma erzeugt, unter dem die Targets 24a zerstäubt werden. Positive Ionen des Plasmas werden durch die negative Bias-Spannung V_B auf die Oberfläche der Substratmaterialien 42 der
30 Substrate 40 hin beschleunigt und bilden dort die Beschichtung 44 (Fig. 3).

Dabei wird die von den HIMPS-Leistungsversorgungen 26a, 26b, 26c, 26d den Magnetron-Kathoden 22a, 22b, 22c, 22d elektrische Leistung gemäß dem HIPIMS-Verfahren in perio-

dischen Pulsen zugeführt. Dabei wird die elektrische Leistung gemäß dem chopped HIPIMS-Verfahren bspw. wie in Fig. 5a, 5b schematisch für den Verlauf der Spannung V_{C1} an der ersten Magnetron-Kathode 22a dargestellt in Form von Kathodenpulsen 60 einer Pulsdauer P zugeführt, die ihrerseits unterteilt sind in – im gezeigten Beispiel von Fig. 5a
5 drei und in Fig. 5b vier – Kathodensubpulse 62 mit Pulsdauern P_1, P_2, P_3, P_4 . Zwischen den Kathodensubpulsen 62 sind Kathodensubpulspausen 64 mit Zeitdauern Z_1, Z_2, Z_3 , in denen keine Spannung anliegt. Die Kathodenpulse 60 sind periodisch mit einer Frequenz f bzw. einer Periodendauer T . Nach dem Ende der Kathodenpulse 60 liegt für den Rest der Periodendauer T ebenfalls keine Spannung an.

10

Im Beispiel Fig. 5a umfasst die Sequenz der Kathodenpulse 60 drei Kathodensubpulse 62 mit jeweils gleicher Dauer P_1, P_2, P_3 . Im Beispiel von Fig. 5b ist eine andere Sequenz von Kathodensubpulsen 62a, 62b gezeigt mit zunächst zwei kürzeren Kathodensubpulsen 62a und danach zwei längeren Kathodensubpulsen 62b.

15

Die in Fig. 5a, 5b gezeigten Pulssequenzen der Spannung V_{C1} an der Magnetron-Kathode werden durch Ansteuerung der HIPIMS-Leistungsversorgungen 26a-d von der Steuerung 50 vorgegeben, und zwar durch geeignete Ansteuerung der Schalter 36 in den HIPIMS-Leistungsversorgungen 26a-d. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der Darstellung
20 in Fig. 5a, 5b vereinfachend um idealisierte Rechteck-Pulsformen handelt, während tatsächliche Spannungsverläufe, wie nachfolgend diskutiert und separat gezeigt wird, hiervon abweichen. Insbesondere zeigen die realen Pulsformen über die Dauer der Kathodensubpulse einen gewissen Abfall in Form einer Entladekurve der Kapazität 48, allerdings mit einer gewissen Nachladung durch die Ladevorrichtung 46 während der Kathodensubpulspausen
25 64.

Die Bias-Spannung V_B kann während der Beschichtungsdauer je nach Ausführung verschiedene Zeitverläufe aufweisen. Insbesondere kann die Bias-Spannung V_B als Gleichspannung oder gepulst angelegt werden. Beispiele von bevorzugten Ausführungen sind schematisch in
30 Fig. 5a, 5b gezeigt.

Im Beispiel von Fig. 5a wird die Bias-Spannung V_B in Form von drei Biaspulsen 66 einer Gesamtdauer B angelegt wird, wobei die Biaspulse 66 mit derselben Frequenz bzw. Perio-

dendauer T periodisch sind wie die Kathodenpulse 60. Wie die Kathodenpulse 60 sind auch die Biaspulse 66 unterteilt, nämlich in Biassubpulse 68 der jeweiligen Dauer B_1, B_2, B_3 mit dazwischen Biassubpulpasen 70 der jeweiligen Dauer Z_{B1}, Z_{B2} . Dabei entspricht die Sequenz der Biassubpulse 68 innerhalb jedes Biaspulses 66 der Sequenz der Kathodensubpulse 64 innerhalb jedes Kathodenpulses 60, d.h. jedem Kathodensubpuls 64 ist ein Biassubpuls 68 gleicher Dauer zugeordnet, allerdings zeitlich versetzt, nämlich jeweils um eine Verzögerungszeit T_D verzögert.

Im Beispiel von Fig. 5b wird die Bias-Spannung V_B in Form von nur zwei Biassubpulsen 66 innerhalb jeder Periodendauer T angelegt. Dabei entspricht die Sequenz der Biassubpulse 66 nur zum Teil der Sequenz der Kathodensubpulse 64a, 64b, denn nicht jedem Kathodensubpuls 64 ist ein Biassubpuls 68 zugeordnet: Den beiden ersten, kürzeren Kathodensubpulsen 64a ist kein Biassubpuls zugeordnet, während dem längeren dritten und vierten Kathodensubpuls jeweils um eine Verzögerungszeit T_D verzögert zugeordnete Biassubpulse 68 gleicher Dauer folgen.

Die in Fig. 5a, 5b gezeigten Pulssequenzen der Bias-Spannung V_B sind ebenfalls idealisiert gezeigt. Wie die Pulssequenzen der Kathodenspannung V_C werden sie von der Steuerung 50 durch geeignete Ansteuerung der Bias-Leistungsversorgung 34 vorgegeben. Diese umfasst ebenfalls einen steuerbaren Schalter (nicht dargestellt), durch den je nach Ausführung entweder bevorzugt wie bei der HIPIMS-Leistungsversorgung 26a eine Kondensatorbank selektiv mit dem Ausgang verbunden wird oder alternativ direkt eine Gleichspannungsquelle.

Anhand eines ersten Beispiels (Fig. 6a, 6b) sowie eines zweiten Beispiels (Fig. 7a, 7b) wird nachfolgend gezeigt, wie durch geeignete Synchronisation der Biaspulse 66 und Biassubpulse 68 mit den Kathodenpulsen 60 und Kathodensubpuls 62 die Zusammensetzung der Beschichtung 44 beeinflusst werden kann:

Im ersten Beispiel zeigt Figur 6b beispielhaft für eine Magnetron-Kathode mit einem Target aus Titan sowie unter Zuführung von Stickstoff als Reaktivgas sowie Argon als Prozessgas für einige Typen von im Plasma gebildeten Ionen den jeweiligen zeitlichen Verlauf nach Anlegen eines Kathodenpulses 60 mit dem in Fig. 6a gezeigten Verlauf mit zwei Kathoden-

subpulsen 62 einer Dauer P_1 , P_2 von je 20 μs mit einer Kathodensubpulpause 64 einer Dauer Z_1 von 30 μs zwischen den Kathodensubpulsen 62.

Wie dargestellt enthält das Plasma verschiedene Spezies von Metall- und Gasionen, wobei
5 allerdings nur für vier Typen von Ionen die jeweiligen Zeitverläufe dargestellt sind: Ti^+ , Ti^{2+} , N_2^+ und N^+ . Diese zeigen unterschiedliche Zeitverläufe. So zeigen die Ti^+ Metall-Ionen ein ausgeprägtes Maximum bei ca. 120 μs nach Beginn des Kathodenpulses 60. Dies ist insbesondere bemerkenswert, da die Gesamtdauer P des Kathodenpulses 60 nur 70 μs beträgt.

10 Es lässt sich wie schematisch dargestellt ein Zeitabschnitt 72 definieren, in dem die Ti^+ Metall-Ionen vorherrschen.

Durch die negative Bias-Spannung V_B werden die positiven Gas- und Metallionen des Plasmas in Richtung auf die Oberfläche des Substratmaterials 42 beschleunigt und werden
15 so Teil der sich dort anlagernden Beschichtung 44. Im Fall eines DC-Bias, d.h. einer durchgängigen Gleichspannung als Bias-Spannung V_B , werden unterschiedslos alle Ionen für den Schichtaufbau ausgewählt. Bei einem gepulsten Zeitverlauf der Bias-Spannung V_B , der synchron ist zum Zeitverlauf der Spannung V_C an den Magnetron-Kathoden 22a-d, wie in Fig. 5a, 5b gezeigt, kann durch geeignete Wahl der zeitlichen Synchronisation, d.h. der
20 Verzögerungszeit T_D und der Dauer der jeweiligen Bias-Subpulse 68, unter den im Plasma zu verschiedenen Zeitpunkten vorhandenen Gas- und Metallionen eine Auswahl getroffen werden.

So kann im ersten Beispiel von Fig. 6a, 6b die Bias-Spannung V_B bspw. nur während des
25 Zeitabschnitts 72 angelegt werden, in dem Ti^+ -Ionen ein Maximum erreichen. In diesem Fall kann die Bias-Spannung V_B in Form von durchgehenden Bias-Pulsen 66 angelegt werden, die nicht in Bias-Subpulse 68 unterteilt sind.

Im zweiten Beispiel von Fig. 7a, 7b sind die Verhältnisse entsprechend der Darstellung des
30 ersten Beispiels gezeigt, ebenfalls für eine Magnetron-Kathode 22a mit einem Target aus Titan sowie unter Zuführung von Stickstoff als Reaktivgas und Argon als Prozessgas. Wie in Fig. 7a dargestellt umfasst im zweiten Beispiel der Kathodenpuls 60 zwei Kathodensubpulse 62 unterschiedlicher Dauer $P_1 = 10 \mu\text{s}$ und $P_2 = 20 \mu\text{s}$ mit einer Kathodensubpulpause 64

einer Dauer Z_1 von 18 μs zwischen den Kathodensubpulsen 62.

Wie in Fig. 7b dargestellt zeigen sich für die in Fig. 7a gezeigte Sequenz von Kathodensubpulsen 62 Zeitverläufe der verschiedenen Typen von Ionen Ti^+ , Ti^{2+} , N_2^+ und N^+ , die voneinander abweichen. Die Zeitverläufe unterscheiden sich von den in Fig. 6b gezeigten Zeitverläufen für die in Fig. 6a gezeigte Sequenz von Kathodensubpulsen 62. In Fig. 7b zeigen insbesondere die Ti^+ -Ionen zwei Maxima bei etwa $t = 30 \mu\text{s}$ und $t = 90 \mu\text{s}$ mit einem dazwischen liegenden Minimum ca. bei $t = 50 \mu\text{s}$. Auch hier liegt das zweite, höhere Maximum nach dem Ende des Kathodenpulses bei $t = 48 \mu\text{s}$.

In Fig. 7b lassen sich somit - abweichend vom ersten Beispiel gemäß Fig. 6b - zwei separate Zeitabschnitte 72 definieren, in denen die Ti^+ Metall-Ionen vorherrschen.

Entsprechend kann im zweiten Beispiel von Fig. 7a, 7b die Bias-Spannung V_B bspw. in Form von zwei Biassubpulsen 68 angelegt werden, die jeweils während der Zeitabschnitte 72 anliegen, wobei dazwischen im Bereich von ca. 40 – 70 μs eine Biassubpulpause 70 liegt. So wird durch gezielte Wahl einer geeigneten Sequenz von Biassubpulsen 68 ein hoher Anteil an Ti^+ -Ionen in der sich bildenden Beschichtung 44 sichergestellt.

Somit kann mittels der zeitlichen Synchronisation (Dauer B_1 , B_2 , ... B_n der Biassubpulse 68 sowie Anfangszeit der Biassubpulse 68, bspw. jeweils gerechnet ab Beginn des Kathodenpulses 60, oder im Fall der Zuordnung von Kathodensubpulsen 62 und Biassubpulsen 68 durch die jeweilige Verzögerungszeit T_D) die Zusammensetzung der Beschichtung 44 vorgegeben und die Schichteigenschaften erheblich beeinflusst, werden. Insbesondere bei Berücksichtigung des Anteils am Prozessgas Argon in der Beschichtung 44 (wobei allerdings der Zeitverlauf von Ar-Ionen in den Beispielen von Fig. 6b, 7b nicht dargestellt ist) können die Eigenschaften insbesondere im Hinblick auf Eigenspannungen in der Beschichtung 44 sowie deren Härte geeignet vorgegeben werden. Bei hohem Argon-Anteil ergibt sich eine Beschichtung 44 mit hohen Eigenspannungen und hoher Härte. Eine Beschichtung 44 mit geringerem Argon-Anteil ist eher duktil und hat deutlich geringere Eigenspannungen.

Nachfolgend werden weitere Beispiele von Pulsfolgen für Kathodenpulse 60 bzw. Sequenzen von Kathodensubpulsen 62 dargestellt und erläutert.

Im dritten Beispiel (Fig. 8a, 8b) sowie im vierten Beispiel (Fig. 9a, 9b) werden vier Magnetron-Kathoden 22a, 22b, 22c, 22d im HIPIMS-Verfahren mit einer Frequenz von 2kHz, d.h. bei $T = 500\mu s$ betrieben. Die zeitlich gemittelte elektrische Leistung beträgt jeweils 12kW pro Kathode, d.h. in Summe 48 kW. Die Magnetron-Kathoden 22a-d sind mit Targets 24a-d aus Titan, Aluminium und Silizium bestückt, bspw. zwei Titan-Silizium Targets und zwei Titan-Aluminium Targets. Als Prozessgas wird Argon und als Reaktivgas Stickstoff eingelassen.

