



(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

# PATENTCHRIFT

(19) **DD** (11) **273 695 A1**

4(51) G 01 R 31/26

## AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

---

(21)	WP G 01 R / 317 516 8	(22)	04.07.88	(44)	22.11.89
(71)	Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, Jena, 6900, DD				
(72)	Lenzner, Matthias, Dipl.-Phys.; Bergner, Harald, Dr.; Damm, Tobias, Dr., DD				
(54)	<b>Verfahren zur Erfassung schnell ablaufender Prozesse in integrierten Schaltkreisen unter Verwendung eines Laser-Raster-Mikroskopes mit OBIC-Stufe</b>				

---

(55) Schaltkreistestung, Vorgänge, schnell ablaufend, Laserstrahlen, zwei gepulste, Impulsfolgefrequenzen starr gekoppelt, Oberflächenabrasterung, Impulse gegeneinander verzögerbar

(57) Verfahren zur Erfassung schnell ablaufender Prozesse in integrierten Schaltkreisen unter Verwendung eines Laser-Raster-Mikroskopes mit OBIC-Stufe. Die Erfindung ist geeignet für die Testung von Halbleiterbauelementen, insbesondere von integrierten Schaltkreisen. Die Lösung besteht darin, daß zwei gepulste Laserstrahlen unterschiedlicher Intensität und starrer Kopplung ihrer Impulsfolgefrequenzen vorgesehen sind, von denen der höherer Intensität auf der Oberfläche des Schaltkreises wahlweise frei positioniert wird, der Laserstrahl geringerer Intensität zur Gewinnung einer räumlichen Information die Oberfläche abrastert und zur Gewinnung einer zeitlichen Information die Impulse der beiden Laserstrahlen zeitlich gegeneinander verzögerbar sind.

### Patentansprüche:

1. Verfahren zur Erfassung schnell ablaufender Prozesse in integrierten Schaltkreisen unter Verwendung eines Laser-Raster-Mikroskopes mit OBIC-Stufe, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei gepulste Laserstrahlen unterschiedlicher Intensität und starrer Kopplung ihrer Impulsfolgefrequenzen vorgesehen sind, von denen der höherer Intensität auf der Oberfläche des Schaltkreises wahlweise frei positioniert wird, der Laserstrahl geringerer Intensität zur Gewinnung einer räumlichen Information die Oberfläche abrastert und zur Gewinnung einer zeitlichen Information die Impulse der beiden Laserstrahlen zeitlich gegeneinander verzögerbar sind.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Laserstrahl geringerer Intensität zusätzlich intensitätsmoduliert wird und das im Schaltkreis optisch induzierte elektrische Signal auf dieser Modulationsfrequenz selektiv erfaßt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Impulsfolgefrequenzen der beiden Laserstrahlen gleich sind.
4. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Impulsfolgefrequenz des Laserstrahls geringerer Intensität ein ganzzahliges Vielfaches der des anderen Laserstrahls ist.

Hierzu 1 Seite Zeichnung

### Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erfassung schnell ablaufender Prozesse in integrierten Schaltkreisen unter Verwendung eines Laser-Raster-Mikroskopes mit OBIC-Stufe. Die Erfindung kann in der Testung von Halbleiterbauelementen, insbesondere von integrierten Schaltkreisen eingesetzt werden.

### Charakteristik des bekannten Standes der Technik

Der Funktionstest hochintegrierter Schaltkreise erfolgt üblicherweise in rechnergestützten Testanlagen. Die sehr zeitaufwendigen Testverfahren bieten den Eingängen des zu untersuchenden Schaltkreises ein Bitmuster an und aus der Analyse der resultierenden Ausgangsbelegung werden Fehlfunktionen des IC's erkannt. Eine Lokalisierung des Fehlers ist insofern schwierig, da die diskrete Anzahl der Ausgangspins (256) ein eindeutiges Zuordnen auf die um rund 3 Größenordnungen größere Anzahl von Schaltelementen (100000) nicht erlaubt.

Insbesondere während der Entwicklungsphase eines Schaltkreises müssen Pegelmessungen im Inneren der Schaltung durchgeführt werden. Die in der LSI-Technologie verwendeten Nadeltester sind in der VLSI- und ULSI-Technologie wegen der Kanalbreiten und der bei hohen Betriebsfrequenzen störenden Kapazitäten ungeeignet.

