



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 060 368 B3** 2008.07.31

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 060 368.0**

(22) Anmeldetag: **16.12.2006**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **31.07.2008**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01S 3/13** (2006.01)

**H01S 3/223** (2006.01)

**H05G 2/00** (2006.01)

**H01L 21/027** (2006.01)

**G03F 7/20** (2006.01)

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

(73) Patentinhaber:

**XTREME technologies GmbH, 07745 Jena, DE**

(74) Vertreter:

**Patentanwälte Oehmke und Kollegen, 07743 Jena**

(72) Erfinder:

**Brudermann, Jesko, Dr., 37083 Göttingen, DE;  
 Kleinschmidt, Jürgen, Dr., 37077 Göttingen, DE**

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

**DE 102 44 105 B3**

**DE 102 19 805 A1**

**DE 102 09 161 A1**

**US 65 38 723 B2**

**US 64 96 247 B2**

**US 64 56 363 B2**

**US 60 05 879 A**

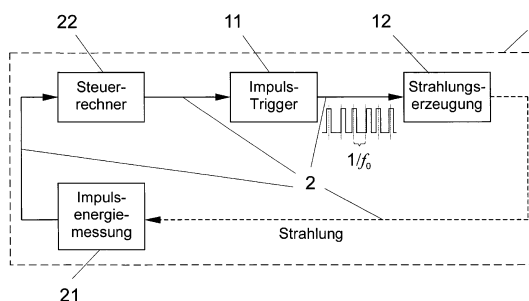
**US 59 86 742 A**

**US 56 08 492 A**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Anordnung zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle.

Die Aufgabe, eine neue Möglichkeit zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle (1) zu finden, die auch dann eine zuverlässige Regelung gestattet, wenn keine hinreichend zuverlässige Stellgröße zur Beeinflussung der abgegebenen Impulsenergie ( $E_i$ ) vorhanden ist, wird erfindungsgemäß gelöst, indem die Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) des aktuellen Strahlungsimpulses gemessen, die Abweichung der aktuellen Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) von einem vorherbestimmten Zielwert ( $E_0$ ) bestimmt und der Impulsabstand ( $\Delta t_{i+1}$ ) bis zum Auslösen des nächsten Strahlungsimpulses in Abhängigkeit von der Größe der Abweichung zwischen der aktuellen Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) und dem Zielwert ( $E_0$ ) der Impulsenergie gesteuert wird.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, insbesondere einer EUV-Quelle auf Basis eines Gasentladungsplasmas (GDP – gas-discharge plasma) oder eines lasererzeugten Plasmas (LPP – laser produced plasma), eines Excimerlasers, eines F<sub>2</sub>-Lasers oder einer anderen gepulst betriebenen Strahlungsquelle.

**[0002]** Bevorzugtes Anwendungsgebiet solcher Strahlungsquellen ist die Halbleiterlithographie zur Herstellung von elektronischen Schaltkreisen.

**[0003]** Bei den photolithographischen Verfahren der Halbleiterindustrie wird in einem sogenannten Scanner eine Maske (mit der abzubildenden Struktur) verkleinert auf das Halbleitersubstrat (den Wafer) abgebildet.

**[0004]** Die Qualität der photolithographischen Verfahren wird außer von den Eigenschaften des optischen Systems (numerische Apertur, Schärfentiefe, Abbildungsfehler der Linsen bzw. Spiegel) wesentlich dadurch bestimmt, wie genau die eingestrahelte Strahlungsdosis eingehalten werden kann. Diese Dosisstabilität (engl. dose accuracy) ist nach V. Banine et al. (in: Proc. SPIE Vol. 3997 (2000) 126) bestimmt durch:

- a) Impuls-Quantisierung,
- b) Puls-zu-Puls-Stabilität und
- c) räumliche Stabilität des emittierenden Volumens.

**[0005]** Dabei ist die Impuls-Quantisierung a) scannerspezifisch. Die Anzahl der Lichtimpulse, die während eines Abtastzuges (engl.: Scan) in den bewegten Spalt (engl.: moving slit) fällt, kann variieren. Ein Verfahren zur Optimierung der Impuls-Quantisierung ist beispielsweise in US 5,986,742 A offenbart.

**[0006]** Die Beiträge b) und c) sind spezifisch für die Strahlungsquellen selbst, wobei der Beitrag c) nur für EUV-Quellen aufgrund der nachweisbaren Fluktuationen des Strahlung emittierenden Plasmas von Bedeutung ist.

**[0007]** Bei heute üblichen Belichtungsvorgängen wird eine mit einer speziellen Lichtquelle beleuchtete Maske verkleinert auf den Wafer abgebildet. Zur Belichtung werden als Strahlungsquellen momentan Schmalband-Excimerlaser bei Wellenlängen von 248 nm und 193 nm eingesetzt. Ferner sind Systeme auf Basis von F<sub>2</sub>-Lasern mit 157 nm in der Entwicklung und der Trend zu noch kürzeren Wellenlängen wird derzeit durch plasmabasierte EUV-Strahlungsquellen mit Wellenlängen um 13 nm fortgesetzt.

**[0008]** Auf der Waferoberfläche erzeugt dabei jeder Strahlungsimpuls einen Strahlungsfleck, der durch eine synchrone Bewegung von Maske und Wafer, von Impuls zu Impuls auf der Waferoberfläche leicht verschoben erscheint.

**[0009]** Für jede auf dem Wafer ausgeführte Belichtung eines Belichtungsfeldes (engl.: die), die in der Regel einem Schaltkreis entspricht, gibt die Strahlungsquelle eine vordefinierte Impulsfolge von Strahlungspulsen (Burst) ab, von der jeweils einige Impulse, entsprechend der Geschwindigkeit der Bewegung, Verkleinerung der abbildenden Optik und der Belichtungsfeldgröße, zur Gesamtblichtung der photoempfindlichen Schicht an einem bestimmten Ort auf der Waferoberfläche beitragen.

**[0010]** Bezüglich der Dosisstabilität (an einer bestimmten Stelle auf der Oberfläche des Wafers) stellen die Chiphersteller außerordentlich hohe Anforderungen an die Puls-zu-Puls-Stabilität. Diese wird ausgedrückt durch die Standardabweichung  $\sigma$  der aktuellen Impulsenergie von deren Mittelwert bzw. von einem Zielwert (Set-Energie) der Impulsenergie. Bei der DUV- und VUV-Lithographie werden für Schmalband-Excimerlaser Dosisstabilitäten  $\sigma_D < 1,5\%$  gefordert, während für die EUV-Lithographie sogar Dosisstabilitäten von  $\sigma_D < 0,3\%$  erforderlich sind.

**[0011]** Diese Forderungen können nur durch eine aktive Regelung der Strahlungsleistung auf einer Puls-zu-Puls-Basis erfüllt werden. Alle vorbekannten Verfahren setzen an dieser Stelle auf eine Variation des Sollwertes der Einzelimpulsenergie des nächsten Impulses  $E_{S,i+1}$

$$E_{S,i+1} = (E_0, E_i, E_{i-1}, E_{i-2}, \dots, E_{S,i-1}, E_{S,i-2}, \dots, i + 1, \dots), \quad (1)$$

wobei  $E_0$  die geforderte mittlere Einzelimpulsenergie,  $E_i$  die tatsächliche Energie der vorherigen Impulse,  $E_{S,i}$

die jeweiligen Sollwerte der Einzelimpulsenergie der vorherigen Impulse,  $i + 1$  die Nummer des nächsten Impulses innerhalb des Bursts und  $f(\dots)$  ein mathematischer Zusammenhang, der beschreibt, wie aus den vorgenannten Werten der nächste Sollwert gewonnen werden soll – also die Implementierung des jeweils verwendeten Regelalgorithmus (z. B. PID-Regelung etc.).

**[0012]** Ein solches Verfahren wird z. B. in der US 5,608,492 A vorgestellt. Dort wird eine Puls-zu-Puls-Energieregelung beschrieben, die auf einer geschlossenen Regelschleife aus Lichtemission, Lichtimpulsenergiemessung, Bestimmung der Ladespannung des treibenden Lasers und erneuter Lichtemission basiert. Damit entspricht sie dem Regelungsprinzip gemäß Gleichung (1).

**[0013]** Es bleibt dabei der Erfahrung des jeweiligen Konstrukteurs überlassen, in geeigneter Weise einen Zusammenhang  $g_n(\dots)$  zwischen dem Sollwert der Energie für den nächsten Impuls  $E_{S,i+1}$  und einer oder mehreren geeigneten Stellgrößen  $S_{n,i+1}$  (z. B. der Ladespannung bei einer gasentladungsbetriebenen Strahlungsquelle) herzustellen:

$$S_{n,i+1} = g_n(E_{S,i+1}) \quad (2)$$

**[0014]** In die Funktion(en)  $g_n(\dots)$  können dabei weitere Zusammenhänge eingehen, über die das System Kenntnis hat. Beispiele wurden in weiteren Schriften beschrieben.

**[0015]** So offenbart die DE 102 09 161 A1 ein Regelungsverfahren für eine gepulste Strahlungsquelle, das in der Lage ist, den Proportionalitätsfaktor einer Proportionalregelung ständig neu aus den vorherigen Messwerten für Impulsenergie und Stellgröße (Ladespannung) zu bestimmen und damit die Regelung genauer zu machen.

**[0016]** Das US-Patent US 6,005,879 A beschreibt eine konkretere Ausführung für ein Excimerlasersystem. Hier wird die Regelung optimiert durch eine bessere Kenntnis des Zusammenhanges zwischen Ladespannung und der Auswirkung auf die Impulsenergie des Lasers. Auch diese Regelung fällt damit unter den allgemeinen Zusammenhang  $g_n(\dots)$ .

**[0017]** Weiterhin beschreibt die DE 102 19 805 A1, dass auch über mehr als eine Stellgröße  $S_{n,i+1}$  (hier Ladespannung und Gasdruck) geregelt werden kann.

**[0018]** Andere Verfahren, wie sie z. B. in DE 102 44 105 B3 beschrieben wurden, beschäftigen sich mit der Optimierung des Regelalgorithmus während der ersten Impulse eines Bursts, um transiente Effekte in der Anfangsphase kompensieren zu können.

**[0019]** Allen diesen vorgenannten Verfahren ist gemeinsam, dass sie auf einer bewussten Änderung des Sollwertes für den nächsten Strahlungsimpuls basieren. Die einzelnen Schriften unterscheiden sich nur in der Art, wie der nächste Energiewert bestimmt wird oder wie die Strahlungsquelle gesteuert wird, um den nächsten Lichtimpuls möglichst genau an den Impulsenergie-Zielwert anzugleichen.

**[0020]** In der US 6,456,363 B2 ist eine Einrichtung offenbart, die eine Impulslichtquelle zum Emittieren von Lichtimpulsen mit veränderlichen Lichtmengen enthält. Dabei werden die Intensitäten der Lichtimpulse gemessen und die auf das Target (Maske) übertragene Intensität mittels einer veränderlichen Lichtreduziereinheit gesteuert.