Die auf Wendeschneidplatten als Substrat 40 abgeschiedene Schicht 44 ist jeweils eine Al-Ti-Si-N-Schicht.

Das dritte und vierte Beispiel unterscheidet sich durch unterschiedliche Sequenzen von Kathodensubpulsen 62 (Fig. 8a, 9a) sowie unterschiedliche Sequenzen von Biassubpulsen 68 (Fig. 8b, 9b).

Beim dritten Beispiel umfasst die Sequenz der Kathodensubpulse 62 drei Kathodensubpulse 62, von denen der dritte länger ist als die beiden ersten. Die jeweiligen Dauern der Kathodensubpulse 62 und Kathodensubpulpasen 64 sind

$$P_1 = 30\mu s,$$

$$P_2 = 25\mu s,$$

$$P_3 = 60\mu s,$$

$$Z_1 = 25\mu s,$$

$$Z_2 = 30\mu s,$$

so dass sich insgesamt eine Pulslänge P von $170\mu s$ innerhalb der Periodendauer T von $500\mu s$ ergibt.

Die Pulsform der Kathodensubpulse 62 ist jeweils im Wesentlichen rechteckig mit einer Spannung V_{C1} von ca. 680 V, die im Verlauf der Pulse geringfügig abfällt, wobei sich allerdings im dritten Kathodensubpuls 62 ein Abfall der Spannung um ca. 20% zeigt, was dennoch im Wesentlichen als Rechteckform angesehen wird.

- 25 -

Wie dargestellt steigt der Kathodenstrom I_{C1} jeweils rampenartig an, während des ersten Kathodensubpulses 62 auf ca. 75A, während des zweiten Kathodensubpulses 62 auf ca. 145A und während des dritten Kathodensubpulses 62 auf einen Peak-Wert von ca. 220 A. Es erweist sich somit als günstig, dass der dritte Kathodensubpuls 62 deutlich länger ist als der erste und der zweite Kathodensubpuls 62, so dass die erreichte Peakleistung dort ca. 120 kW beträgt.

Die zugehörige Sequenz der Biasspannung V_B weist wie in Fig. 8b gezeigt drei Biassubpulse 68 auf, deren Zeitdauern im Wesentlichen denen der jeweils zugeordneten Kathodensubpuls 62 entspricht, die allerdings mit einer Verzögerungszeit T_D von ca. 20 μ s anliegen.

Der sich einstellende Bias-Strom I_B erreicht während des ersten Biassubpulses 68 einen Spitzenwert von ca. 15A, während des zweiten Biassubpulses 68 einen Spitzenwert von ca. 33A und während des dritten, längsten Biassubpulses 68 einen Spitzenwert von über 60 A, was zeigt, dass eine hohe Anzahl von Ionen zum Substrat 42 beschleunigt wird.

Die Beschichtung 44 wächst im dritten Beispiel mit einer Abscheiderate von 1,9 μ m/h.

Als eine Maßzahl für die Ionisation kann mittels OES der Anteil ionisierter Titan-Atome relativ zur Anzahl der nicht-ionisierten Titan-Atome im Plasma gemessen werden. Im dritten Beispiel ergibt sich für Ti^+/Ti mit einem Verhältnis von ca. 1,2 eine sehr hohe Ionisation. Ein Vergleichsbeispiel mit nicht unterteilten HIPIMS-Pulsen unter sonst gleichen Bedingungen erreicht hier lediglich ein Verhältnis von 0,93.

Beim vierten Beispiel umfasst die Sequenz der Kathodensubpulse 62 wie im dritten Beispiel ebenfalls drei Kathodensubpulse 62, von denen der erste im Vergleich zum dritten Beispiel noch kürzer und der dritte noch länger ist, so dass sich eine Sequenz ansteigender Kathodensubpulsdauern ergibt:

$$P_1 = 20 \mu s,$$

$$P_2 = 25 \mu s,$$

$$P_3 = 70 \mu s,$$

$$Z_1=25\mu\text{s},$$

$$Z_2=30\mu\text{s}.$$

Auch hier beträgt die Pulslänge P insgesamt $170\mu\text{s}$. Die Pulsformen sind wie im dritten
5 Beispiel im Wesentlichen rechteckig (mit etwas größerem Abfall während des dritten
Kathodensubpulses 62). Der jeweils rampenartig ansteigende Kathodenstrom I_{C1} erreicht
während des ersten Kathodensubpulses 62 nur ca. 25A , während des zweiten Kathoden-
subpulses 62 ca. 100A und während des dritten Kathodensubpulses 62 ca. 215A . Im
Vergleich zum dritten Beispiel wird eine noch höhere Peakleistung von fast 130 kW
10 erreicht.

Die Biasspannung V_B weist auch im vierten Beispiel (Fig. 9b) drei Biassubpulse 68 auf,
wobei ebenfalls die Zeitauern von Biassubpulsen 68 und Kathodensubpulsen 62 sowie
Biassubpulpaspasen 70 und Kathodensubpulpaspasen 64 im Wesentlichen übereinstim-
15 men, wobei allerdings die Biassubpulse 68 mit einer Verzögerungszeit T_D von ca. $25\mu\text{s}$
verzögert sind. Der Bias-Strom I_B erreicht während des ersten Biassubpulses 68 einen
Spitzenwert von lediglich ca. 5A , während des zweiten Biassubpulses 68 einen Spitzen-
wert von ca. 25A und während des dritten Biassubpulses 68 einen Spitzenwert von ca. 65
A. Die Abscheiderate beträgt ebenfalls $1,9\text{ }\mu\text{m/h}$ wie im dritten Beispiel.

20 Im vierten Beispiel ergibt ein Ti^+/Ti Verhältnis von $1,57$ und somit gegenüber dem
dritten Beispiel nochmals gesteigerte Ionisation.

Die so hergestellte Beschichtung 44 auf dem Substratmaterial 42 ist in Fig. 14a, 14b gezeigt
25 im Vergleich zu einer Beschichtung 44 (Fig. 13a, 13b) gemäß einem Vergleichsbeispiel mit
nicht-unterteiltem HIPIMS-Puls, aber sonst gleichen Bedingungen. Dargestellt sind jeweils
die Beschichtungen 44 auf einer Freifläche 52, die wie in Fig. 12 skizziert während des
Betriebs der Beschichtungsanlage 10 in Richtung der Targets 24a ausgerichtet ist und auf
einer Spanfläche 54, die orthogonal hierzu angeordnet ist.

30 Fig. 14a zeigt die Beschichtung 44 auf der Freifläche 52 des Körpers 40, erzeugt durch das
spezielle chopped HIPIMS Verfahren mit der Sequenz von Kathodensubpulsen 62 gemäß
Fig. 9a, 9b. Relativ zum in Fig. 13a gezeigten Vergleichsbeispiel zeigt die Beschichtung 44

eine deutlich feinere Struktur.

Auch auf der Spanfläche 54, die nicht in Richtung des Targets 24b ausgerichtet ist (Fig. 12), zeigt die Beschichtung 44 wie aus Fig. 14b ersichtlich eine deutlich feinere Struktur als das Vergleichsbeispiel (Fig. 13b). Zudem zeigt sich, dass beim Vergleichsbeispiel gemäß Fig. 13b die Beschichtung 44 eine schräge Wachstumsrichtung hat, hier beispielhaft durch einen weißen Pfeil gezeigt, die nicht orthogonal zur Substratoberfläche, sondern schräg in Richtung des Targets 24b ausgerichtet ist, während wie aus Fig. 14b ersichtlich beim Beispiel des chopped HIPIMS Verfahrens mit spezieller Sequenz von Kathodensubpulsen 62 gemäß Fig. 9a, 9b keine solche schräge Wachstumsrichtung erkennbar ist, sondern die Beschichtung 44 ersichtlich orthogonal zur Substratoberfläche wächst.

Es wird davon ausgegangen, dass dieses gleichmäßigere Wachstum ebenso wie die feinere Struktur eine Folge der höheren Ionisation ist.

Die gemäß dem vierten Ausführungsbeispiel erstellten Beschichtungen 44 zeigen insbesondere auf einem beschichteten Werkzeug besonders günstige Eigenschaften. In Zerspanungsversuchen mit Wendeschneidplatten, die einerseits gemäß dem o.g. Vergleichsbeispiel (durchgehende, nicht unterteilte HIPIMS-Pulse) und andererseits mit der Sequenz von Kathodensubpulsen 62 und Biassubpulsen 68 gemäß obigem vierten Beispiel beschichtet wurden, zeigte sich bei einer jeweils 6µm dicken Beschichtung 44 für das vierte Beispiel eine um 20% verlängerte Standzeit bei Zerspanung von X6CrNiMoTi17-12-2 gegenüber dem Vergleichsbeispiel.

Nachfolgend werden weitere Beispiele von Sequenzen von Kathodensubpulsen 62 bzw. Biassubpulsen 68 gezeigt.

So werden zunächst im Vergleich eines fünften Beispiels gemäß Fig. 10a und eines sechsten Beispiels gemäß Fig. 10b verschiedene Arten der Synchronisation des Zeitverlaufs der Bias-Spannung V_B dargestellt. Dabei ist in beiden Beispielen die Bias-Spannung V_B in Biassubpulse 68 unterteilt, die synchron zu den Kathodensubpulsen 62 sind. Allerdings ist im fünften Beispiel (Fig. 10a) die Synchronisation ohne Verzögerungszeit ($T_D = 0 \mu s$), während im sechsten Beispiel (Fig. 10b) eine Verzögerungszeit vorgesehen ist ($T_D = 10 \mu s$):

Fig. 10a zeigt einen gemessenen Verlauf der Spannung V_{C1} an der ersten Magnetron-Kathode 22a, des Stroms I_{C1} zur ersten Magnetron-Kathode 22a, der Bias-Spannung V_B sowie des Bias-Stroms I_B für eine Sequenz von zwei aufeinanderfolgenden Kathodensubpulsen 62 mit einer dazwischen liegenden Kathodensubpulpause 64.

Die Frequenz liegt bei 1000 Hz ($T=1$ ms). Die Pulsdauern der Kathodensubpulse 62 und Kathodensubpulpause 64 sind $P_1=20\mu s$, $P_2=20\mu s$, $Z_1=10\mu s$. Die Pulsdauer des Kathodensubpulses 60 ist $50\mu s$ (entspricht 5% der Periodendauer T). Die Biasspannung V_B ist periodisch mit gleicher Frequenz und umfasst zwei Biassubpulse 66 und eine Biassubpulpause 70 mit $B_1=20\mu s$, $B_2=20\mu s$, $Z_{B1}=10\mu s$, die zeitlich synchron sind zu den Kathodensubpulsen 62 mit gleicher Dauer und ohne Verzögerung ($T_D = 0\mu s$).

Im Beispiel von Fig. 10a ist die Ladevorrichtung 46 der HIPIMS-Leistungsversorgung 26a auf konstante Leistung von 3000 W geregelt. Die Kapazität 48 der HIPIMS-Leistungsversorgung 26a ist zu Beginn des ersten Kathodensubpulses 62 auf ca. 700 V aufgeladen. Wie dargestellt haben die Kathodensubpulse 62 im Wesentlichen Rechteckform mit geringem Überspringen sowie leichtem Abfall der Spannung V_{C1} über die Dauer der Kathodensubpulse 62.

Der Kathodenstrom I_{C1} zeigt während des ersten Kathodensubpulses 62 einen auf einen Spitzenwert von ca. 150A leicht ansteigenden Verlauf, während des zweiten Kathodensubpulses 62 einen deutlich stärker auf einen Spitzenwert von ca. 300A ansteigenden Verlauf. So wird im ersten Kathodensubpuls 62 ein Spitzenwert der Leistung (Peak-Leistung) von ca. 100 kW, im zweiten Kathodensubpuls 62 eine Peak-Leistung von ca. 200 kW erreicht. Hieraus resultiert eine hohe Ionisation des Plasmas und daraus insbesondere während des zweiten Biassubpulses 62 eine große Anzahl von Ladungsträgern des Plasmas, die das Substrat 40 treffen, ablesbar aus dem deutlich ansteigenden Bias-Strom I_B .

Das Beispiel von Fig. 10a zeigt somit ein fünftes Ausführungsbeispiel mit gleich langen Kathodensubpulsen 62 und exakt (ohne Verzögerung) synchronisierter Bias-Spannung V_B gleicher Pulsfolge. Demonstriert wird hier die erreichte relativ hohe Peak-Leistung und der deutliche Anstieg der Ströme I_{C1} und I_B während der zweiten Subpulse 62, 68.

Zum Vergleich mit Fig. 10a zeigt Fig. 10b als sechstes Ausführungsbeispiel bei ansonsten gleichen Parametern eine Verzögerungszeit T_D von 10 μ s zwischen dem Beginn der jeweiligen Kathodensubpulse 62 und Biassubpulse 68. Es zeigt sich ein abweichender Verlauf des Bias-Stroms I_B , der während der jeweiligen Biassubpulse 68 schneller ansteigt, da bereits

5 Bias-Stroms I_B , der während der jeweiligen Biassubpulse 68 schneller ansteigt, da bereits mehr Ionen zur Verfügung stehen.