Zur Bestimmung der inneren logischen Zustände von IC's wurden in den letzten Jahren Laser-Raster-Mikroskope erfolgreich eingesetzt (R. Müller, Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht 13 [1985] 9-14; Scanning 7 [1985] 88-96).

Die als OBIC-Verfahren (optisch induzierter Strom) bekanntgewordene Untersuchungsmethode beruht auf der punkweisen Abrasterung der Oberfläche des zu untersuchenden Schaltkreises mit einem fokussierten Laserbündel, wobei durch Absorption der Laserstrahlung im Halbleitersubstrat Elektron-Loch-Paare erzeugt werden. Im Bereich eines gesperrten p-n-Überganges werden diese Ladungsträger getrennt und bewirken im äußeren Stromkreis eine Stromänderung. Diese Stromänderung wird verstärkt und entsprechend der Rasterfrequenz des abtastenden Laserspots zum Aufbau eines Bildes genutzt.

Somit ist es möglich, ein Gesamtbild der inneren Pegel eines integrierten Schaltkreises zu bekommen. Nachteilig ist, daß die Bildaufbauzeit im Bereich einiger Sekunden liegt, der Schaltkreis somit nur mit statischer bzw. quasistatischer Eingangsbelegung getestet werden kann.

Ein anderes Verfahren, das es ermöglicht, den inneren logischen Pegel bei einigen MHz Taktfrequenz zu erfassen, wird von HENLEY beschrieben (US 4588950). Dabei wird mit einem intensitätsmodulierten Laser auf eine diskrete Stelle des IC's eingestrahlt und der modulierte Photostrom aus dem Betriebsstrom des IC's analysiert. Dieses Verfahren liefert aber keine Gesamtheit der logischen Zustände.

Eine Erweiterung des OBIC-Verfahrens mit einem Laser-Raster-Mikroskop stellt die Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines integrierten Schaltkreises dar. Um innerhalb eines Schaltkreises die Elemente zu lokalisieren, die im dynamischen Betrieb die Arbeitsgeschwindigkeit limitieren oder die dynamisch fehlerhaft arbeiten, sind Laser ausgesprochen gut geeignet. Zum einen kann man mit Hilfe von elektrooptischen bzw. akustooptischen Modulatoren die Strahlungsintensität und damit den induzierten Photostrom bis in den Bereich einiger 100 MHz modulieren. Das Signal, das bei fester oder beliebiger Position des Laserspots auf der Schaltkreisoberfläche erzeugt wird, wird dann mit Lock-in-Technik (US 4563642) oder schnellen Oszillographen (US 2203550) aufgenommen. Es können damit sowohl Grenzfrequenzen als auch Ladungsträgerlebensdauern bestimmt werden. Das Laser-Raster-Mikroskop dient dabei zur Strahlpositionierung. Um größere Grenzfrequenzen registrieren zu können, werden modensynchronisierte Laser mit Impulslängen von einigen Pikosekunden bis Sub-Pikosekunden eingesetzt (IEEE QE-19 [1983] 658). Das durch optisches Durchschalten eines Transistors erzeugte elektrische Signal wird mit hochfrequenten Sampling-Oszillographen untersucht.

### Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist ein Verfahren, das es ermöglicht, OBIC-Bilder von IC's mit einem Laser-Raster-Mikroskop aufzunehmen, die den logischen Zustand nach definierten Zeitintervallen darstellen, wobei die zeitliche Auflösung im Pikosekundenbereich liegt, das dynamische Verhalten auch innerer Strukturen des IC's zu testen und interne Schalt- und Laufzeiten zu registrieren.

### Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zu entwickeln, das in der Lage ist, interne Schalt- und Laufzeiten eines hochintegrierten Schaltkreises zu bestimmen und OBIC-Bilder von IC's mit einem Laser-Raster-Mikroskop aufzunehmen, die den logischen Zustand nach definierten Zeitintervallen darstellen, wobei die zeitliche Auflösung im Pikosekundenbereich liegt. Die Lösung dieser Aufgabe gelingt mit einem Laser-Raster-Mikroskop mit OBIC-Stufe erfindungsgemäß dadurch, daß zwei gepulste Laserstrahlen unterschiedlicher Intensität und starrer Kopplung ihrer Impulsfolgefrequenzen vorgesehen sind, von denen der höherer Intensität auf der Oberfläche des Schaltkreises wahlweise frei positioniert wird, der Laserstrahl geringerer Intensität zur Gewinnung einer räumlichen Information die Oberfläche abrastert und zur Gewinnung einer zeitlichen Information die Impulse der beiden Laserstrahlen zeitlich gegeneinander verzögerbar sind. Als Laserstrahlungsquelle wird ein modensynchronisierter Laser mit der Impulsbreite  $t_P$  und der Impulsfolgefrequenz  $f_L$  verwendet.

Mit dieser fokussierten Strahlung (hohe räumliche Auflösung) wird die Oberfläche des integrierten Schaltkreises abgerastert. Der von der Oberfläche reflektierte Strahlungsanteil wird einem Photoempfänger zugeführt und dient dem Aufbau eines Reflexionsbildes (Auflichtverfahren) zur Orientierung auf dem Schaltkreis. Der von der Laserstrahlung induzierte Photostrom wird zum Aufbau eines OBIC-Bildes benutzt. Dabei muß gelten, daß die Scanfrequenz des Laserspots  $f_S$  wesentlich kleiner als die Laserfolgefrequenz  $f_L$  ist ( $f_S < f_L$ ), damit pro Bildpunkt eine Vielzahl von Laserimpulsen zur Messung beitragen (hohes Signal-Rausch-Verhältnis). Der im Vergleich zu  $f_L$  langsame elektrische Abgriff des photoinduzierten Stromes bewirkt eine Integration über diese Vielzahl von Laserimpulsen beim Bildaufbau. Die Intensität dieses im weiteren als Teststrahl bezeichneten Laserbündels muß so gering sein, daß bei Einstrahlung auf einen Transistor dessen Schaltzustand nicht geändert wird. Mit diesem Teststrahl wird im Laser-Raster-Mikroskop mit OBIC-Stufe ein Bild erzeugt, das Auskunft über den aktuellen Zustand der logischen Pegel im IC gibt.

Zusätzlich zum Teststrahl wird ein zweiter Laserstrahl, im weiteren als Anregungsstrahl bezeichnet, auf den Chip fokussiert, wobei der Einstrahlungsort fest, aber beliebig ist. Der Anregungsstrahl besteht ebenfalls aus Laserimpulsen der Folgefrequenz  $f_L$ . Seine Intensität wird so gewählt, daß er den Schaltzustand des bestrahlten Transistors im Schaltkreis ändert. Somit wird im IC ein elektrischer Impuls erzeugt, dessen Anstiegsflanke im wesentlichen die Impulsdauer des Anregungsimpulses und dessen Abfallflanke die Verweildauer der photoinduzierten Ladungsträger im bestrahlten Transistor repräsentieren. Die Verweildauer  $t$  der Ladungsträger ist ein Ausdruck für Rekombinations- und Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger im Bauelement.

Die Laserimpulsfolgefrequenz  $f_L$  muß so gewählt werden, daß  $1/f_L > t$  gilt, nur dann ist der optisch erzeugte elektrische Impuls abgeklungen, wenn der nächste Laserimpuls auf den zu schaltenden Transistor fällt. Der Anregungsimpuls erzeugt somit eine Folge von elektrischen Impulsen der Impulsfolgefrequenz  $f_L$  mit einer charakteristischen Einzelimpulsbreite, die sich im IC ausbreitet und nachfolgende Transistoren in andere logische Zustände schaltet. Werden die Impulse des Teststrahles bezüglich der Impulse des Anregungsstrahles um die Zeit  $dt$  verzögert, so entsteht nach Abrastern des gesamten Bildfeldes ein OBIC-Bild, das dem Zustand der inneren logischen Pegel nach der Zeit  $dt$  entspricht. Somit ist es möglich, trotz Bildaufbauzeiten von einigen Sekunden eine Zeitauflösung im Pikosekundenbereich zu erreichen. Aus der Verschiebung  $dt_0$  zwischen Anregungs- und Testimpuls wird die Laufzeit des elektrischen Impulses im IC zwischen den diskreten Elementen bestimmt. Die Änderung des Schaltzustandes eines getesteten Transistors entspricht der Korrelationsfunktion der elektrischen Response des angeregten und des getesteten Transistors.