**[0021]** Eine verbesserte Anordnung dazu ist in US 6,496,247 B2 beschrieben, wobei hier auch die Abstände der Lichtimpulse mit berücksichtigt werden, indem zuerst eine Impulsenergiemessung erfolgt, dann berechnet wird, wie viele Impulse für die erforderliche Dosis auf der Belichtungsfläche erforderlich sind, und aus dem zeitlichen Ablauf der Impulse die Scangeschwindigkeit über Maske und Wafer festgelegt wird. Steht die Scangeschwindigkeit fest, wird vorteilhaft die Lichtintensität über Feinfilterung so eingestellt, dass keine Änderung der Anzahl der Impulse erforderlich ist. Falls andererseits die durchschnittliche Lichtmenge jedoch kleiner wird, kann die Impulszahl um Eins erhöht werden, um die nötige Dosis zu erreichen.

**[0022]** Eine ähnliche Vorgehensweise beschreibt auch US 6,538,723 B2, wobei nach Messung der eingestrahnten Impulsenergie und Bestimmung der Impulsfrequenz der vergangenen Impulse für den nächsten Impuls die Impulsenergie angepasst wird, damit die Scangeschwindigkeit gleich bleiben kann.

**[0023]** Die drei vorgenannten Schriften haben den Nachteil, dass zur Einstellung der erforderlichen Dosis und

zur Erzielung der nötigen Dosisgenauigkeit bei vorgegebener Scangeschwindigkeit und vorbestimmter Anzahl von Impulsen in der Fensterfunktion des belichteten Bereichs nur aus der ermittelten mittleren Impulsenergie in der Waferebene die Impulsenergie explizit angepasst werden kann. Die Frequenz der Strahlungsimpulse wird zwar berücksichtigt, um in Abhängigkeit von der verfügbaren Impulsenergie die erforderliche Dosis sicher zu erreichen, wird aber für den Belichtungsprozess konstant gewählt, um für die Einhaltung der Dosisgenauigkeit ausschließlich die Impulsenergie mittels feinabgestimmter veränderlicher Extinktionsfilter zu regeln.

**[0024]** In manchen Fällen lässt sich jedoch kein geeigneter zuverlässiger Zusammenhang  $g_n(\dots)$  finden, der eine schnelle Puls-zu-Puls-Regelung der Impulsenergie erlaubt. Insbesondere kann die in allen vorgenannten Regelungsverfahren genutzte Steuerung der Ladespannung für die Gasentladung versagen, wenn beispielsweise die Abbildungseigenschaften des optischen Systems die in der Waferebene gemessene Strahlungsintensität mit beeinflussen.

**[0025]** So wird insbesondere bei plasmabasierten Strahlungsquellen, die neben den zeitlichen Energiefluktuationen auch räumliche Fluktuationen des Plasmas aufweisen, die sonst üblicherweise gute Korrelation zwischen Ladespannung und Impulsenergie empfindlich gestört, so dass eine Steigerung der im Plasma erzeugten Energie durch die räumliche Änderung des Plasmas (z. B. durch die Etendue-Limitierung des optischen Systems) auf dem Weg zum Wafer verloren geht. Eine Regelung der Impulsenergie durch Steuerung der Ladespannung führt in einem solchen Fall nicht zum Erfolg.

**[0026]** Weiterhin kann der für die erfolgreiche Regelung erforderliche Zusammenhang  $g_n(\dots)$  zeitlichen Schwankungen unterworfen sein, die dem Regelalgorithmus unbekannt sind. Dies führt zwangsläufig zu einer zusätzlichen Ungenauigkeit der Regelung.

**[0027]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine neue Möglichkeit zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle zu finden, die auch dann eine zuverlässige Regelung gestattet, wenn bei den zur Verfügung stehenden Stellgrößen keine hinreichend zuverlässige Korrelation zwischen Stellgröße und Erwartungswert der Einzelimpulsenergie für den nächsten Strahlungsimpuls vorhanden ist.

**[0028]** Erfindungsgemäß wird die Aufgabe bei einem Verfahren zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, insbesondere von Excimerlasern,  $F_2$ -Lasern oder EUV-Strahlungsquellen auf Basis eines heißen Plasmas, durch die folgenden Schritte gelöst:

- Messen der Einzelimpulsenergie des aktuellen Strahlungsimpulses,
- Bestimmen der Abweichung  $\Delta E = E_i - E_0$  der aktuellen Einzelimpulsenergie  $E_i$  von einem vorherbestimmten Zielwert  $E_0$  der Impulsenergie,
- Steuern des Impulsabstandes bis zum Auslösen des nächsten Strahlungsimpulses in Abhängigkeit von der Größe der Abweichung der aktuellen Einzelimpulsenergie vom Zielwert der Impulsenergie.

**[0029]** Vorteilhaft wird durch rechtzeitiges Programmieren eines schnellen Triggers der nächste Impuls umso früher ausgelöst, je größer die Unterschreitung, und umso später getriggert je größer die Überschreitung des Zielwertes der Impulsenergie durch die aktuellen Einzelimpulsenergie ermittelt wird.

**[0030]** Der zeitliche Impulsabstand des nächsten Impulses vom aktuellen Impuls wird zweckmäßig unter Verwendung der mittleren (nominalen) Folgefrequenz  $f_0$  der Strahlungsquelle, dem geforderten Zielwert der Impulsenergie und der gemessenen Einzelimpulsenergie des aktuellen Impulses mit der Berechnungsvorschrift  $\Delta t_{i+1} = E_i / (f_0 \cdot E_0)$  bestimmt.

**[0031]** Für das erfindungsgemäße Verfahren erweist es sich als vorteilhaft, wenn ein lithographisches Belichtungssystem für die Waferbelichtung verwendet wird, das eine Fensterfunktion aufweist, die keine steilen Anstiegs- und Abfallflanken der Strahlungsintensität hat, wobei die Fensterfunktion festlegt, wie viele Einzelimpulse sich wie stark auswirken und wie die Strahlungsintensität der Einzelimpulse entlang einer Scanachse auf dem Wafer örtlich verteilt ist.

**[0032]** Zweckmäßig ist dabei die Fensterfunktion aus der örtlichen Verteilung der Strahlungsintensität des einzelnen Impulses zur Scanachse  $w(x - x_0)$  definiert als

$$\int w(x - x_0) dx = 1,$$

wobei der Ort  $x$  durch das Produkt aus Scangeschwindigkeit  $v$  und Zeit  $t$  ersetzt und unter Verwendung der

zum Zeitpunkt  $t$  von der Strahlungsquelle abgegebenen Strahlungsleistung  $P(t)$  die Gesamtstrahlungsdosis  $D$  an einem bestimmten Ort auf dem Wafer als

$$D = \int w(v \cdot t - v \cdot t_0) P(t) dt \\ = \sum w(v \cdot t_i - v \cdot t_0) E_i$$

berechnet wird.

**[0033]** Als zweckmäßige Fensterfunktion über wenigstens 30 Impulse können annähernd gleichwertig eine Gauß-Funktion, eine Dreieck-Funktion oder eine Trapez-Funktion zum Einsatz kommen.

**[0034]** Zur Kompensation eines so genannten Overshoot- oder Undershoot-Verhaltens der Impulsenergie innerhalb der Anfangsphase eines Burst werden vorteilhaft die mittlere Strahlungsleistung im aktuellen Burst unter Verwendung von vorab gespeicherten Impulsenergiewerten wenigstens eines unregelmäßigen Vorbild-Burst zugrunde gelegt und daraus die Impulsabstände entsprechend der Abweichung von der einstellbaren mittleren Impulsenergie berechnet.

**[0035]** Dabei wird der Impulsabstand zum nächsten Impuls vorzugsweise gemäß der Beziehung

$$\Delta t_{i+1}(k) = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{E_i(k)}{E_0} \cdot \frac{\langle E_{i+1}(j) \rangle}{\langle E_i(j) \rangle}$$

ermittelt, wobei gemittelte Impulsenergiewerte  $\langle E_i(j) \rangle$  mindestens eines unregelmäßigen Vorbild-Burst verwendet werden. Es können für  $\langle E_i(j) \rangle$  aber auch gemittelte Impulsenergiewerte aus mehreren unregelmäßigen Vorbild-Bursts verwendet werden.

**[0036]** Zweckmäßig wird ein unregelmäßiger Vorbild-Burst vorab unter gleichen Anfangsbedingungen und mit gleichem Burstmuster wie der zu regelnde aktuelle Burst aufgenommen und gespeichert.

**[0037]** Die Vorbild-Bursts dafür werden vorzugsweise in einem separaten Kalibrierregime mit mehreren unterschiedlichen Anfangsbedingungen und fest vorgegebenen Burstmustern erzeugt und gespeichert.

**[0038]** Zur Aufnahme der Impulsenergiewerte von Vorbild-Bursts wird die Strahlungserzeugungseinheit vorteilhaft mit fest vorgegebenen Werten der Ladespannung und der Gasbedingungen betrieben.

**[0039]** Die Aufgabe der Erfindung wird des Weiteren bei einer Anordnung zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, insbesondere von Excimerlasern,  $F_2$ -Lasern oder EUV-Strahlungsquellen auf Basis eines heißen Plasmas, bestehend aus einer Strahlungserzeugungseinheit, die Strahlungsimpulse hoher Impulsrate erzeugt, einer Messeinheit zur Messung Einzelimpulsenergie jedes Impulses und einem geschlossenen Regelkreis zur Steuerung von Einflussgrößen der Strahlungserzeugungseinheit, der eine Steuerung des nächsten Impulses auf Basis der Impulsenergiemessungen von mindestens einem Vorgängerimpuls ermöglicht, dadurch gelöst, dass eine Steuereinheit zur Regelung der Impulsfrequenz vorhanden ist, die mit der Messeinheit zur Messung der Impulsenergie des aktuellen Impulses verbunden ist und die am Ausgang ein Steuersignal aufweist, das auf Basis einer Abweichung der gemessenen Einzelimpulsenergie des aktuellen Impulses von einem gewünschten Zielwert der Impulsenergie erzeugt ist und ein Maß für Abstand des nächsten Impulses gegenüber dem aktuellen Impuls darstellt, und dass ein programmierbarer Trigger zur schnellen Änderung des Zeitpunktes der Impulsauslösung zwischen der Steuereinheit und der Strahlungserzeugungseinheit angeordnet ist, mit dem der Zeitpunkt der Auslösung des nächsten Impulses in Abhängigkeit vom Ausgangssignal der Steuereinheit gegenüber der nominalen Impulsfrequenz veränderbar ist.

**[0040]** Vorteilhaft ist die Messeinheit in einem separaten Messkanal der Strahlungserzeugungseinheit angeordnet, wobei in dem separaten Messkanal mindestens die Etendue optischer Übertragungssysteme, die zwischen der Strahlungserzeugungseinheit und einem Anwendungsort der Strahlung vorhanden sind, äquivalent nachgebildet ist.