Nachfolgend werden im Vergleich eines siebten Beispiels gemäß Fig. 11a und eines achten Beispiels gemäß Fig. 11b verschiedene Sequenzen von Kathodensubpulsen 62 dargestellt.

10 Dabei werden in beiden Beispielen jeweils Sequenzen von fünf Kathodensubpulsen 62 angelegt. Allerdings sind im siebten Beispiel (Fig. 11a) die zeitlich ersten Kathodensubpulse 62 kürzer als die späteren Kathodensubpulse 62, während im achten Beispiel (Fig. 11b) die früheren Kathodensubpulse 62 länger sind als die späteren Kathodensubpulse 62.

15 Die beiden Beispiele sind gekennzeichnet durch die folgenden Parameter:

	Beispiel 7 (Fig. 11a)	Beispiel 8 (Fig. 11b)
Frequenz	$f = 1000 \text{ Hz}$ ($T=1 \text{ ms}$)	$f = 1000 \text{ Hz}$ ($T=1 \text{ ms}$)
Leistung Ladevorrichtung 46	6 kW	6 kW
Pulsdauer Kathodenpuls 60	120 μs (12 % von T)	120 μs (12 % von T)
Anzahl Kathodensubpulse 62	5	5
Sequenz Kathodensubpulse 62	$P_1=10\mu\text{s}$ $P_2= 10\mu\text{s}$ $P_3= 20\mu\text{s}$ $P_4= 20\mu\text{s}$ $P_5= 20\mu\text{s}$	$P_1= 20\mu\text{s}$ $P_2= 20\mu\text{s}$ $P_3= 20\mu\text{s}$ $P_4= 10\mu\text{s}$ $P_5= 10\mu\text{s}$
Sequenz Kathodensubpulspausen 64	$Z_1=10\mu\text{s}$ $Z_2=10\mu\text{s}$ $Z_3=10\mu\text{s}$ $Z_4=10\mu\text{s}$	$Z_1=10\mu\text{s}$ $Z_2=10\mu\text{s}$ $Z_3=10\mu\text{s}$ $Z_4=10\mu\text{s}$

Die Biasspannung V_B ist in Fig. 8a, 8b jeweils periodisch mit gleicher Frequenz und Pulsfolge zeitlich synchron zu den Kathodensubpuls 62 mit gleicher Dauer und ohne Verzögerungszeit ($T_D = 0 \mu\text{s}$).

Im Beispiel von Fig. 11a stellt sich während der ersten beiden Kathodensubpulse 62 zunächst nur geringe Spitzenleistungen von 27 kW und 68 kW ein. Während der nachfolgenden längeren Kathodensubpulse 62 steigen die Spitzenleistungen dann aber stark auf 179 kW und 190 kW an, worauf beim letzten Kathodensubpuls 62 nur noch 86 kW erreicht werden.

Im Beispiel von Fig. 11b ergibt sich ein Anstieg der Spitzenleistung nur während der ersten drei Kathodensubpulse 62 mit Werten von 64 kW und 156 kW, während die Spitzenleistung

- 31 -

in nachfolgenden Kathodensubpulsen geringer ist. Insgesamt werden somit geringere Werte der Spitzenleistung erreicht als im Beispiel von Fig. 11a.

Somit erweisen sich Sequenzen mit zunächst kürzeren Kathodensubpulsen 62 und nachfolgend längeren Kathodensubpulsen 62 als günstig.

5

Ansprüche

- 5
1. Beschichtungsverfahren zum Beschichten eines Körpers (40), bei dem
 - der Körper (40) in einer Vakuumkammer (12) angeordnet wird, wobei zumindest eine Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) mit einem Target (24a, 24b, 24c, 24d) in der Vakuumkammer angeordnet ist,
 - 10 - der Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) elektrische Leistung zugeführt wird, so dass ein Plasma generiert und das Target (24a, 24b, 24c, 24d) zerstäubt wird, um eine Beschichtung auf dem Körper (40) abzuschneiden,
 - wobei die elektrische Leistung gemäß dem HIPIMS-Verfahren als Kathodenpulse (60) periodisch innerhalb einer Periodendauer (T) zugeführt wird, wobei jeder Kathodenpuls (60) mindestens zwei Kathodensubpulse (62) und eine dazwischenliegende Kathodensubpulpause (64) umfasst,
 - 15 - wobei an den Körper Biasspannungspulse (66) periodisch innerhalb der Periodendauer (T) angelegt werden, wobei jeder Biasspannungspuls (66) mindestens zwei Biassubpulse (68) und eine dazwischenliegende Biassubpulpause (70) umfasst.
 - 20 2. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 1, bei dem
 - wenigstens einer der Biassubpulse (68) nach dem Beginn eines der Kathodensubpulse (62) mit einer Verzögerungszeit (T_D) beginnt.
 - 25 3. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei
 - die Anzahl der Biassubpulse (68) gleich oder geringer ist als die Anzahl der Kathodensubpulse (62).
 4. Beschichtungsverfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei
 - 30 - durch die Kathodensubpulse (62) im Plasma Metallionen gebildet werden,
 - wobei die Menge der Metallionen eines Typs einen Zeitverlauf ab dem Beginn eines Kathodenpulses (60) aufweist, der mindestens ein Maximum aufweist,
 - und wobei mindestens ein Biassubpuls (68) während des Maximums anliegt.

- 33 -

5. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem
- die Kathodenpulse (60) zumindest einen ersten und einen zweiten Kathodensubpuls (62) umfassen, wobei sich der erste und der zweite Kathodensubpuls (62) in ihrer Dauer unterscheiden und wobei der erste und der zweite Kathodensubpuls (62) jeweils mindestens 8µs lang andauern.
- 5
6. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 5, wobei
- der erste Kathodensubpuls (62) der zeitlich erste Kathodensubpuls (62) des Kathodenpulses (60) ist,
10 - und wobei der erste Kathodensubpuls (62) kürzer als der zweite Kathodensubpuls (62) ist.
7. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 6, wobei
- der zweite Kathodensubpuls (62) mindestens 15 µs, bevorzugt 20 µs, besonders bevorzugt 25 µs lang andauert.
- 15
8. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 6 oder 7, wobei
- der erste Kathodensubpuls (62) maximal 25 µs, bevorzugt maximal 20 µs, besonders bevorzugt maximal 15 µs lang andauert.
- 20
9. Beschichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 5 - 8, wobei
- der Kathodenpuls (60) einen dritten Kathodensubpuls (62) umfasst, welcher zeitlich dem ersten und dem zweiten Kathodensubpuls nachfolgt,
- wobei der dritte Kathodensubpuls (62) mindestens so lange wie der erste und mindestens so lange wie der zweite Kathodensubpuls (62) andauert.
- 25
10. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem
- die Kathodenpulse (60) periodisch innerhalb einer Periodendauer (T) sind,
- wobei die Periodendauer (T) maximal 1,5ms beträgt.
- 30
11. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 10, wobei
- der Kathodenpuls (60) weniger als die halbe Periodendauer (T), bevorzugt maximal ein Drittel der Periodendauer (T) lang andauert.
- 35
12. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem

- 34 -

- die Kathoden-Leistungsversorgung (26a, 26b, 26c, 26d) eine geladene Kapazität (48) und eine Ladevorrichtung (46) hierfür umfasst, so dass die der Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) zugeführte elektrische Leistung aus der geladenen Kapazität (48) bereitgestellt wird.
- 5
13. Beschichtungsverfahren nach Anspruch 12, wobei
- die Ladevorrichtung (46) leistungskonstant geregelt wird.
14. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei
- 10 - der Kathodenpuls (60) ein Spannungspuls mit einem Spitzenwert von 600V bis 1200V ist.
15. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei
- mindestens einer der Kathodensubpulse (62) zumindest im Wesentlichen ein
- 15 Rechteckpuls ist oder zumindest einen trapezförmigen Verlauf aufweist.
16. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei
- die Spitzenleistung mindestens einer der Kathodensubpulse (62) mindestens
- 20 50kW erreicht.
17. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei
- der Kathodenpuls (60) zumindest einen ersten und einen zweiten Kathodensubpuls (62) umfasst, wobei der zweite Kathodensubpuls (62) dem ersten Kathodensubpuls (62) zeitlich nachfolgt,
- 25 - und wobei der Spitzenwert der der Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) zugeführten elektrischen Leistung während des zweiten Kathodensubpulses (62) um mindestens 30% höher ist als während des ersten Kathodensubpulses (62).
18. Beschichtungsverfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei
- 30 das Target (24a, 24b, 24c, 24d) Materialien aus den Gruppen 4 - 6 des Periodensystems, Bor, Kohlenstoff, Silizium, Yttrium und/oder Aluminium umfasst.
19. Beschichtungsanordnung zum Beschichten eines Körpers (40), mit
- einer Vakuumkammer (12) mit einer Aufnahme (30, 32) für den Körper (40) und

- mindestens einer Magnetron- Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) mit einem Target (24a, 24b, 24c, 24d),
- einer Kathoden-Leistungsversorgung (26a, 26b, 26c, 26d) zur Zuführung elektrischer Leistung zu der Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) gemäß dem
5 HIPIMS-Verfahren als Kathodenpulse (60) periodisch innerhalb einer Periodendauer (T) zum Generieren eines Plasmas und Zerstäubung des Targets (24a, 24b, 24c, 24d),
 - einer Steuervorrichtung (50), die ausgebildet ist zur Ansteuerung der Kathoden-Leistungsversorgung (26a, 26b, 26c, 26d) zur Zuführung elektrischer Leistung zu der
10 Magnetron-Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) so, dass jeder Kathodenpuls (60) mindestens zwei Kathodensubpulse (62) und eine dazwischenliegende Kathodensubpuls-
pause (64) umfasst,
 - und einer Bias-Leistungsversorgung (34) zur Zuführung elektrischer Leistung zum
Körper (40) in Form von Biasspannungspulsen (68),
 - 15 - wobei die Steuervorrichtung (50) weiter ausgebildet ist zur Ansteuerung der Bias-Leistungsversorgung (34) so, dass an den Körper (40) Biasspannungspulse (66) periodisch innerhalb der Periodendauer (T) angelegt werden, wobei jeder Biasspannungspuls (66) mindestens zwei Biassubpulse (68) und eine dazwischenliegende Biassubpuls-
pause (70) umfasst.
- 20
20. Beschichtungsvorrichtung nach Anspruch 19, bei der
- die Kathodenpulse (60) einen ersten und einen zweiten Kathodensubpuls (62) umfassen, wobei sich der erste und der zweite Kathodensubpuls (62) in ihrer Dauer unterscheiden und wobei der erste und der zweite Kathodensubpuls (62) jeweils
25 mindestens 8µs lang andauern.
21. Beschichtungsvorrichtung nach Anspruch 19 oder 20 , bei der
- die Kathodenpulse (60) periodisch sind innerhalb einer Periodendauer (T),
 - wobei die Periodendauer (T) maximal 1,5 ms beträgt.
- 30
22. Beschichtungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 19 – 21, bei der
- die Kathoden- Leistungsversorgung (26a, 26b, 26c, 26d) eine geladene Kapazität (48) und eine Ladevorrichtung (46) hierfür umfasst, so dass die der Magnetron-

- 36 -

Kathode (22a, 22b, 22c, 22d) zugeführte elektrische Leistung aus der geladenen Kapazität (48) bereitgestellt wird.

Fig. 1

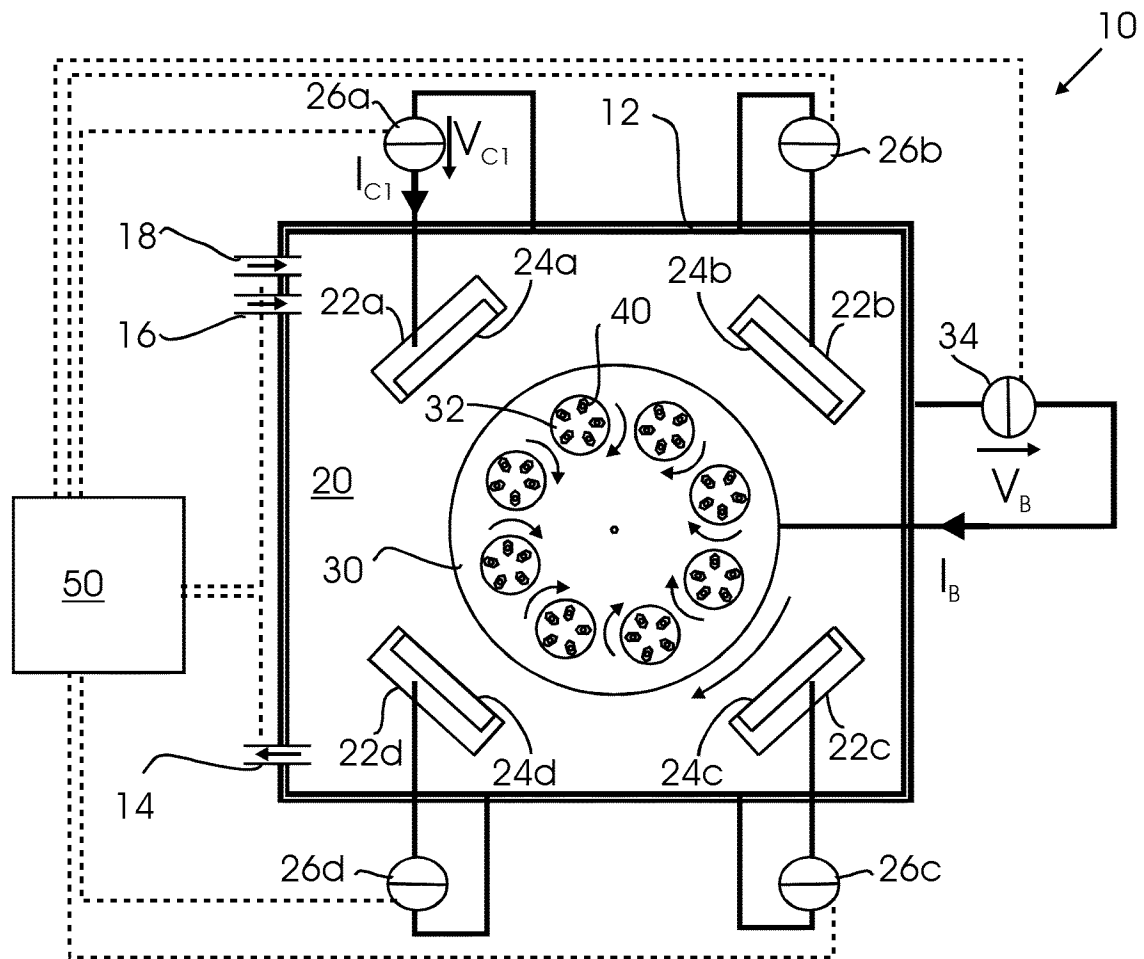


Fig. 2

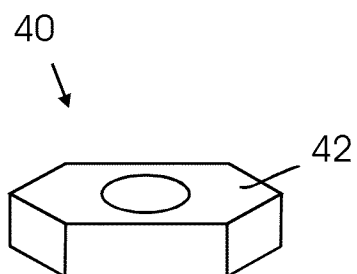


Fig. 3

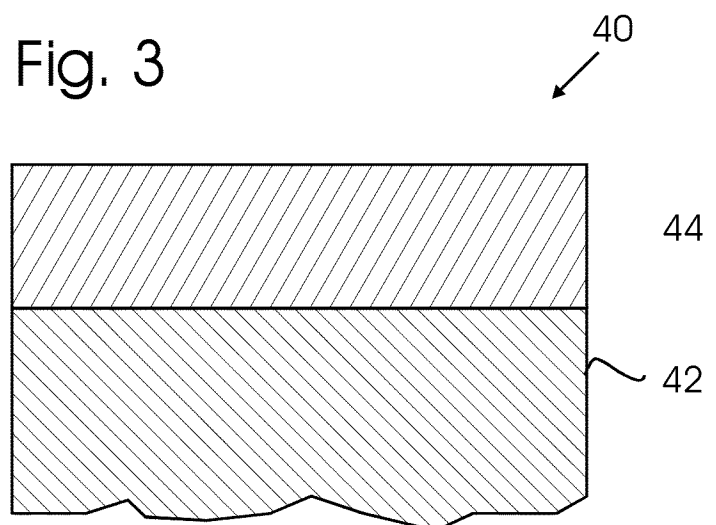


Fig. 4

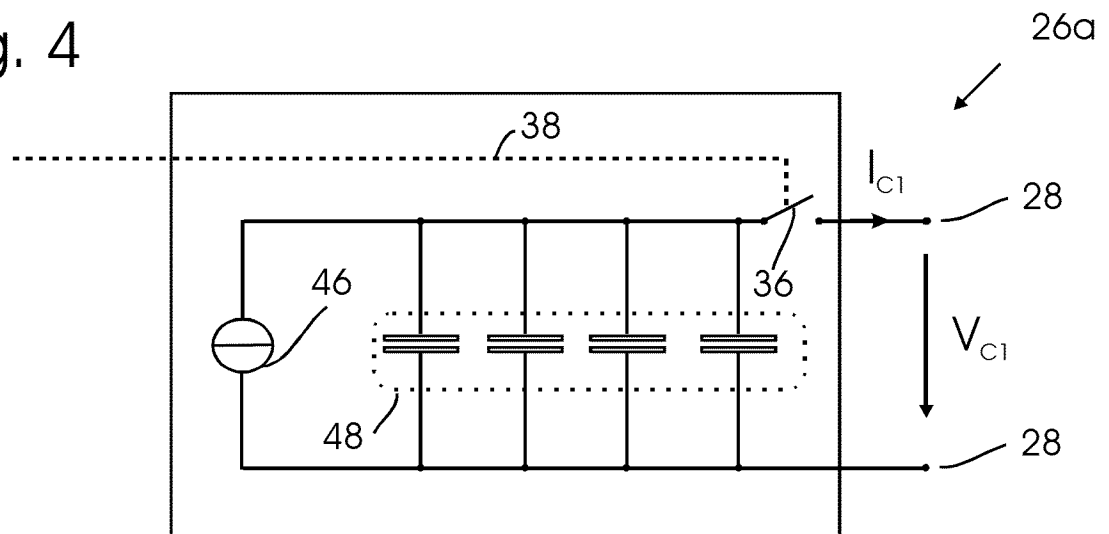


Fig. 5a

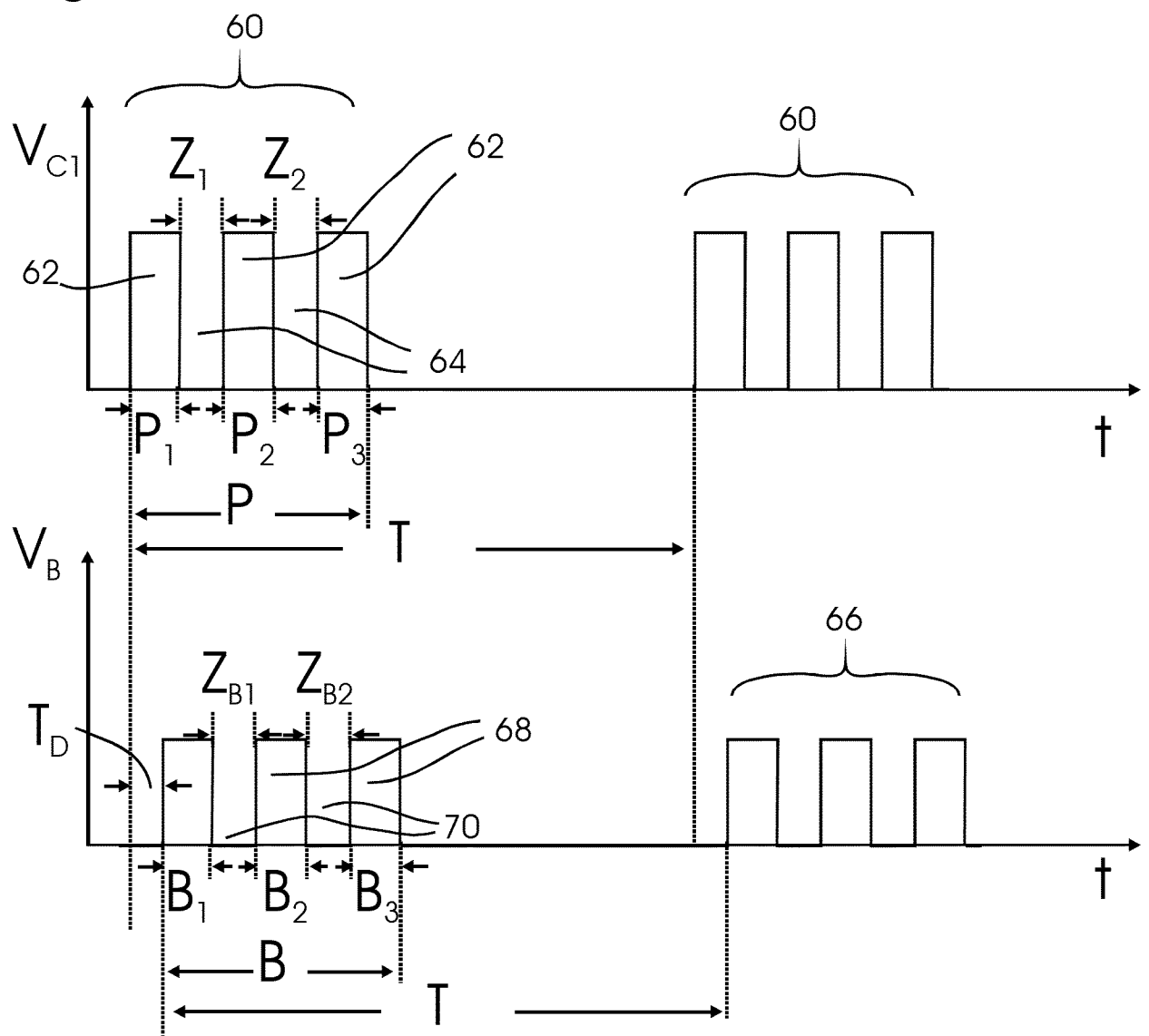


Fig. 5b

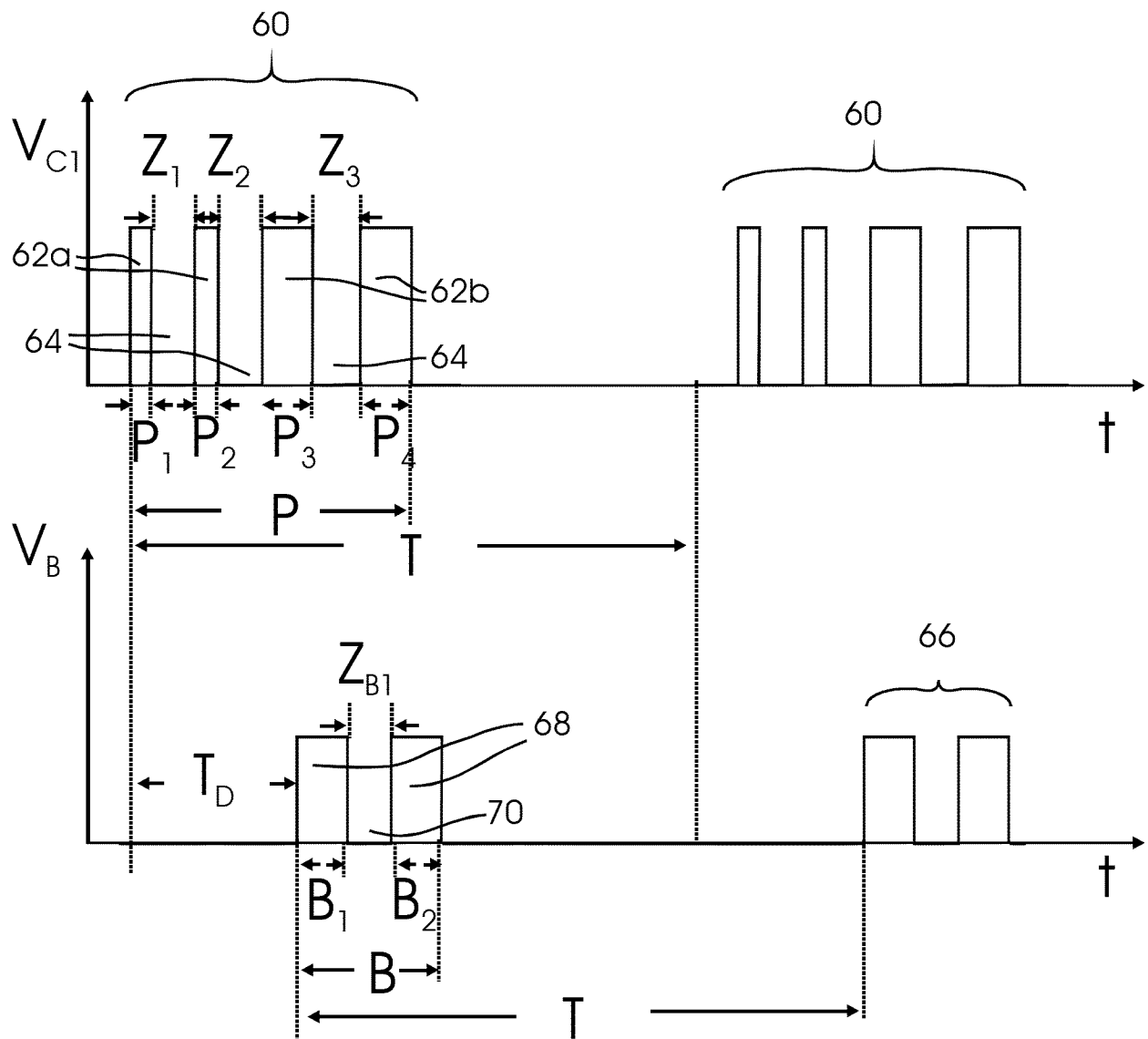


Fig. 6a

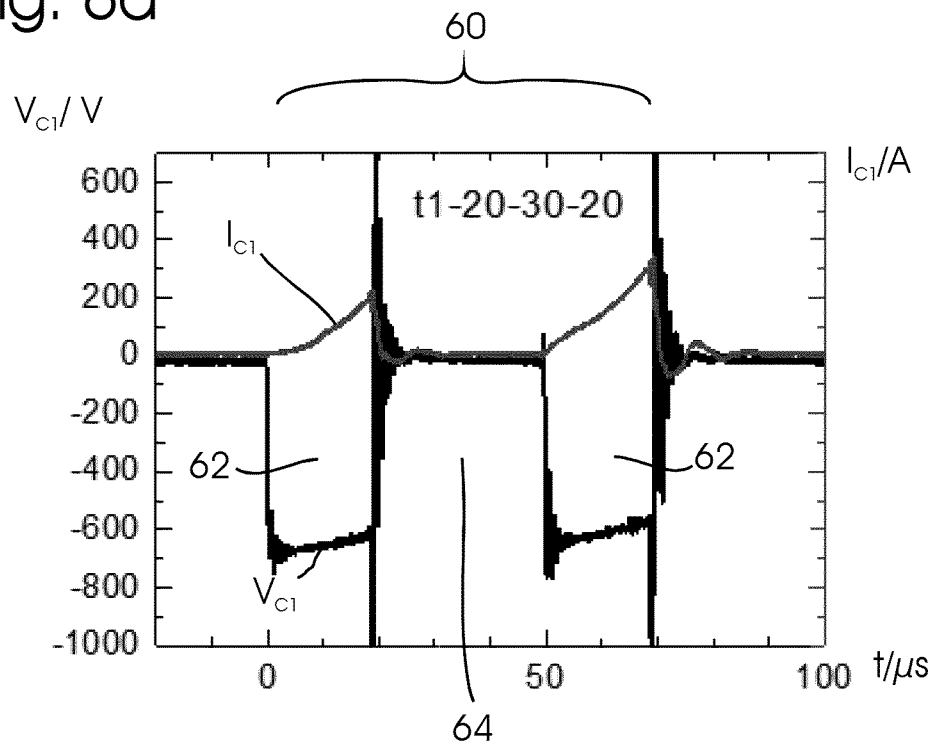


Fig. 6b

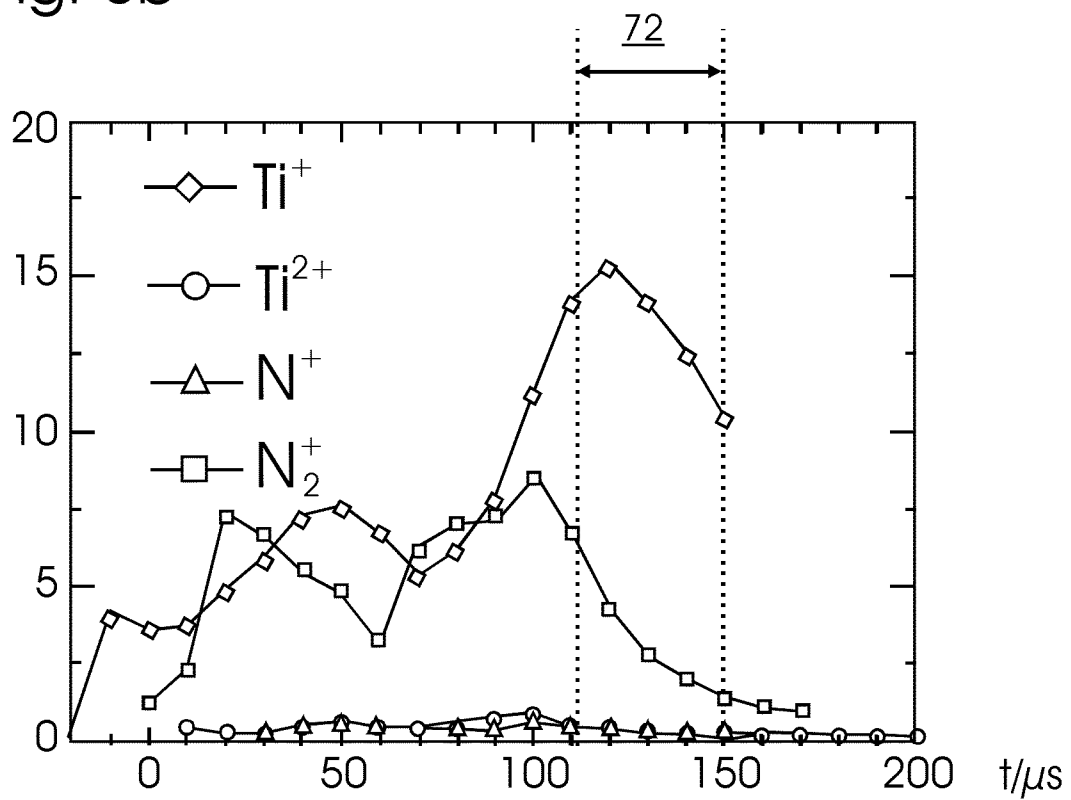


Fig. 7a

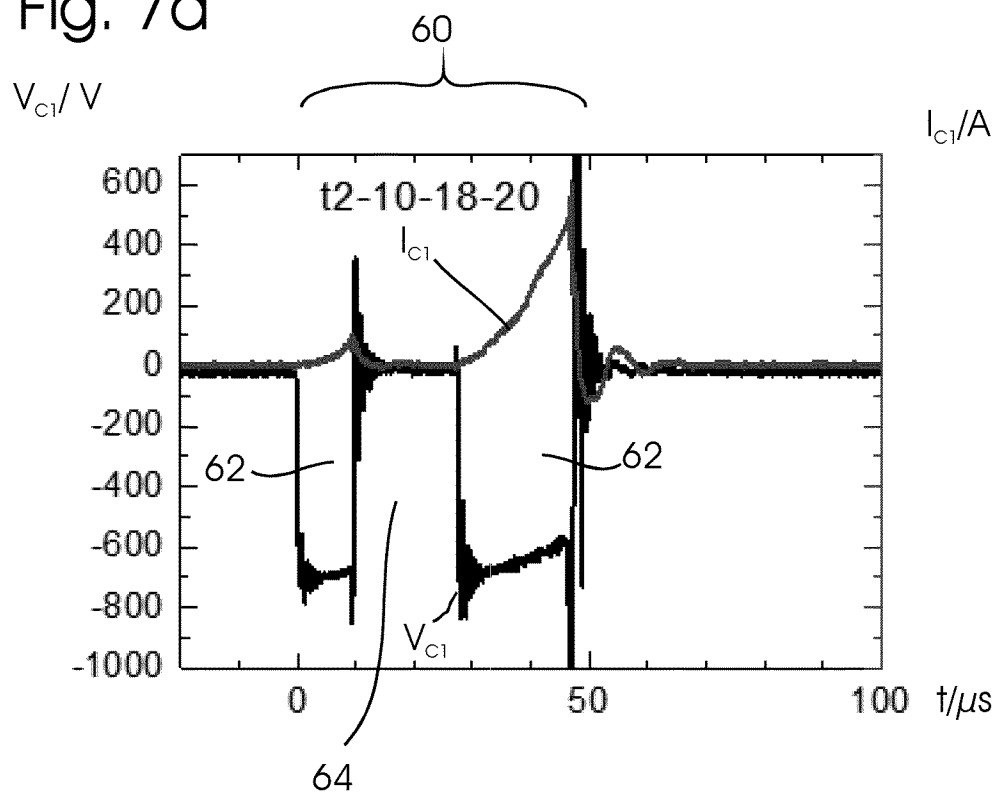


Fig. 7b

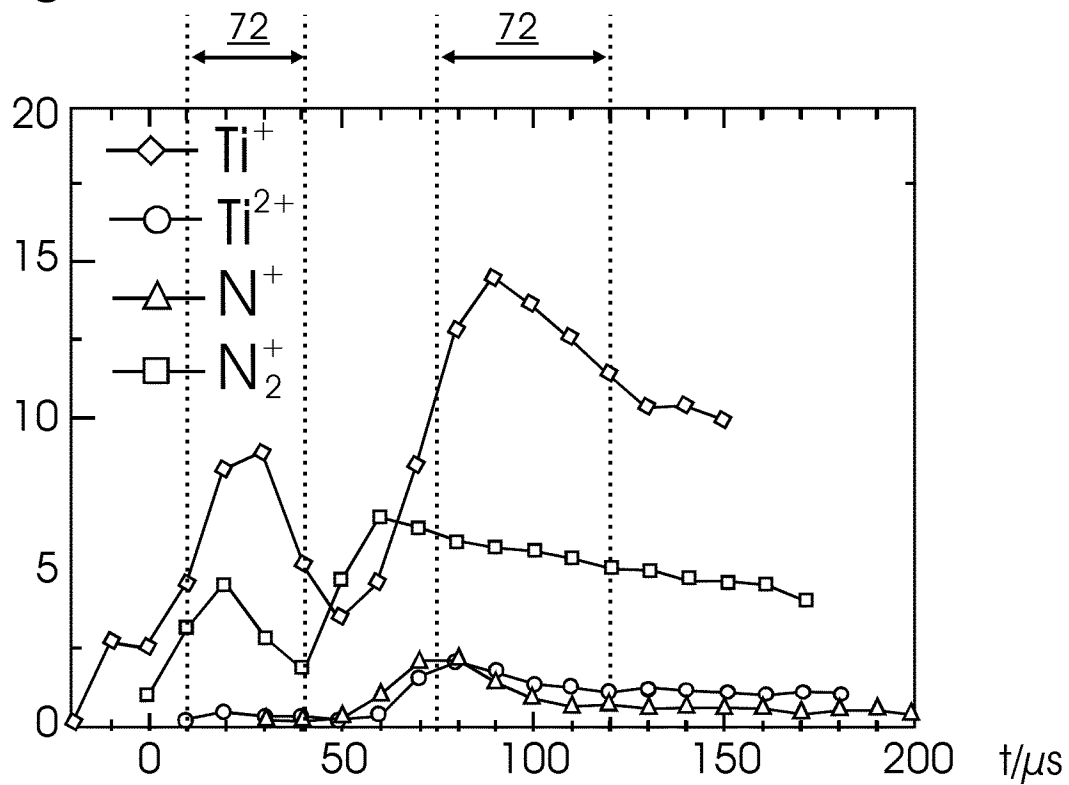


Fig. 8a

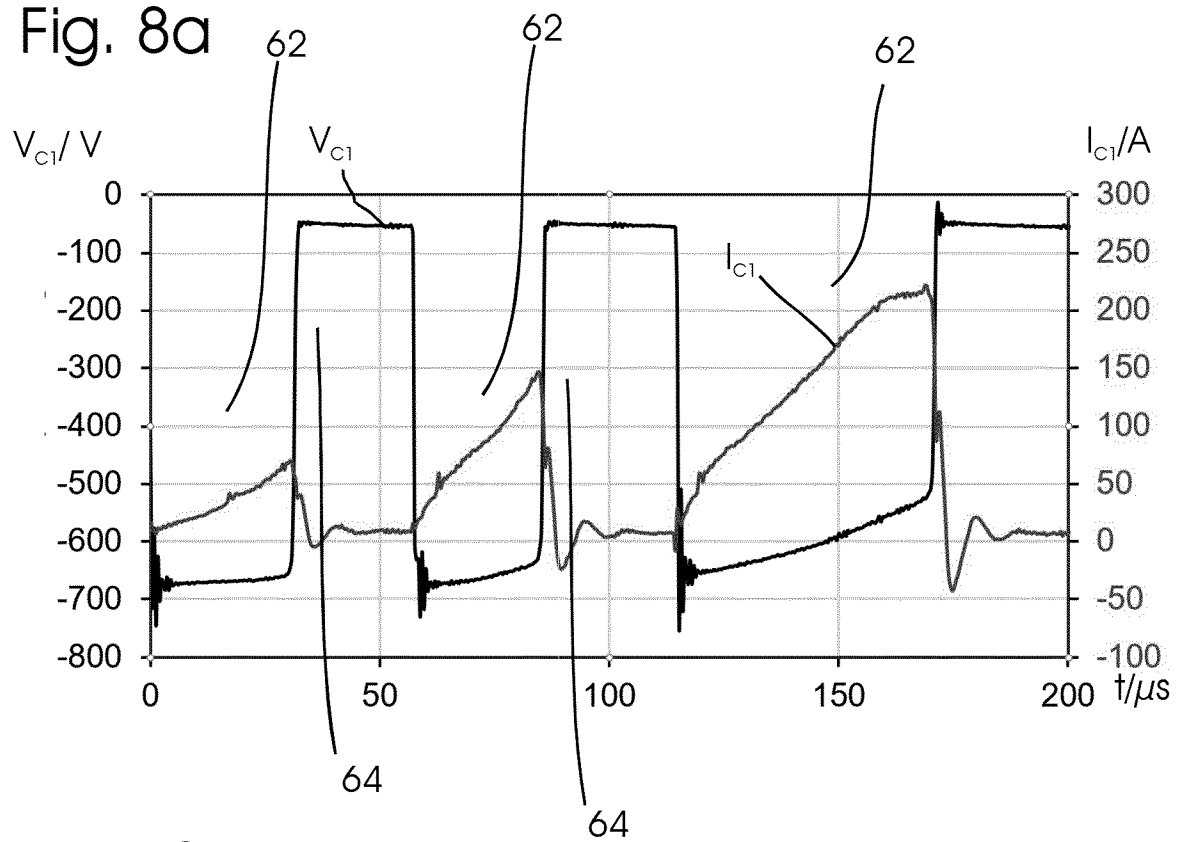


Fig. 8b

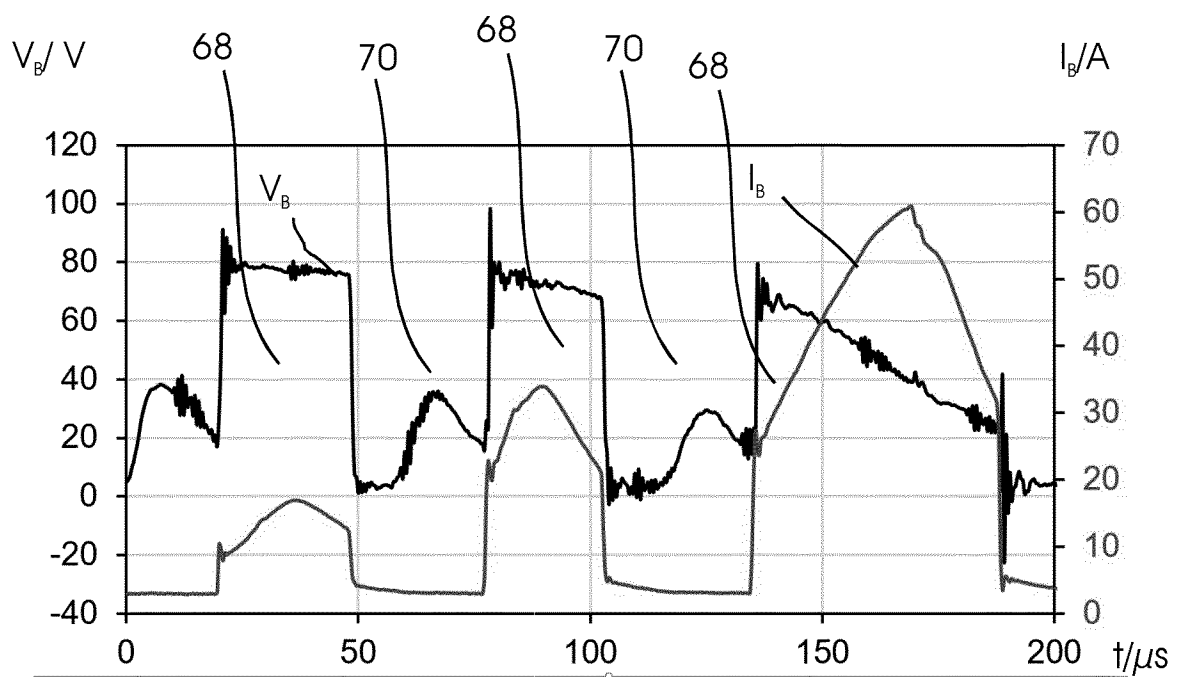


Fig. 9a

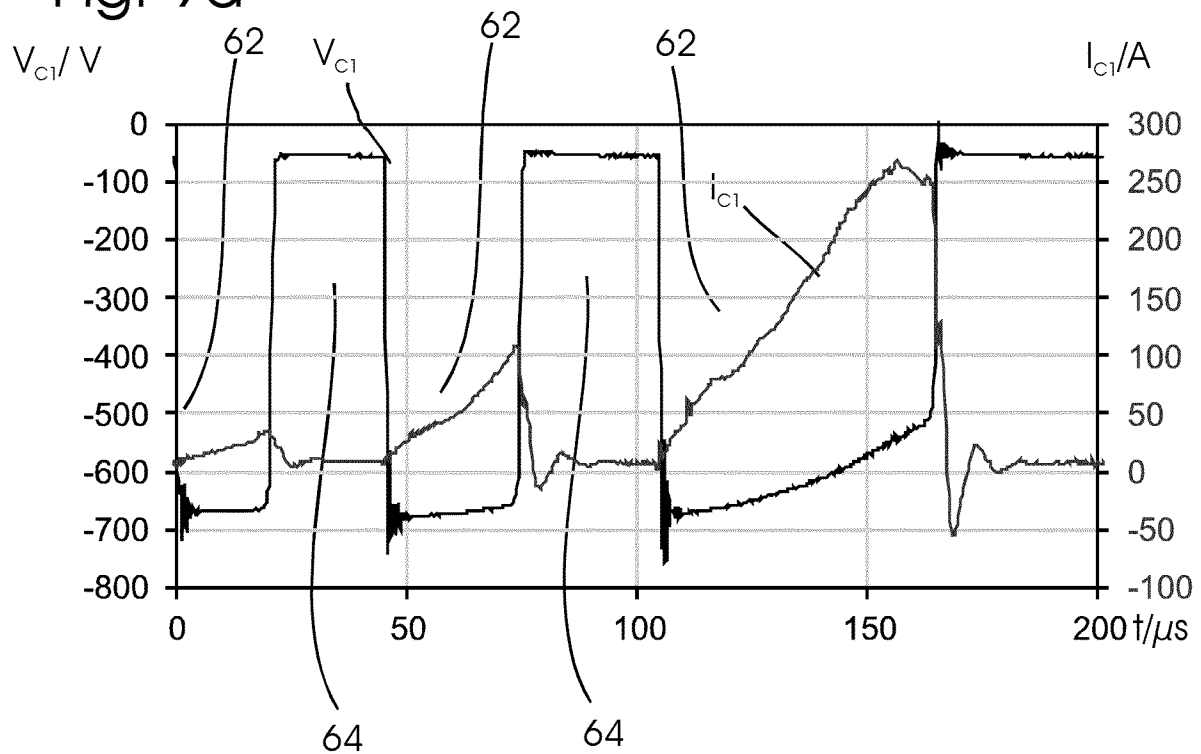


Fig. 9b

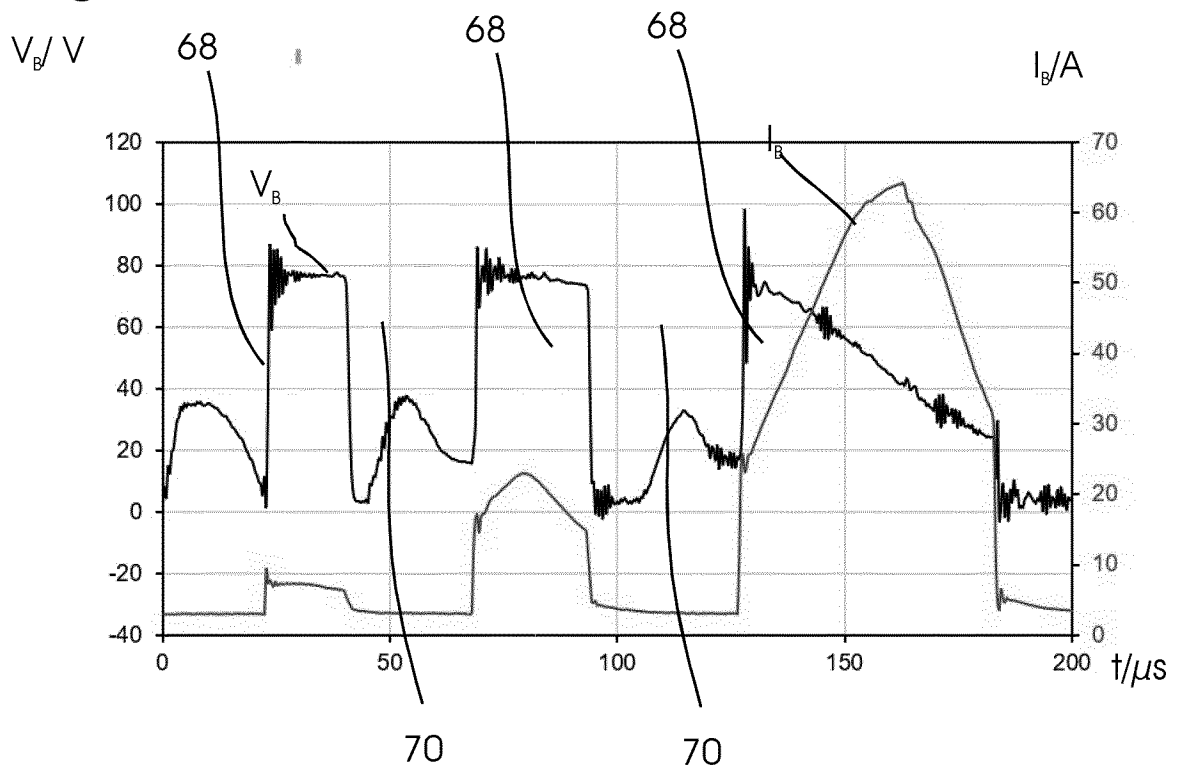


Fig. 10a

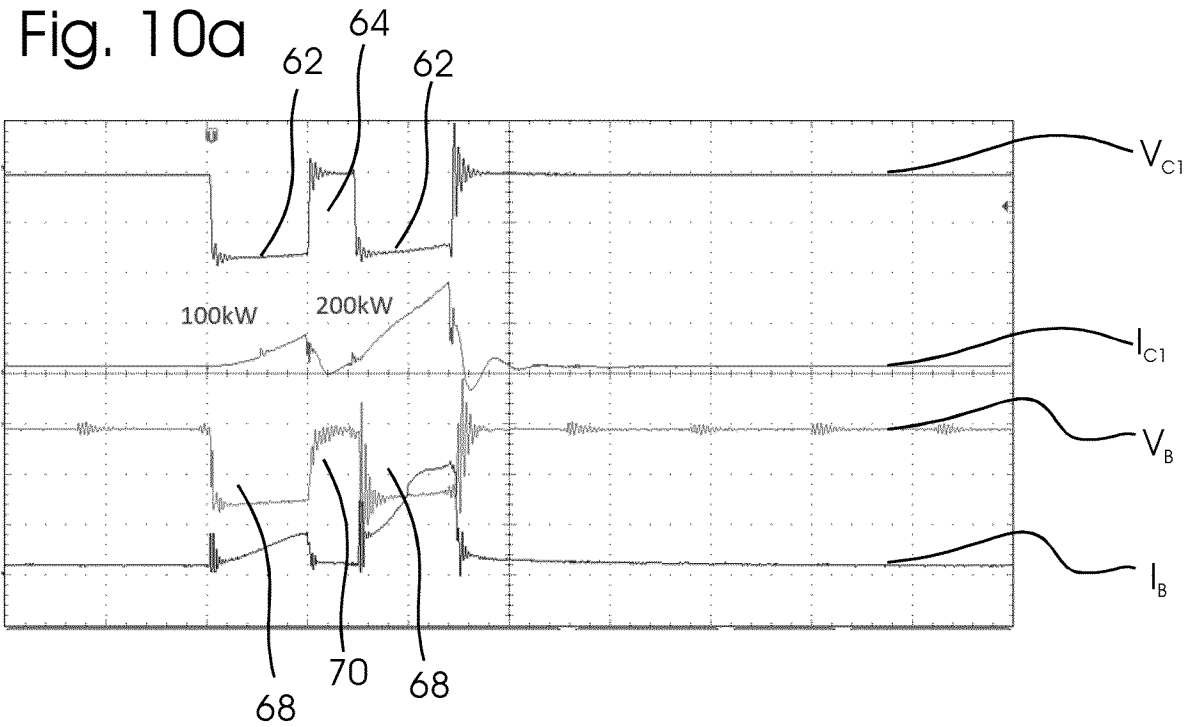


Fig. 10b

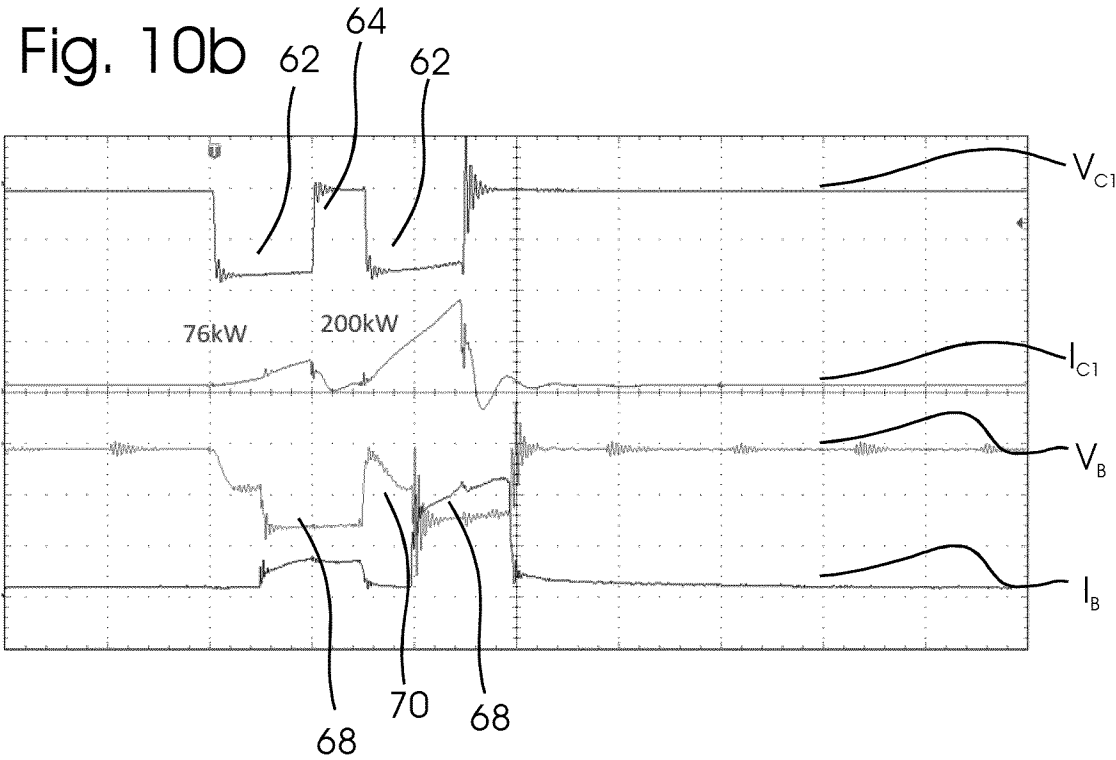


Fig. 11a

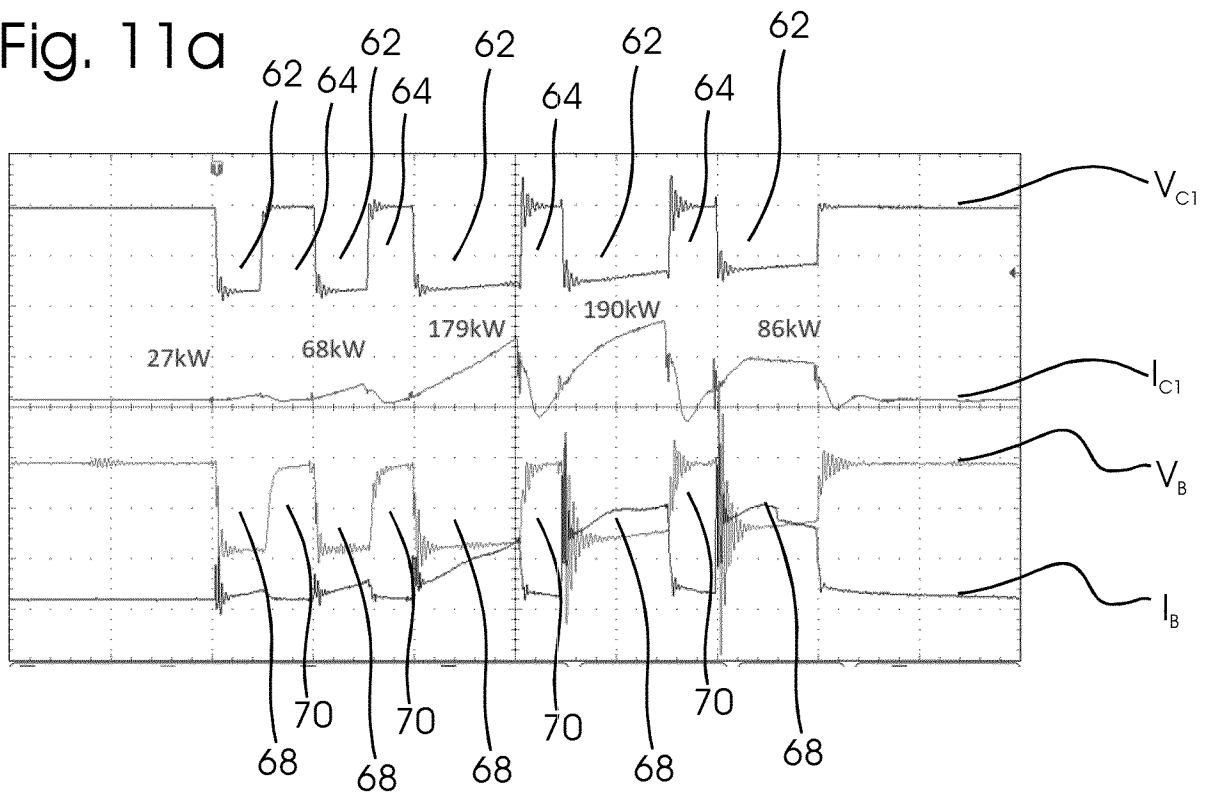


Fig. 11b

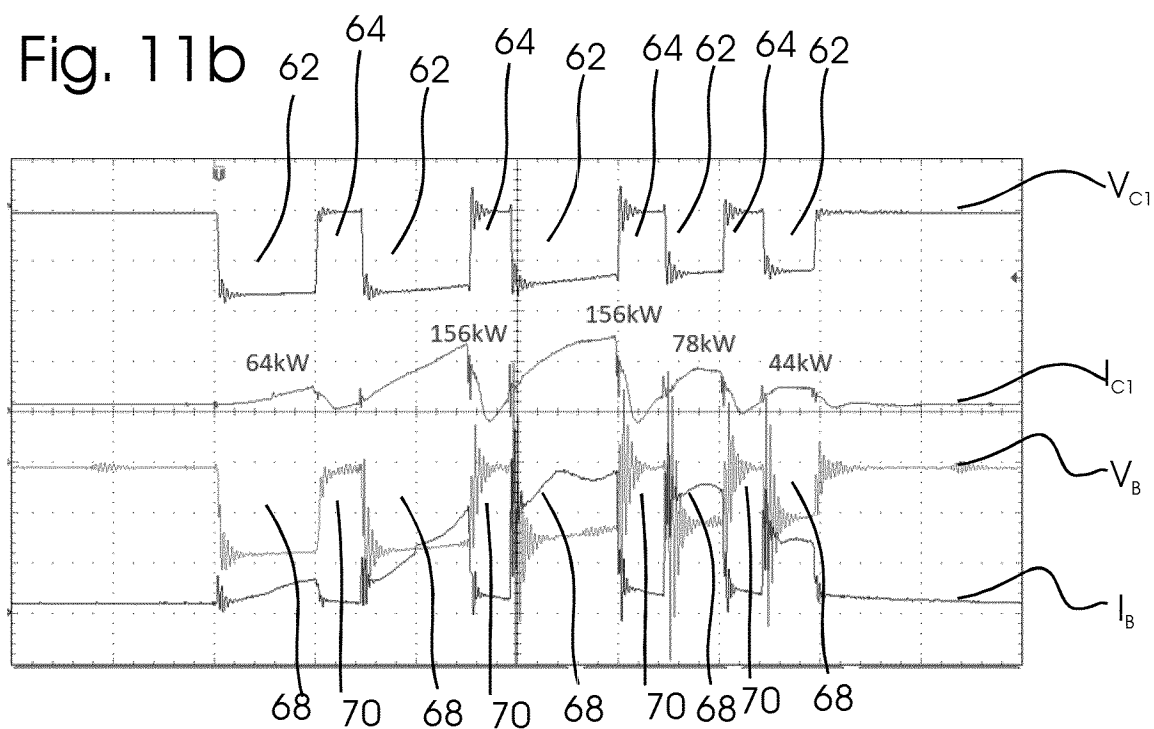


Fig. 12

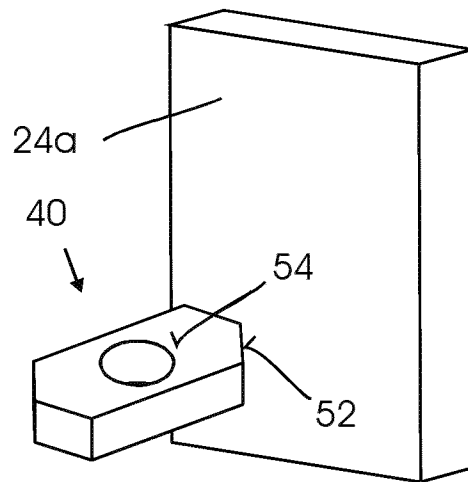


Fig. 13a

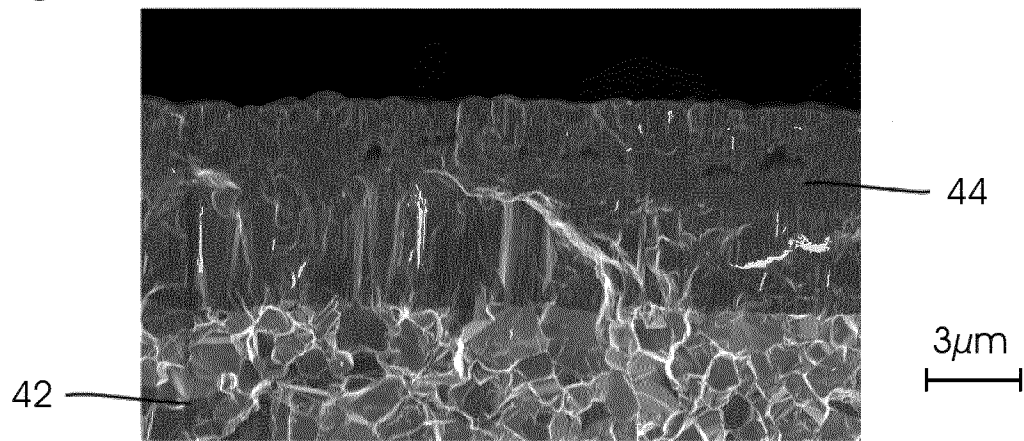


Fig. 13b

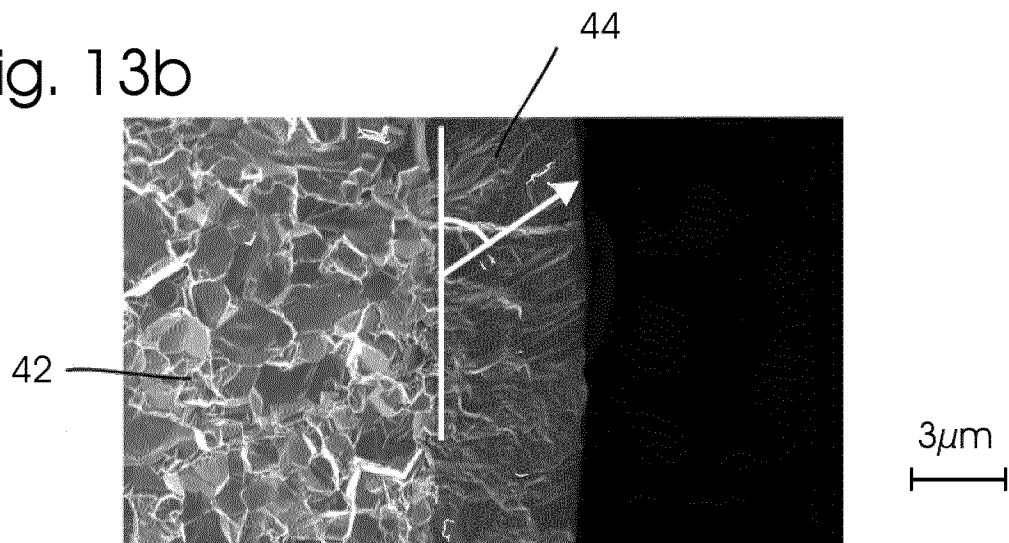


Fig. 14a

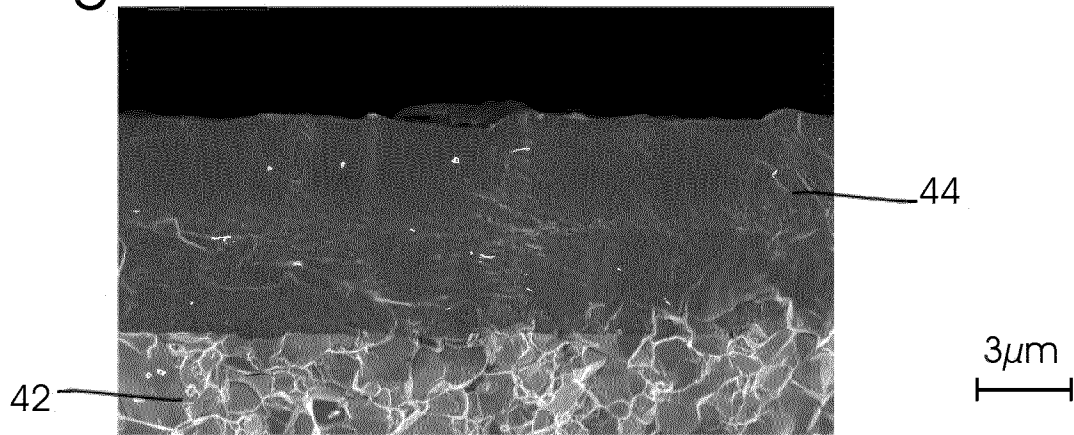
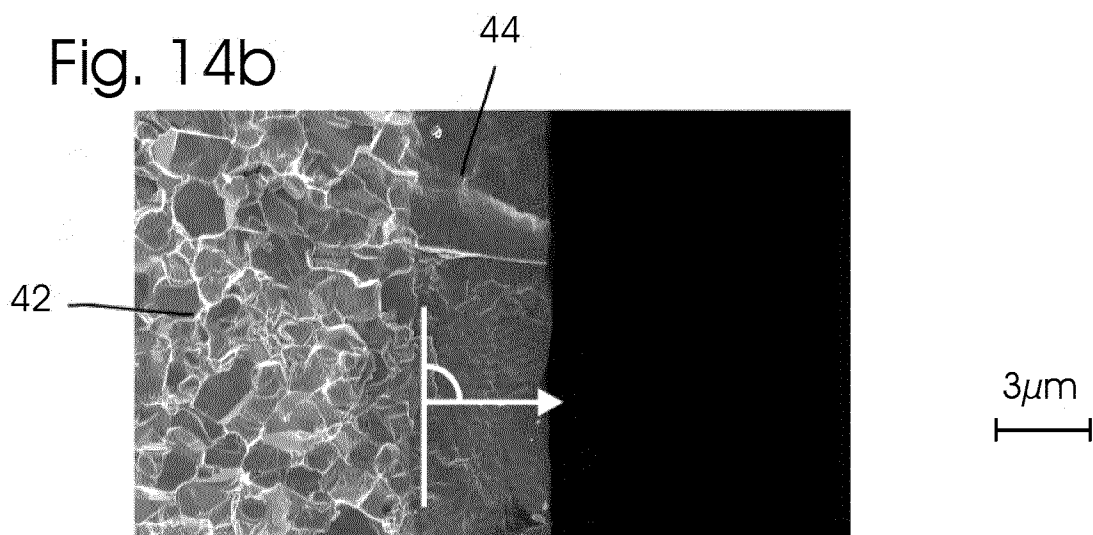


Fig. 14b



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/074470

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H01J 37/32**(2006.01)i; **C23C 14/34**(2006.01)i; **H01J 37/34**(2006.01)i

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)

H01J; C23C

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 practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2013045454 A2 (CEMECON AG [DE]) 04 April 2013 (2013-04-04) figures 1, 8, 9, 13 page 7, line 5 - line 10 page 13, line 7 - line 32 page 19, line 13 - line 20 page 20, line 17 - line 20 page 21, line 6 - line 33	1-22
Y	WO 2006049566 A1 (CHEMFILT IONSPUTTERING AB [SE]; KOUZNETSOV VLADIMIR [SE] ET AL.) 11 May 2006 (2006-05-11) figures 6-8 page 7, line 19 - page 8, line 8 page 11, line 15 - line 35 page 20, line 10 - page 21, line 27	1-22