**[0041]** In einer weiteren zweckmäßigen Variante ist die Messeinheit nach den optischen Übertragungssystemen, die zwischen der Strahlungserzeugungseinheit und einem Anwendungsort der Strahlung vorhanden sind, angeordnet, um die reale Ausbeute an Impulsenergie des aktuellen Impulses am Anwendungsort zu erfassen.

**[0042]** Vorzugsweise ist die Messeinheit in einem lithographischen Belichtungssystem für die Halbleiterchipherstellung in der Nähe der zu belichtenden Oberfläche eines Wafers oder einer dazu konjugierten Ebene angeordnet.

**[0043]** Die Erfindung fußt auf der Überlegung, dass die auf dem Objekt (Wafer) ankommende Strahlungs-dosis, für die bei der Halbleiterchipherstellung sehr enge Schwankungsgrenzen vorgegeben sind, nicht allein durch die von der Strahlungserzeugungseinheit emittierte Einzelimpulsenergie bestimmt wird, sondern auch bestimmte Eigenschaften des Belichtungsstrahlengangs, vor allem Bündelbegrenzungen der Übertragungsoptiken, eine entscheidende Rolle spielen. Dadurch gehen insbesondere bei Quellen, die ihre Strahlung aus einem gepulst generierten Plasma emittieren, wesentliche Anteile der Impulsenergie aufgrund der zufälligen räumlichen Änderung des Quellortes verloren. Diese Strahlungsverluste im optischen Lichtweg sind jedoch nicht proportional zur emittierten Impulsenergie des Quellenmoduls und damit nicht mit der ansonsten zuverlässigen Proportionalregelung der Hochspannung für die Plasmaerzeugung kompensierbar. Die Verwendung anderer oder zusätzlicher Regelgrößen führt zu keiner kausalen Verringerung der Dosischwankungen.

**[0044]** Die Erfindung löst dieses Problem, indem nicht die Energie eines Einzelimpulses als Regelgröße gewählt wird, sondern das zeitliche Mittel der Strahlungsleistung (also des Quotienten aus Impulsenergie und zeitlichem Abstand zum nachfolgenden Impuls) durch Anpassung des zeitlichen Abstandes zwischen zwei Strahlungsimpulsen verwendet wird.

**[0045]** Im Sinne einer genau dosierten Belichtung bei einem lithographischen Scanner muss in der Waferebene die mittlere Leistung der Strahlungsquelle möglichst konstant bleiben, wobei die mittlere Strahlungsleistung definiert ist durch

$$\bar{P} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \cdot \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt . \quad (3)$$

**[0046]** Auf genau den zeitlichen Bereich zwischen dem Anfang eines Einzelimpulses  $t_i$  bis genau vor dem Beginn des nächsten Einzelimpulses  $t_{i+1}$  wird dies zu

$$\bar{P}_i = \frac{1}{\Delta t_{i+1}} E_i , \quad (4)$$

wobei  $E_i$  die Energie des im Intervall liegenden Impulses ist und  $\Delta t_{i+1}$  die Länge des Zeitintervalls ist. Dieser Zusammenhang zeigt, dass die mittlere Leistung  $\bar{P}_i$  durch Veränderung von  $\Delta t_{i+1}$  in gleicher Weise auf Puls-zu-Puls-Basis geregelt werden kann wie durch Veränderung von  $E_{S,i+1}$ .

**[0047]** Mit der Erfindung ist es möglich, die mittlere abgegebene Leistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, insbesondere von Excimerlasern,  $F_2$ -Lasern und EUV-Strahlungsquellen auf Basis von Gasentladungsanregung oder Laseranregung so zu stabilisieren, dass auch dann eine zuverlässige Regelung erfolgt, wenn bei den zur Verfügung stehenden Stellgrößen keine hinreichend zuverlässige Korrelation zwischen Stellgröße und Erwartungswert der Einzelimpulsenergie vorhanden ist. Weiterhin liefert der erfindungsgemäße Lösungsansatz deutlich genauere Ergebnisse, da die Einstellung des Triggerzeitpunktes im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit nicht statistischen Störgrößen unterworfen ist, wie es bei der Steuerung der Einflussgrößen für die Strahlungserzeugung zur Anpassung der Einzelimpulsenergie der Fall ist.

**[0048]** Die Erfindung soll nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Die Zeichnungen zeigen:

**[0049]** **Fig. 1:** ein Blockschema des erfindungsgemäßen Verfahrens,

**[0050]** **Fig. 2:** ein Blockschema des erfindungsgemäßen Verfahrens, bei dem die Messung der Impulsenergie am Ort der Belichtung im Belichtungssystem (nach Durchlaufen mehrerer optischer Systeme) erfolgt,

**[0051]** **Fig. 3:** eine Darstellung des erfindungsgemäßen Regelungsprinzips zur Kompensation der Schwankungen der Impulsenergie durch angepasste Verzögerung der Impulsauslösung in Abhängigkeit von der Abweichung der Impulsenergie vom Zielwert,

**[0052]** **Fig. 4:** eine resultierende Verteilung der Zeitabstände zwischen den Impulsen (Verzögerung), bei einer Quelle mit einer Standardabweichung der Puls-zu-Puls-Energie von  $\sigma = 7\%$  und einer mittleren Folgefrequenz

von 5 kHz,

**[0053]** [Fig. 5](#): eine schematische Darstellung der Zeitabläufe zur erfindungsgemäßen Steuerung der veränderlichen Triggerrung der Strahlungsimpulse,

**[0054]** [Fig. 6a](#): ein Messdiagramm der Impulsenergie eines unregelmäßigen Vorbild-Burst mit anfänglichem Overshoot sowie eines daraus gebildeten mittleren Vorbild-Burst,

**[0055]** [Fig. 6b](#): eine Darstellung der berechneten Impulsabstände  $\Delta t_{i+1}$  zur Kompensation des Impulsenergie-Overshoots von [Fig. 6a](#) für einen Burst mit gleichbleibender mittlerer Strahlungsleistung.

**[0056]** Das Verfahren zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, vorzugsweise von Excimerlasern,  $F_2$ -Lasern oder EUV-Strahlungsquellen auf Basis eines heißen Plasmas, weist – wie aus den Regelungsschemata von [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) erkennbar – folgende Schritte auf:

- Messen der Einzelimpulsenergie  $E_i$  des aktuellen Strahlungsimpulses,
- Bestimmen der Abweichung  $\Delta E = E_i - E_0$  der aktuellen Einzelimpulsenergie  $E_i$  von einem vorherbestimmten Zielwert  $E_0$  der Einzelimpulsenergie,
- Steuern des Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$  bis zum Auslösen des nächsten Strahlungsimpulses in Abhängigkeit von der Größe der Abweichung der aktuellen Einzelimpulsenergie  $E_i$  vom Zielwert  $E_0$ .

**[0057]** Durch Programmieren des schnellen Triggers **11** wird der nächste Impuls umso früher ausgelöst, je größer die Unterschreitung, und umso später getriggert je größer die Überschreitung des Zielwertes  $E_0$  der Einzelimpulsenergie durch den aktuellen Einzelimpulsenergie  $E_i$  ermittelt wird. Bei Erreichung des Zielwertes  $E_0$  wird der Trigger **11** auf die vorgewählte mittlere Folgefrequenz  $f_0$  eingestellt.

**[0058]** Dazu wird der zeitliche Impulsabstand  $\Delta t_{i+1}$  des nächsten Impulses vom aktuellen Impuls unter Verwendung der mittleren Folgefrequenz  $f_0$ , des geforderten Zielwertes  $E_0$  der Impulsenergie und der gemessenen Einzelimpulsenergie  $E_i$  des aktuellen Einzelimpulses in der Steuereinheit **22** mit der Berechnungsvorschrift  $\Delta t_{i+1} = E_i / (f_0 \cdot E_0)$  bestimmt.

**[0059]** Zur Regelung der mittleren Strahlungsleistung der Strahlungsquelle **1** wird – wie in [Fig. 1](#) gezeigt – eine geschlossene Regelschleife **2** in der Strahlungsquelle **1** implementiert. Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Regelungen von gasentladungsbetriebenen Strahlungsquellen, die vorzugsweise die Ladespannung steuern, besteht hier in der Schnittstelle der Steuereinheit **22**.

**[0060]** In allen vorbekannten Verfahren übergibt ein Steuerrechner den ermittelten Wert der Ladespannung an einen programmierbaren Hochspannungsimpulsgenerator. Im Gegensatz dazu wird gemäß der Erfindung das Ergebnis der Energiemessung am Ausgang der Messeinheit **21** zur Berechnung eines geänderten Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$  in der Steuereinheit **22** verwendet, um den programmierbaren Trigger **11** anzusteuern, der die Auslösung des nächsten Impulses der Strahlungserzeugungseinheit **12** der Strahlungsquelle **1** zeitlich verzögert oder verfrüht auslöst.

**[0061]** Gemäß [Fig. 1](#) besteht die Regelschleife **2** mindestens aus den Komponenten:

- a) Messeinheit **21** zur Messung der Einzelimpulsenergie, enthaltend einen strahlungsempfindlichen Sensor und eine Messwertumformer zur Umformung des Messwerts in ein durch einen Steuerrechner verarbeitbares Datenformat;
- b) Steuereinheit **22** (Steuerrechner) zur Ausführung des Regelalgorithmus;
- c) programmierbarer Triggeregenerator **11**, der die veränderliche zeitgenaue Auslösung des nächsten Einzelimpulses vornimmt;
- d) Strahlungserzeugungseinheit **12** zur Erzeugung des Strahlung emittierenden Plasmas, z. B. Entladungseinheit einer gasentladungsbetriebenen EUV-Strahlungsquelle **1**; und
- e) optischer Weg von der Strahlungsquelle **1** zur Messeinheit **21**.

**[0062]** Je nach Implementierung des Regelkreises **2** bietet sich die Möglichkeit, die Messung der Einzelimpulsenergie wahlweise direkt an der Strahlungsquelle **1** vorzunehmen ([Fig. 1](#)) oder außerhalb der Strahlungsquelle **1**, z. B. innerhalb eines lithographischen Belichtungssystems **3** (Scanner), anzuordnen ([Fig. 2](#)). Dabei steht die Messeinheit **21** jeweils in einer zur Waferoberfläche konjugierten Ebene und ermittelt die abgegebene Strahlungsenergie der einzelnen Strahlungsimpulse. Gemäß der Ausführung von [Fig. 2](#) werden insbesondere auch die Einflüsse der optischen Übertragungssysteme **31** die zwischen der Strahlungsquelle **1** und den einer

abzubildenden Maske und der Waferoberfläche zum Einsatz kommen, mit berücksichtigt.