Y	EP 2784799 A1 (CEMECON AG [DE]) 01 October 2014 (2014-10-01) figures 1, 3, 4, 8, 9 paragraph [0022] - paragraph [0030] paragraph [0074] - paragraph [0075] paragraph [0108]	1-22



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family 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 application or patent 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

10 December 2021

Date of mailing of the international search report

21 December 2021

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Hochstrasser, M

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/074470

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	GRECZYNSKI GRZEGORZ ET AL. "Metal versus rare-gas ion irradiation during TiAlN film growth by hybrid high power pulsed magnetron/dc magnetron co-sputtering using synchronized pulsed substrate bias" <i>JOURNAL OF VACUUM SCIENCE, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747</i> , Vol. 30, No. 6, 07 September 2012 (2012-09-07), pages 61504-61504, [retrieved on 2012-09-07] DOI: 10.1116/1.4750485 ISSN: 0734-2101, XP012160537 the whole document	1-22
Y	WO 2014207154 A1 (OERLIKON TRADING AG [CH]) 31 December 2014 (2014-12-31) figure 4 claims 1-5 page 6, line 11 - page 7, line 17	1-22
Y	WO 2015038489 A1 (DEPUY SYNTHES PRODUCTS LLC [US]) 19 March 2015 (2015-03-19) figures 2A-2C paragraph [0022] - paragraph [0026]	1-22
Y	WO 2008071732 A2 (OC OERLIKON BALZERS AG [LI]; WEICHART JUERGEN [LI] ET AL.) 19 June 2008 (2008-06-19) figures 9-14 paragraph [0048] - paragraph [0057]	1-22
Y	Barker Paul Michael ET AL. "Modified high power impulse magnetron sputtering process for increased deposition rate of titanium" <i>J. Vac. Sci. Technol. A J. Vac. Sci. Technol. A</i> , 29 August 2012 (2012-08-29), page 60604, Retrieved from the Internet: https://avs.scitation.org/doi/pdf/10.1116/1.4819296 [retrieved on 2021-12-09] XP055871137 the whole document	1-22

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2021/074470

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)	