**[0063]** Das wesentliche Prinzip der Regelung zeigt [Fig. 3](#) in einer schematischen Darstellung der Impulsenergie über der Zeitachse. Ausgehend von einer gewünschten mittleren Folgefrequenz  $f_0$  der Strahlungsimpulse der Strahlungsquelle **1** wird der Impulsabstand  $\Delta t_i$  zwischen zwei Impulsen in Abhängigkeit von der Größe der Abweichung der Strahlungsenergie  $E_i$  des aktuellen Impulses vom vorgegebenen Zielwert  $E_0$  der Impulsenergie gesteuert durch Berechnung eines angepassten Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$ , bis der nächste Impuls mit einer Impulsenergie  $E_{i+1}$  ausgelöst wird.

**[0064]** Der Impulsabstand  $\Delta t_{i+1}$  fällt um so kleiner aus, je mehr der Ziel-Energie-Wert  $E_0$  durch die Impulsenergie  $E_i$  des aktuellen Impulses unterschritten wurde. Er verlängert sich umso mehr, je höher die Ziel-Energie  $E_0$  durch die aktuelle Impulsenergie  $E_i$  überschritten wurde. Wurde die Ziel-Energie  $E_0$  im aktuellen Impuls eingehalten, wird der Impulsabstand mit  $1/f_0$  auf die gewünschte mittlere Folgefrequenz  $f_0$  eingestellt.

**[0065]** Bei Anwendung dieses Verfahrens wird die erreichbare Dosisstabilität auf dem Wafer durch eine so genannte Fensterfunktion (engl.: window function) des Belichtungssystems **3** bestimmt. Die Fensterfunktion definiert, wie viele Einzelimpulse wie stark zur Gesamtstrahlungsmenge an einer bestimmten Stelle des Wafers beitragen und beschreibt die örtliche Verteilung der Strahlungsintensität eines einzelnen Impulses entlang der Scanachse  $w(x - x_0)$ .

**[0066]** Per Definition gilt für die Fensterfunktion

$$\int w(x - x_0) dx = 1.$$

**[0067]** Da der Ort  $x$  über die Scangeschwindigkeit  $v$  mittels der Beziehung  $x = v \cdot t$  in eine Zeit umgerechnet werden kann, bestimmt sich die Gesamtstrahlungsdosis  $D$  an einem bestimmten Ort auf dem Wafer zu

$$\begin{aligned} D &= \int w(v \cdot t - v \cdot t_0) P(t) dt \\ &= \sum w(v \cdot t_i - v \cdot t_0) E \end{aligned} \quad (5)$$

je nachdem, ob eine kontinuierlich leuchtende oder eine gepulste Strahlungsquelle betrachtet wird.

**[0068]** Da sich die exakte statistische Bestimmung des Dosisfehlers aus dem Rauschen als aufwendig und schwierig erweist, kann der Dosisfehler auch vorteilhaft durch eine numerische Simulation einer mit dem erfindungsgemäßen Verfahren geregelten Strahlungsquelle **1** bestimmt werden.

**[0069]** In der Simulation wird zunächst die Folge aller  $E_i$  und  $t_i$  bestimmt und danach, unter Anwendung von Gleichung (5), die in diesem Fall auftretende Dosis in Abhängigkeit vom Ort auf dem Wafer  $D(x)$  bzw.  $D(v \cdot t)$ . Die Dosisstabilität  $\sigma_D$  ergibt sich damit als mittlere quadratische Abweichung der Dosis vom Sollwert  $D_0$ :

$$\sigma_D = \frac{1}{x} \sqrt{\int (D(x) - D_0)^2 dx}. \quad (6)$$

**[0070]** Als wesentlicher Faktor für die Genauigkeit der Belichtungsdosis geht der verwendete Regelalgorithmus ein. Vorteilhaft wird er so gewählt, dass er

- (a) eine möglichst hohe Stabilisierung der Dosis erreicht und
- (b) möglichst wenig Rechenleistung in der Steuereinheit **22** benötigt.

**[0071]** Vorteilhaft kommt eine einfache Version eines PI-Reglers zum Einsatz, die im jeweils nächsten Impuls versucht, den Fehler des vorherigen Impulses auszugleichen. Damit ergibt sich für den Regelalgorithmus der folgende Ansatz:

$$\begin{aligned} \Delta t_{i+1} &= \Delta t_0 + \Delta(\Delta t_i) \\ &= \Delta t_0 + \Delta t_0 \cdot \frac{E_i - E_0}{E_0} \\ &= \Delta t_0 \cdot \frac{E_i}{E_0} \\ &= \frac{1}{f_0} \cdot \frac{E_i}{E_0} \end{aligned} \quad (7)$$

**[0072]** Der Impulsabstand  $\Delta t_{i+1}$  zum nächsten Impuls kann damit direkt aus der gewünschten mittleren Folgefrequenz  $f_0$  der Quelle, sowie der Impulsenergie des letzten Impulses  $E_i$  und dem gewünschten Sollwert für die Einzelimpulsenergie (Ziel-Energie  $E_0$ ) gewonnen werden.

**[0073]** [Fig. 3](#) zeigt, wie sich das Verfahren auf den zeitlichen Abstand von Impulsen auswirkt. Liegt die gemessene Einzelimpulsenergie  $E_i$  über dem gewählten Ziel-Energie  $E_0$  wird der zeitliche Abstand  $\Delta t_{i+1}$  zum nächsten Impuls größer ausfallen als bei zu kleiner abgegebener Impulsenergie. Die mittlere Leistung  $\bar{P}_i = E_i/\Delta t_{i+1} = E_0 \cdot f_0$  wird dabei konstant gehalten.

**[0074]** Zur Veranschaulichung wurde das Verfahren auf eine Strahlungsquelle **1** mit einer Standardabweichung der Puls-zu-Puls-Energieschwankungen von  $\sigma = 7\%$  und einer nominalen Folgefrequenz  $f_0$  von 5 kHz angewendet. Die daraus resultierende Verteilung der Zeitabstände zwischen den Impulsen zeigt [Fig. 4](#).

**[0075]** Weiterhin wurde die Dosisgenauigkeit als Ergebnis der angegebenen Regelung für verschiedene Fensterfunktionen bestimmt und in Tabelle 1 zusammengefasst.

**[0076]** Die Fensterfunktion ist eine Eigenschaft des lithographischen Belichtungssystems **3** (Scanner) und entspricht physikalisch dem Querschnitt der Strahlungsintensität eines einzelnen Impulses auf der Waferoberfläche entlang der Scanachse bezogen auf die Scangeschwindigkeit. Über die Beziehung  $x = v \cdot t$  wird die Breite des beleuchteten Flecks auf dem Wafer von der Scangeschwindigkeit und dem zeitlichen Abstand zwischen zwei Impulsen beeinflusst. Die verwendete Fensterfunktion abstrahiert dabei die Intensitätsverteilungen der einzelnen Strahlungsimpulse und wie stark sich diese bei der vorgegebenen Scanbewegung auf der Waferoberfläche überlappen.

**[0077]** Ist die Strahlungsintensität eines einzelnen Impulses klein (und/oder die Empfindlichkeit der photoempfindlichen Schicht auf dem Wafer niedrig), muss die Scangeschwindigkeit solange herabgesetzt (und/oder die nominale Folgefrequenz  $f_0$  der Impulse erhöht) werden, bis ausreichend viele Strahlungsimpulse zur Belichtung eines Ortes auf dem Wafer beitragen.

**[0078]** Bei den derzeitigen lithographischen Scannern (Belichtungssystemen **3**) stellen Fensterfunktionen mit einigen 10 bis einigen 100 Impulsen gängige Größen dar.



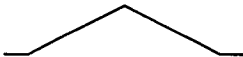
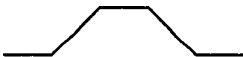
**[0079]** Für EUV-Strahlungsquellen auf Basis einer Gasentladung sind derzeit Fensterbreiten ab 50 Impulsen geeignet. Bei der Einkopplung von  $F_2$ -Lasern und Excimerlasern kann mit kleineren Fensterbreiten der Fensterfunktion (ab 30 Impulsen) gearbeitet werden.

**[0080]** Die zeitliche Breite der Fensterfunktionen ist bei den der Tabelle 1 zugrundeliegenden Simulationen so gewählt, dass in allen Fällen die Energie von genau 50 Einzelimpulsen (bei nominaler Folgefrequenz  $f_0$ ) zur Gesamtdosis beiträgt, also  $50/f_0$ .

**[0081]** Hat die Fensterfunktion eine Breite von 50 Impulsen, bedeutet das, dass zwei aufeinanderfolgende Strahlungsimpulse zwei beleuchtete Flecken (Spots) auf dem Wafer erzeugen, die um  $1/50$  der Spotgröße verschoben erscheinen.

**[0082]** Aus statistischen Gründen erwartet man in diesem Fall selbst bei einer unregelmäßigen Strahlungsquelle allein durch die Mittelung schon eine Verbesserung der Dosisstabilität um den Faktor  $\sqrt{50}$ , also etwa 0,990% Dosisstabilität, wie die erste Zeile der nachfolgenden Tabelle 1 im Vergleich von unterschiedlichen Fensterfunktionstypen zeigt.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Fensterfunktionen

Fensterfunktion	Dosisstabilität $\sigma_D$	
	Regelung von $\Delta t_i$	Regelung von $E_i$
gleitendes Mittel, 50 Impulse	0,990 %	
Rechteck		0,829 %      0,203
Gauß		0,033 %      0,052
Dreieck		0,014 %      0,034
Trapez 1/3 - 1/3 - 1/3		0,020 %      0,048

**[0083]** Tabelle 1 zeigt die Simulationsergebnisse mit der erfindungsgemäßen und einer herkömmlichen Regelung für unterschiedliche Typen von Fensterfunktionen.

**[0084]** Dabei wird deutlich, dass die Vorteile der Regelung durch Steuerung des Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$ , besonders bei Fensterfunktionen mit schrägen Flanken, wie beispielsweise Gauß-, Dreiecks- oder Trapezfunktion, zum Tragen kommen.

**[0085]** Da die Rechteckfunktion ohnehin keine realistische Belichtungsfunktion darstellt, ist die Regelung der Impulsfolgefrequenz für reale und übliche Fensterfunktionen den herkömmlichen Regelungsverfahren der Impulsenergie überlegen. Das trifft insbesondere für die in der letzten Zeile von Tabelle 1 beschriebene Trapezfunktion zu, die in modernen Scannern vorrangig zum Einsatz kommt.

**[0086]** Der direkte Vergleich mit der herkömmlichen Puls-zu-Puls-Energiestabilisierung (mit ähnlich einfacher Regelvorschrift:  $E_{S,i+1} = E_0 + E_{S,i} - E_i$ ) belegt, dass die Regelung des Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$  (mit Ausnahme der Rechteckfensterfunktion) vergleichbare oder sogar bessere Ergebnisse liefert. Für plasmabasierte Strahlungsquellen, bei denen eine Fluktuation des Quellortes nicht ausgeschlossen werden kann, stellt sie jedoch die einzige wirksame Regelung zur Stabilisierung der Strahlungs-dosis dar.