WO	2013045454	A2	04 April 2013	EP	2761050	A2	06 August 2014
				JP	6093363	B2	08 March 2017
				JP	2015501371	A	15 January 2015
				US	2014234616	A1	21 August 2014
				WO	2013045454	A2	04 April 2013
WO	2006049566	A1	11 May 2006	EP	1810312	A1	25 July 2007
				US	2008210545	A1	04 September 2008
				WO	2006049566	A1	11 May 2006
EP	2784799	A1	01 October 2014	EP	2784799	A1	01 October 2014
				WO	2014154894	A1	02 October 2014
WO	2014207154	A1	31 December 2014	BR	112015032334	A2	26 September 2017
				CA	2916640	A1	31 December 2014
				CN	105683409	A	15 June 2016
				EP	3013996	A1	04 May 2016
				ES	2636867	T3	09 October 2017
				IL	243283	A	29 November 2018
				JP	6426726	B2	21 November 2018
				JP	2016528382	A	15 September 2016
				KR	20160024915	A	07 March 2016
				PH	12015502837	A1	28 March 2016
				PL	3013996	T3	31 October 2017
				PT	3013996	T	20 July 2017
				RU	2016102152	A	31 July 2017
				SG	11201510649V	A	28 January 2016
				US	2016369386	A1	22 December 2016
				WO	2014207154	A1	31 December 2014
WO	2015038489	A1	19 March 2015	EP	3043834	A1	20 July 2016
				US	2015075995	A1	19 March 2015
				WO	2015038489	A1	19 March 2015
WO	2008071732	A2	19 June 2008	CN	101589450	A	25 November 2009
				CN	101589451	A	25 November 2009
				EP	2102888	A2	23 September 2009
				EP	2102889	A2	23 September 2009
				JP	5259618	B2	07 August 2013
				JP	5383500	B2	08 January 2014
				JP	2010512458	A	22 April 2010
				JP	2010512459	A	22 April 2010
				KR	20090118911	A	18 November 2009
				KR	20090118912	A	18 November 2009
				TW	200839024	A	01 October 2008
				TW	200848528	A	16 December 2008
				US	2008135400	A1	12 June 2008
				US	2008135401	A1	12 June 2008
				US	2013220802	A1	29 August 2013
				US	2016237554	A1	18 August 2016
				WO	2008071732	A2	19 June 2008
				WO	2008071734	A2	19 June 2008

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H01J37/32 C23C14/34 H01J37/34 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) H01J C23C		
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) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	WO 2013/045454 A2 (CEMECON AG [DE]) 4. April 2013 (2013-04-04) Abbildungen 1, 8, 9, 13 Seite 7, Zeile 5 – Zeile 10 Seite 13, Zeile 7 – Zeile 32 Seite 19, Zeile 13 – Zeile 20 Seite 20, Zeile 17 – Zeile 20 Seite 21, Zeile 6 – Zeile 33 -----	1-22
Y	WO 2006/049566 A1 (CHEMFILT IONSPUTTERING AB [SE]; KOUZNETSOV VLADIMIR [SE] ET AL.) 11. Mai 2006 (2006-05-11) Abbildungen 6-8 Seite 7, Zeile 19 – Seite 8, Zeile 8 Seite 11, Zeile 15 – Zeile 35 Seite 20, Zeile 10 – Seite 21, Zeile 27 ----- --/--	1-22
☒ 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" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. 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 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		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
10. Dezember 2021		21/12/2021
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Hochstrasser, M

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	EP 2 784 799 A1 (CEMECON AG [DE]) 1. Oktober 2014 (2014-10-01) Abbildungen 1, 3, 4, 8, 9 Absatz [0022] – Absatz [0030] Absatz [0074] – Absatz [0075] Absatz [0108] -----	1-22
Y	GRECZYNSKI GRZEGORZ ET AL: "Metal versus rare-gas ion irradiation during TiAlN film growth by hybrid high power pulsed magnetron/dc magnetron co-sputtering using synchronized pulsed substrate bias", JOURNAL OF VACUUM SCIENCE, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747, Bd. 30, Nr. 6, 7. September 2012 (2012-09-07), Seiten 61504-61504, XP012160537, ISSN: 0734-2101, DOI: 10.1116/1.4750485 [gefunden am 2012-09-07] das ganze Dokument -----	1-22
Y	WO 2014/207154 A1 (OERLIKON TRADING AG [CH]) 31. Dezember 2014 (2014-12-31) Abbildung 4 Ansprüche 1-5 Seite 6, Zeile 11 – Seite 7, Zeile 17 -----	1-22
Y	WO 2015/038489 A1 (DEPUY SYNTHES PRODUCTS LLC [US]) 19. März 2015 (2015-03-19) Abbildungen 2A-2C Absatz [0022] – Absatz [0026] -----	1-22
Y	WO 2008/071732 A2 (OC OERLIKON BALZERS AG [LI]; WEICHART JUERGEN [LI] ET AL.) 19. Juni 2008 (2008-06-19) Abbildungen 9-14 Absatz [0048] – Absatz [0057] -----	1-22