**[0087]** Das Verfahren gemäß der Erfindung stellt an den programmierbaren Trigger **11** die Anforderung, dass auch noch kurz vor dem Auslösen des nächsten Impulses eine Änderung des Auslösezeitpunktes möglich sein muss. Dazu ist eine möglichst kurze Vorlaufzeit erforderlich, die der Trigger **11** intern benötigt, bevor der nächste Triggerimpuls zeitgenau ausgehen werden kann. In [Fig. 5](#) ist diese Vorlaufzeit durch die interne Eingabetotzeit  $t_{tot}$  des Triggers **11** gekennzeichnet.

**[0088]** Das Zeitintervall  $t_{min}$  bezeichnet die minimal einstellbare Zeitdauer zwischen zwei Strahlungsimpulsen. Sie wird festgelegt durch die Verarbeitungszeit (Strahlungsimpuls, Energiemessung, Berechnung des angepassten Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$ , Programmierung des Triggers **11**) sowie die maximale Wiederholfrequenz der Strahlungserzeugungseinheit **12** der Strahlungsquelle **1**.

**[0089]** Der vorgewählte durchschnittliche Impulsabstand  $\Delta t_i = 1/f_0$ , d. h. der nach nominell vorgesehener Impulsfrequenz  $f_0$  vorgegebene Impulsabstand  $\Delta t_i$  (zur Einstellung des optimalen Betriebsregimes der Strahlungserzeugungseinheit **12**) muss immer etwas größer als  $t_{min}$  sein, um auch eine Verkürzung des Impulsabstandes  $\Delta t_{i+1}$  vornehmen zu können. Diese zeitlichen Zusammenhänge sind in [Fig. 5](#) dargestellt.

**[0090]** Der durchschnittliche Impulsabstand  $\Delta t_i = 1/f_0$  muss also wie folgt angesetzt werden:

$$\Delta t_{i+1} = t_{min} + t_{add}$$

wobei eine Zeitzugabe  $t_{add}$  so zu wählen ist, dass das minimale Zeitintervall  $t_{min}$ , d. h.  $t_{add} = 0$  nur bei maximal

zu erwartender „Unterbelichtung“ (größte negative Abweichung der Impulsenergie  $E_i$  des aktuellen Impulses von der vorgegebenen Ziel-Energie  $E_0$  der Einzelimpulsenergie) zur Anwendung kommt.

**[0091]** Obwohl die Erfindung in den angegebenen Beispielen im Zusammenhang mit gasentladungsgetriebenen EUV-Strahlungsquellen beschrieben wurde, ist sie in äquivalenter Weise ebenfalls auf jegliche Strahlungsquellen, die gepulst betrieben werden, insbesondere laserbasierende EUV-Quellen, Excimerlaser und  $F_2$ -Laser, anwendbar.

**[0092]** Weiterhin ist die Erfindung nicht, wie in den Beispielen gewählt, auf den einfachen Zusammenhang  $\Delta t_{i+1} = E_i / (f_0 \cdot E_0)$  beschränkt, sondern es sind jegliche Regelalgorithmen mit umfasst, die aus der gemessenen Einzelimpulsenergie und weiteren bekannten oder gemessenen Systemgrößen die Zeitdauer bis zum nächsten Strahlungsimpuls berechnen, um die mittlere Impulsenergie auf den gewünschten Zielwert (Erwartungswert) der Impulsenergie einzustellen. Die Erfindung ist also auf beliebige Regelungszusammenhänge anwendbar, bei denen ein Zielwert der mittleren (Strahlungs-)Leistung durch Änderung der Impulsabstände erreicht wird.

**[0093]** Die hier vorgeschlagene Steuerung der Dosis über den zeitlichen Impulsabstand  $\Delta t_i$  zwischen zwei Impulsen kann in gleicher Weise auch zur Overshoot- und Undershoot-Kompensation der mittleren Strahlungsleistung  $P_i(k) = E_i(k) / \Delta t_{i+1}(k)$  (gemäß Gleichung (4)) innerhalb eines aktuellen Burst  $k$  genutzt werden.

**[0094]** Alle im folgenden genannten Impulsenergiewerte  $E_i(k)$ ,  $E_i(j)$  beziehen sich auf Impulsenergien, die mit geeigneten Mitteln nahe der Waferebene oder einer konjugierten Ebene gemessen werden.

**[0095]** Dazu werden z. B. ausgehend von einem Vorbild-Burst  $j$  (bzw. einem mittleren Vorbild-Burst  $\langle j \rangle$ ) gemäß Gleichung (8) die  $\Delta t_{i+1}(k)$ -Werte wie folgt berechnet

$$\Delta t_{i+1}(k) = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{E_i(k)}{E_0} \cdot \frac{\langle E_{i+1}(j) \rangle}{\langle E_i(j) \rangle} \quad (8)$$

Gleichung (8) ist eine Modifikation der Gleichung (7).

**[0096]** Dabei sind  $\langle E_i(j) \rangle$  die Impulsenergiewerte eines mittleren unregulierten Vorbild-Burst (siehe gestrichelte Kurve in [Fig. 6a](#)).

**[0097]** Ein Vorbild-Burst  $j$  wird in einem separaten Kalibriermodus der Strahlungsquelle (i. d. R. ohne Belichtung eines Wafers) mit für die Belichtung typischen Burstmustern erzeugt und deren Impulsenergiewerte  $E_i(j)$  abgespeichert. Der Kalibriermodus kann dann mehrfach durchgeführt werden, um mittlere Impulsenergiewerte  $\langle E_i(j) \rangle$  berechnen zu können. Die Nutzung eines mittleren Vorbild-Burst  $\langle j \rangle$  hat den Vorteil, dass auch Impulsenergiewerte bei Zeiten zwischen den eigentlichen Impulsen interpoliert werden können und mit genügend guter Vorhersagewahrscheinlichkeit zur Verfügung stehen. Für den zu regelnden aktuellen Burst  $k$  dient zweckmäßig ein solcher Vorbild-Burst  $j$ , der die gleiche Vorgeschichte (z. B. Länge der vorherigen Burstpause) wie der aktuelle Burst  $k$  hat.

**[0098]** Dazu ist anzumerken, dass der Faktor  $\langle E_{i+1}(j) \rangle / \langle E_i(j) \rangle$  in vielen Fällen näherungsweise gleich eins ist. Gemäß dem Beispiel von [Fig. 6a](#) ergibt sich:

$$\langle E_{i+1}(j) \rangle / \langle E_i(j) \rangle > 1 \approx (\text{max. Overshoot}) / (\text{Anzahl d. Overshoot-Impulse}) \\ \approx 1 + 20\% / 50 = 1,004.$$

**[0099]** [Fig. 6a](#) zeigt beispielhaft einen im unregulierten Betrieb gemessenen Vorbild-Burst (durchgezogene Kurve) bzw. einen mittleren Vorbild-Burst (gestrichelte Linie) mit einem Overshoot von 20% und einer sich nach der Einlaufphase von ca. 50 Impulsen einstellenden stationären Impulsenergie von 10 mJ.

**[0100]** [Fig. 6b](#) stellt – bei einer für die Strahlungsquelle **1** vorgewählten nominalen Impulsfolgefrequenz  $f_0$  von 5 kHz – alle nach Gleichung (8) im Burst  $k$  berechneten Impulsabstände  $\Delta t_i(k)$  zur Erzielung einer mittleren Strahlungsleistung  $P_i(k)$  ohne Overshoot dar. Wie leicht zu erkennen ist, werden die Impulsabstände am Burstfang entsprechend der Höhe des Overshoot vergrößert und gleichen sich im Verlauf von ca. 50 Impulsen immer mehr der nominalen Impulsfolgefrequenz  $f_0$  an.

**[0101]** Die Ladespannung bleibt bei dieser Prozedur konstant und ist so eingestellt, dass die Strahlungsquelle

**1** in einem für die Emissionsbedingungen und die Lebensdauer optimalen Regime betrieben wird und die notwendige mittlere Impulsenergie zur Einstellung der geforderten Strahlungsdosis auf dem Wafer ausreicht. Zusätzlich wird im vorliegenden Fall die Gasversorgung so eingestellt, dass in der Strahlungserzeugungseinheit **12** optimale Entladungsbedingungen aufrecht erhalten werden.

**[0102]** Somit werden bei der erfindungsgemäßen Regelung zur Overshoot-Kompensation alle Stellgrößen zur Steuerung der Einzelimpulsenergie in der Strahlungserzeugungseinheit **12** – so wie sie für den Langzeitbetrieb der Strahlungsquelle **1** optimal eingestellt wurden – konstant gehalten.

**[0103]** Zum Ausgleich der Abweichungen der aktuellen Impulsenergie  $E_i$  von deren Zielwert  $E_0$  (d. h. zur Einstellung einer konstanten mittleren Strahlungsleistung  $\bar{P}_i$  in einem Burst mit Ca. 50 anfänglichen Overshoot-Impulsen) werden ausschließlich, d. h. ohne herkömmliche Impulsenergieregulierung, die schnellen Regelungsvorgänge zur Anpassung der Impulsabstände  $\Delta t_i$  zwischen den einzelnen Impulsen, d. h. eine adaptive Impulsfrequenzsteuerung, genutzt.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Strahlungsquelle
<b>11</b>	Trigger
<b>12</b>	Strahlungserzeugungseinheit
<b>2</b>	Regelkreis
<b>21</b>	Messeinheit
<b>22</b>	Steuereinheit
<b>3</b>	(lithographisches) Belichtungssystem
<b>31</b>	optische Übertragungssysteme
$E_0$	Zielwert der Impulsenergie
$\Delta t_i, \Delta t_{i+1}$	Impulsabstand
$f_0$	(nominelle) Folgefrequenz
<b>j</b>	Vorbild-Burst (ungeregelt)
<b>k</b>	aktueller Burst
$\bar{P}_i$	mittlere Strahlungsleistung
$\langle E_i(j) \rangle$	mittlerer Vorbild-Burst (ungeregelt)
<b>D</b>	Gesamtstrahlungsdosis
<b>v</b>	Scangeschwindigkeit
<b>P(t)</b>	Strahlungsleistung zum Zeitpunkt t

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Stabilisierung der mittleren abgegebenen Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, insbesondere von Excimerlasern,  $F_2$ -Lasern oder EUV-Strahlungsquellen auf Basis eines heißen Plasmas, gekennzeichnet durch die folgenden Schritte:

- Messen der Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) des aktuellen Strahlungsimpulses,
- Bestimmen der Abweichung  $\Delta E = E_i - E_0$  der aktuellen Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) von einem vorherbestimmten Zielwert ( $E_0$ ) der Einzelimpulsenergie,
- Steuern des Impulsabstandes ( $\Delta t_{i+1}$ ) bis zum Auslösen des nächsten Strahlungsimpulses in Abhängigkeit von der Größe der Abweichung der aktuellen Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) vom Zielwert ( $E_0$ ) der Impulsenergie.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass durch rechtzeitiges Programmieren eines schnellen Triggers (**11**) der Impuls umso früher ausgelöst wird, je größer die Unterschreitung, und umso später, je größer die Überschreitung des Zielwertes ( $E_0$ ) durch die aktuelle Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Impulsabstand ( $\Delta t_{i+1}$ ) bestimmt wird aus:

- der mittleren Folgefrequenz ( $f_0$ ) der Einzelimpulse,
- dem geforderten Zielwert der Impulsenergie ( $E_0$ ) und
- der gemessenen Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) des aktuellen Impulses unter Verwendung der Berechnungsvorschrift  $\Delta t_{i+1} = E_i / (f_0 \cdot E_0)$ .

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein lithographisches Belichtungssystem (**3**) für die Waferbelichtung eine Fensterfunktion, die festlegt, mit welchem Anteil jeder Einzelimpuls der Folge von Einzelimpulsen zur Gesamtstrahlungsdosis an einem bestimmten Ort des Wafers beiträgt und wie die Strah-

lungsintensität jedes Einzelimpulses entlang einer Scanachse verteilt ist, derart aufweist, dass die Fensterfunktion keine steilen Anstiegs- und Abfallflanken der Strahlungsintensität hat.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass aus der örtlichen Verteilung der Strahlungsintensität eines einzelnen Impulses zur Scanachse  $w(x - x_0)$  die Fensterfunktion so definiert wird, dass

$$\int w(x - x_0) dx = 1,$$

wobei der Ort  $x$  durch das Produkt aus Scangeschwindigkeit  $v$  und Zeit  $t$  ersetzt und unter Verwendung der zum Zeitpunkt  $t$  von der Strahlungsquelle abgegebenen Strahlungsleistung  $P(t)$  die Gesamtstrahlungsdosis  $D$  an einem bestimmten Ort auf dem Wafer zu

$$D = \int w(v \cdot t - v \cdot t_0) P(t) dt \\ = \sum w(v \cdot t_i - v \cdot t_0) E_i$$

berechnet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass als Fensterfunktion eine Gauß-Funktion über wenigstens 30 Impulse verwendet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass als Fensterfunktion eine Dreieck-Funktion über wenigstens 30 Impulse verwendet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass als Fensterfunktion eine Trapez-Funktion über wenigstens 30 Impulse verwendet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Kompensation eines so genannten Overshoot- oder Undershoot-Verhaltens der Impulsenergie innerhalb der Anfangsphase eines Burst die mittlere Strahlungsleistung ( $\bar{P}_i(k)$ ) im aktuellen Burst ( $k$ ) unter Verwendung von vorab gespeicherten Impulsenergiewerten ( $E_i(j)$ ) wenigstens eines unregelmäßigen Vorbild-Burst ( $j$ ) zugrunde gelegt wird und daraus die Impulsabstände ( $\Delta t_{i+1}(k)$ ) entsprechend der Abweichung von der einstellbaren mittleren Impulsenergie ( $E_0$ ) berechnet werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Impulsabstand zum nächsten Impuls gemäß der Beziehung

$$\Delta t_{i+1}(k) = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{E_i(k)}{E_0} \cdot \frac{\langle E_{i+1}(j) \rangle}{\langle E_i(j) \rangle}$$

ermittelt wird, wobei als gemittelte Impulsenergiewerte ( $\langle E_i(j) \rangle$ ) mindestens Impulsenergiewerte ( $E_i(j)$ ) eines unregelmäßigen Vorbild-Burst ( $j$ ) verwendet werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass als gemittelte Impulsenergiewerte ( $\langle E_i(j) \rangle$ ) gemittelte Impulsenergiewerte ( $E_i(j)$ ) aus mehreren unregelmäßigen Vorbild-Bursts ( $j$ ) verwendet werden.

12. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass ein unregelmäßiger Vorbild-Burst ( $j$ ) vorab unter gleichen Anfangsbedingungen und mit gleichem Burstmuster wie der zu regelnde aktuelle Burst ( $k$ ) aufgenommen und gespeichert wird.

13. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass Vorbild-Bursts ( $j$ ) in einem separaten Kalibrierregime mit mehreren unterschiedlichen Anfangsbedingungen und fest vorgegebenen Burstmustern erzeugt und gespeichert werden.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass zur Aufnahme der Impulsenergiewerte von Vorbild-Bursts ( $j$ ) die Strahlungserzeugungseinheit (12) mit fest vorgegebenen Werten der Ladespannung und der Gasbedingungen betrieben wird.

15. Anordnung zur Stabilisierung der mittleren Strahlungsleistung einer gepulst betriebenen Strahlungsquelle, insbesondere von Excimerlasern,  $F_2$ -Lasern oder EUV-Strahlungsquellen auf Basis eines heißen Plasmas, enthaltend eine Strahlungserzeugungseinheit, die Strahlungsimpulse hoher Impulsrate erzeugt, eine

Messeinheit zur Messung der Impulsenergie jedes Einzelimpulses und einen geschlossenen Regelkreis zur Steuerung von Einflussgrößen der Strahlungserzeugungseinheit, der eine Steuerung des nächsten Impulses auf Basis von Impulsenergiemessungen von mindestens einem Vorgängerimpuls ermöglicht, dadurch gekennzeichnet, dass

- eine Steuereinheit (**22**) zur Regelung von Impulsabständen vorhanden ist, die mit der Messeinheit (**21**) zur Messung der Impulsenergie des aktuellen Impulses verbunden ist und die am Ausgang ein Steuersignal aufweist, das auf Basis einer Abweichung der gemessenen Einzelimpulsenergie ( $E_i$ ) des aktuellen Impulses von einem gewünschten Zielwert der Impulsenergie ( $E_0$ ) erzeugt ist und ein Maß für den Sollwert des Impulsabstandes ( $\Delta t_{i+1}$ ) des nächsten Impulses gegenüber dem aktuellen Impuls darstellt, und
- ein programmierbarer Trigger (**11**) zur schnellen Änderung des Zeitpunktes der Impulsauslösung zwischen der Steuereinheit (**22**) und der Strahlungserzeugungseinheit (**12**) angeordnet ist, mit dem der Zeitpunkt der Auslösung des nächsten Impulses in Abhängigkeit vom Ausgangssignal der Steuereinheit (**22**) gegenüber der nominalen Folgefrequenz ( $f_0$ ) der Einzelimpulse veränderbar ist.

16. Anordnung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinheit (**21**) in einem separaten Messkanal der Strahlungsquelle (**1**) angeordnet ist, wobei in dem separaten Messkanal mindestens die Eten- due von optischen Übertragungssystemen (**31**) eines Belichtungssystems (**3**), die zwischen der Strahlungserzeugungseinheit (**12**) und einem Anwendungsort der Strahlung vorhanden sind, äquivalent nachgebildet ist.

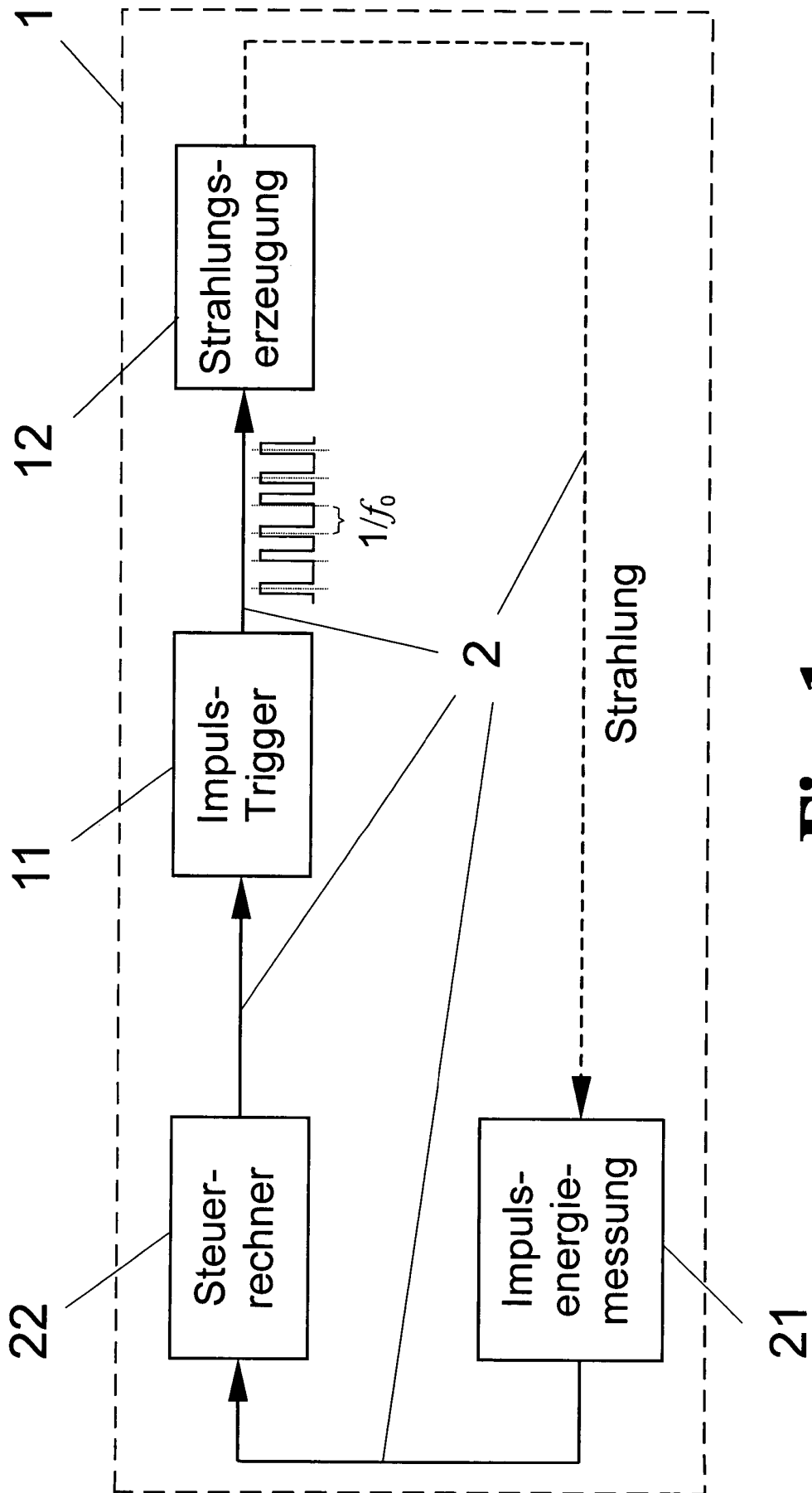
17. Anordnung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinheit (**21**) nach optischen Übertragungssystemen (**31**), die zwischen der Strahlungserzeugungseinheit (**12**) und einem Anwendungsort der Strahlung vorhanden sind, angeordnet ist, um die reale Ausbeute an Impulsenergie des aktuellen Impulses am Anwendungsort zu erfassen.