Y	Barker Paul Michael ET AL: "Modified high power impulse magnetron sputtering process for increased deposition rate of titanium", J. Vac. Sci. Technol. A J. Vac. Sci. Technol. A, 29. August 2012 (2012-08-29), Seite 60604, XP055871137, Gefunden im Internet: URL:https://avs.scitation.org/doi/pdf/10.1116/1.4819296 [gefunden am 2021-12-09] das ganze Dokument -----	1-22

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2021/074470

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2013045454 A2	04-04-2013	EP 2761050 A2	06-08-2014
		JP 6093363 B2	08-03-2017
		JP 2015501371 A	15-01-2015
		US 2014234616 A1	21-08-2014
		WO 2013045454 A2	04-04-2013
WO 2006049566 A1	11-05-2006	EP 1810312 A1	25-07-2007
		US 2008210545 A1	04-09-2008
		WO 2006049566 A1	11-05-2006
EP 2784799 A1	01-10-2014	EP 2784799 A1	01-10-2014
		WO 2014154894 A1	02-10-2014
WO 2014207154 A1	31-12-2014	BR 112015032334 A2	26-09-2017
		CA 2916640 A1	31-12-2014
		CN 105683409 A	15-06-2016
		EP 3013996 A1	04-05-2016
		ES 2636867 T3	09-10-2017
		IL 243283 A	29-11-2018
		JP 6426726 B2	21-11-2018
		JP 2016528382 A	15-09-2016
		KR 20160024915 A	07-03-2016
		PH 12015502837 A1	28-03-2016
		PL 3013996 T3	31-10-2017
		PT 3013996 T	20-07-2017
		RU 2016102152 A	31-07-2017
		SG 11201510649V A	28-01-2016
		US 2016369386 A1	22-12-2016
		WO 2014207154 A1	31-12-2014
WO 2015038489 A1	19-03-2015	EP 3043834 A1	20-07-2016
		US 2015075995 A1	19-03-2015
		WO 2015038489 A1	19-03-2015
WO 2008071732 A2	19-06-2008	CN 101589450 A	25-11-2009
		CN 101589451 A	25-11-2009
		EP 2102888 A2	23-09-2009
		EP 2102889 A2	23-09-2009
		JP 5259618 B2	07-08-2013
		JP 5383500 B2	08-01-2014
		JP 2010512458 A	22-04-2010
		JP 2010512459 A	22-04-2010
		KR 20090118911 A	18-11-2009
		KR 20090118912 A	18-11-2009
		TW 200839024 A	01-10-2008
		TW 200848528 A	16-12-2008
		US 2008135400 A1	12-06-2008
		US 2008135401 A1	12-06-2008
		US 2013220802 A1	29-08-2013
		US 2016237554 A1	18-08-2016
		WO 2008071732 A2	19-06-2008
		WO 2008071734 A2	19-06-2008