18. Anordnung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinheit (**21**) in einem lithographischen Belichtungssystem (**3**) für die Halbleiterchipherstellung in der Nähe der zu belichtenden Oberfläche eines Wafers angeordnet ist.

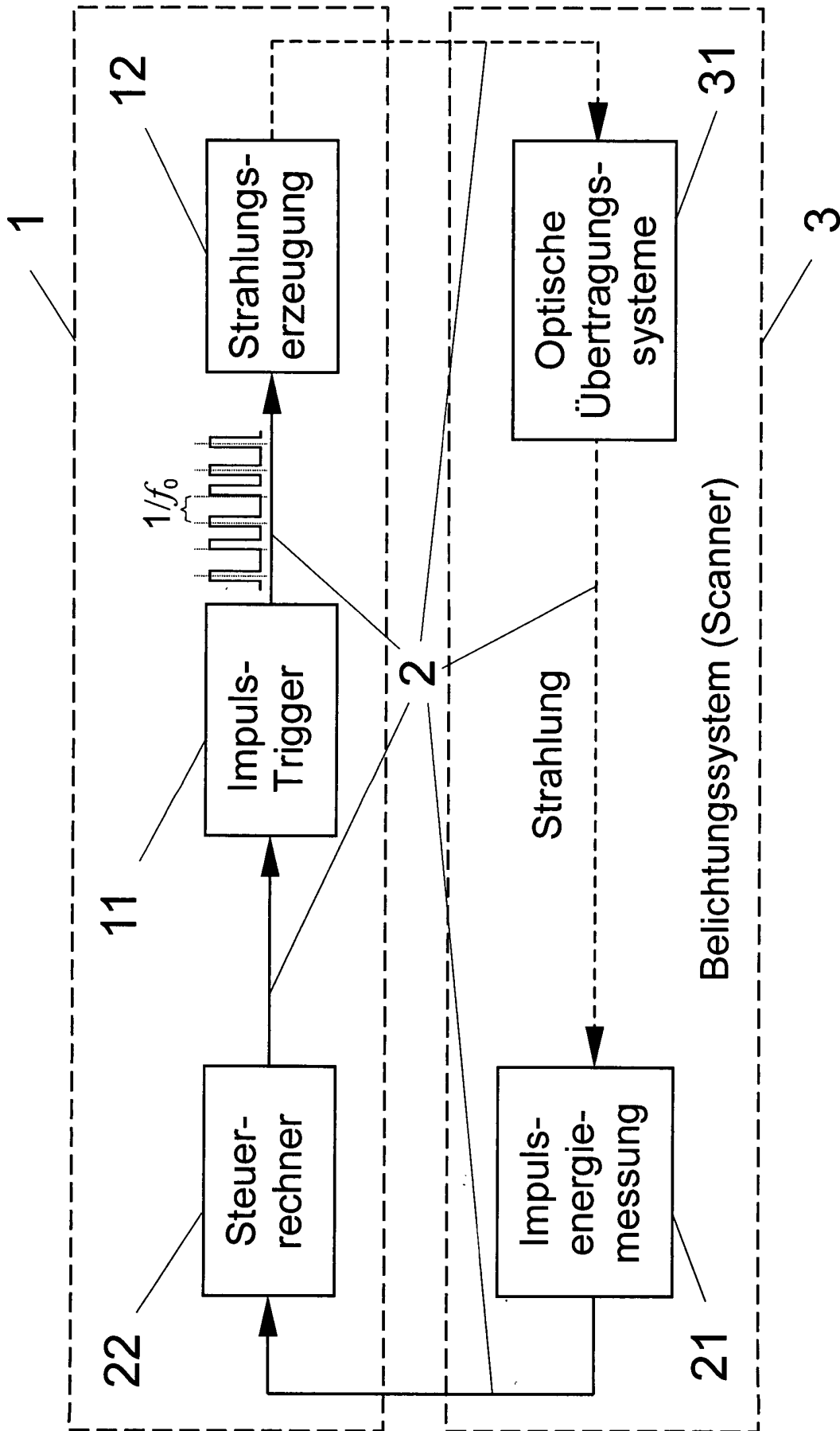
19. Anordnung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinheit (**21**) in einem lithographischen Belichtungssystem (**3**) für die Halbleiterchipherstellung in der Nähe einer Maske, die auf einen zu belichtenden Wafer abzubilden ist, angeordnet ist.

20. Anordnung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Messeinheit (**21**) durch ein in einem lithographischen Belichtungssystem (**3**) für die Halbleiterchipherstellung in einer konjugierten Waferebene angeordnetes Detektorsystem gebildet wird, wobei das Detektorsystem für andere Messaufgaben vorgesehen ist und zusätzlich zur Aufnahme und Übermittlung der Impulsenergie ( $E_i$ ) der einzelnen Strahlungsimpulse mit der Steuereinheit (**22**) der Strahlungsquelle (**1**) verbunden ist.

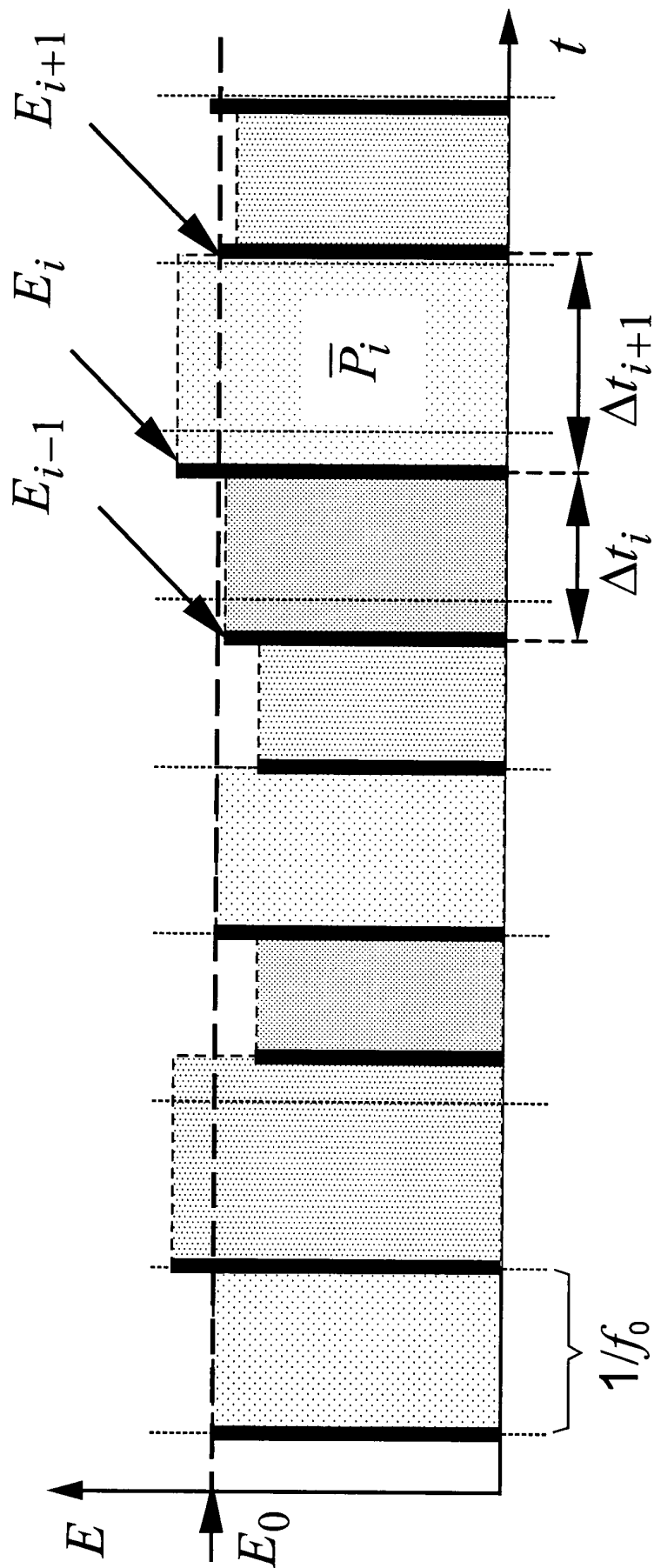
Es folgen 6 Blatt Zeichnungen



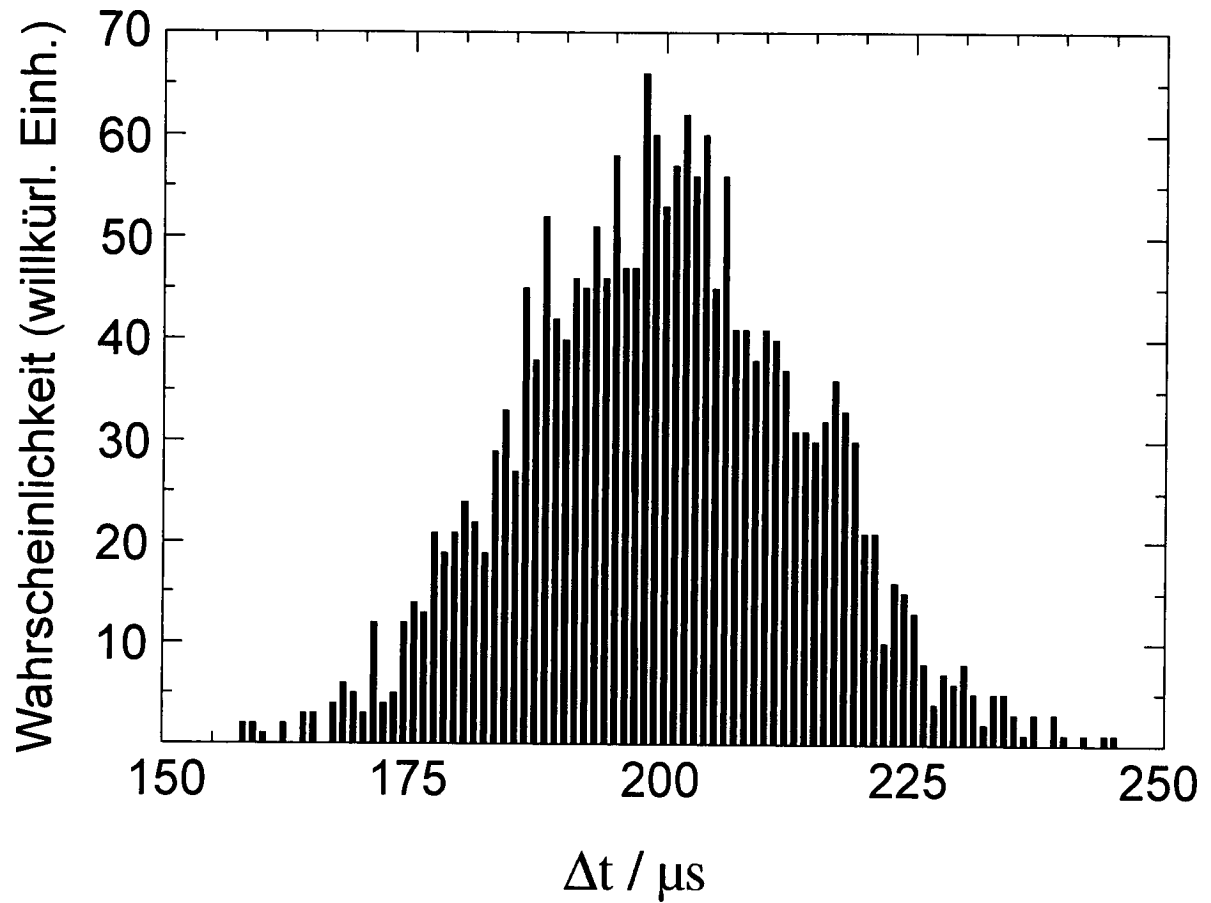
**Fig. 1**



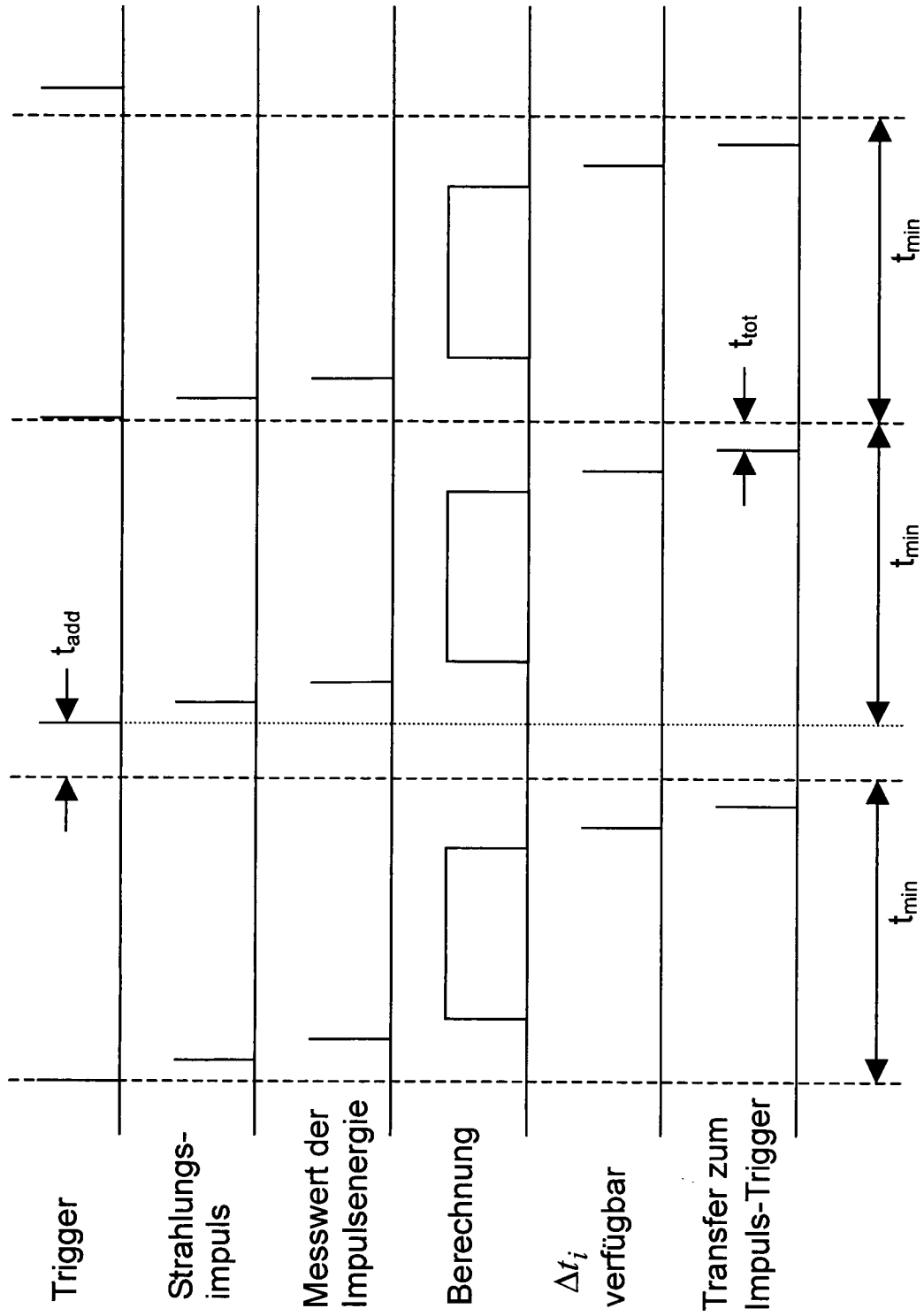
**Fig. 2**



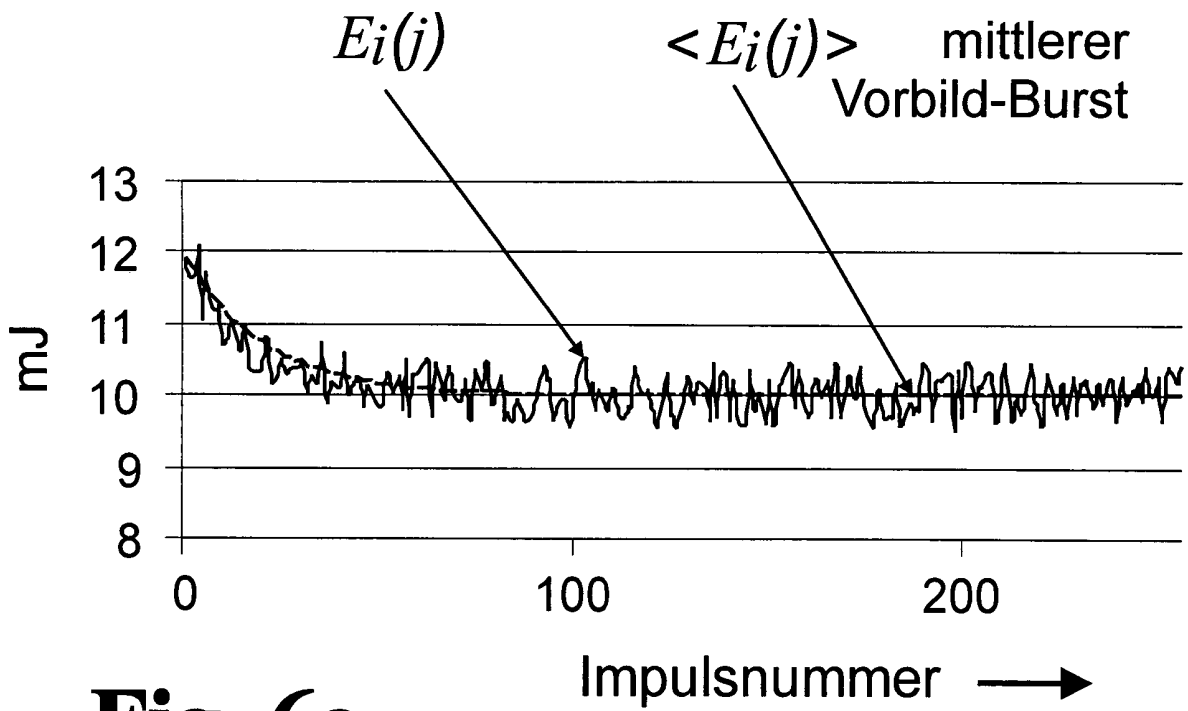
**Fig. 3**



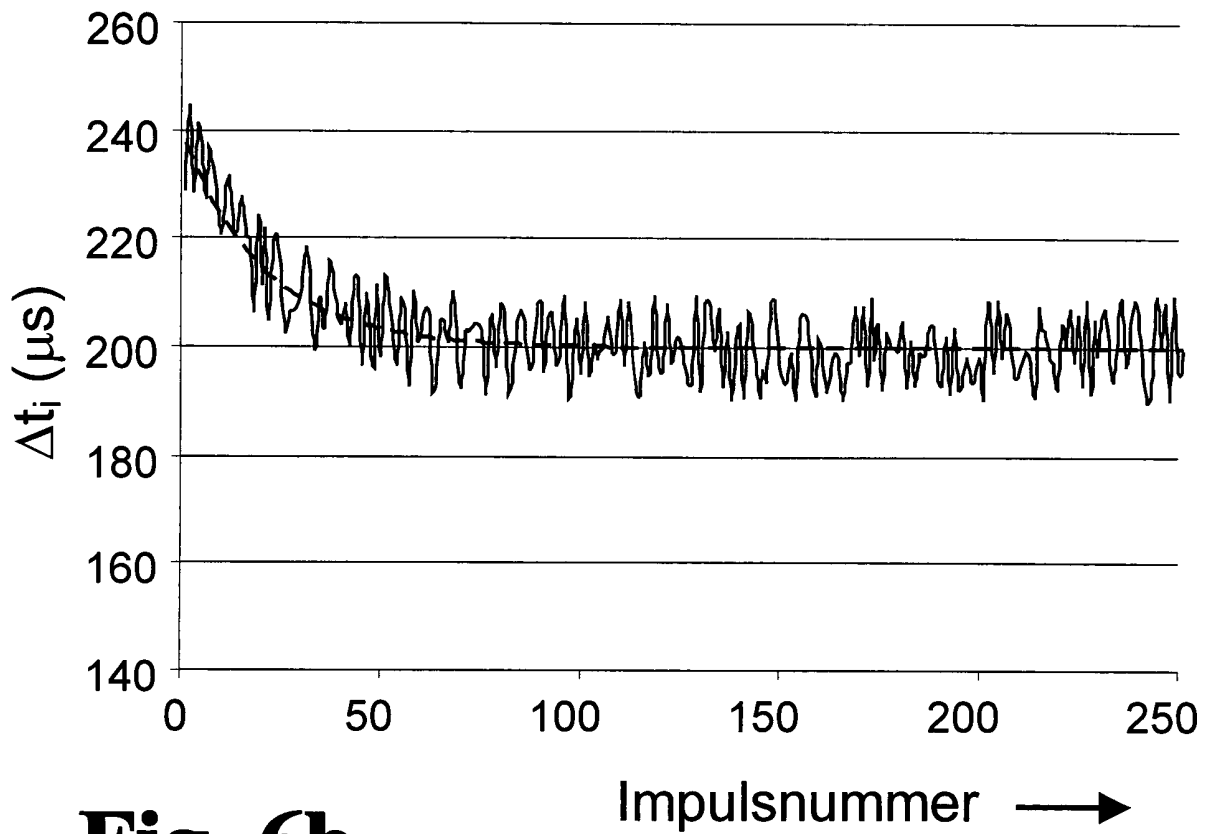
**Fig. 4**



**Fig. 5**



**Fig. 6a**



**Fig. 6b**