Zur Registrierung des geringen Photostromes, der durch den Teststrahl erzeugt wird, bei Vorhandensein eines starken Photostromes, der durch das Durchschalten eines Transistors mittels Anregungsstrahl entsteht, wird die Teststrahlung zusätzlich mit einer oder mehreren Frequenzen  $f_M$  moduliert und der OBIC-Stufe werden frequenzselektive Verstärker bzw. phasempfindliche Gleichrichter für die Frequenz  $f_M$  vorgeschaltet.

Für die Modulationsfrequenz muß gelten  $f_M < f_L$ , damit über eine bestimmte Anzahl von Einzelimpulsen die Intensität moduliert wird, zum anderen muß aber  $f_M > f_S$  gelten, damit an einem Bildpunkt über mehrere Modulationsperioden gemessen werden kann.

Eine weitere Version des Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, daß die Impulsfolgefrequenz des Laserstrahls geringerer Intensität ein ganzzahliges Vielfaches der des anderen ist. Damit kann bei langsameren Folgefrequenzen der Betriebsstrom beim ersten Impuls mit Anregungsstrahl, beim zweiten Impuls ohne Anregungsstrahl gemessen werden. Durch Differenzbildung wird der Meßwert gewonnen, der damit unabhängig von Temperatur- und Langzeitdrift ist.

### Ausführungsbeispiel

Das Wesen der Erfindung soll anhand einer in der Zeichnung dargestellten Anordnung zur Durchführung des Verfahrens erläutert werden.

Als Strahlungsquelle dient ein modensynchronisierter Laser, der Impulse der Impulsbreite  $t_P$  und der Folgefrequenz  $f_L$  emittiert. Typische Impulslängen liegen im Bereich von 100 ps. Die Impulsfolgefrequenz von typisch 100 MHz beschränkt den möglichen Zeitbereich für  $t$  auf 10 ns. Eine Reduzierung der Impulsfolgefrequenz, z. B. durch die Methode des 'cavity dumping' erscheint deshalb je nach Untersuchungsgegenstand sinnvoll. An einem Strahlteiler  $T_1$ , z. B. Glasplatte, wird die Laserstrahlung in zwei Strahlen ungleicher Intensität, die schwache Teststrahlung und die intensive Anregungsstrahlung, aufgeteilt. Der Teststrahl wird mit einem Modulator  $M$  in seiner Intensität mit der Frequenz  $f_M$  moduliert und gelangt über zwei Spiegel ( $S_x, S_y$ ), die die

Ablenkung in x- bzw. y-Richtung bewirken, und zwei Teilerwürfel (T2, T3) zum Mikroskopobjektiv (OBJ). Der zu untersuchende Schaltkreis befindet sich in der Fokusebene des Objektivs. Das von der Oberfläche reflektierte Licht wird über Objektiv und Teiler T2 einem Photoempfänger zugeführt und dient zum Bildaufbau des Auflichtbildes.

Der vom Laser im Halbleiterbauelement erzeugte Photostrom wird von der OBIC-Stufe mit Eingangsfrequenzfilter verstärkt und dem Prozeßrechner zum Bildaufbau zugeführt.

Der Anregungsstrahl gelangt nach Strahlteiler T1 auf eine optische Verzögerungsstrecke, in der über Änderung der Weglänge die Zeitverschiebung zwischen den Impulsen der Anregungs- und Teststrahlung eingestellt wird.

Über einen Teilerwürfel T3 wird die Anregungsstrahlung in den Strahlengang des Laser-Raster-Mikroskopes eingekoppelt, an einer Stelle, an der im Mikroskop eine parallele Strahlenführung erfolgt. Dadurch wird die Anregungsstrahlung ebenfalls vom Objektiv auf die Chipoberfläche fokussiert.

Damit der Bestrahlungsort fest aber beliebig ist, muß Teiler T3 hinter den Scannerspiegeln  $S_x$ ,  $S_y$  im Mikroskopstrahlengang liegen und der Anregungsstrahl muß durch einen Strahlversetzer (SV) z. B. zwei Keilplatten, in x- und y-Richtung innerhalb des Bildfeldes versetzbar sein.

Zur Erzielung einer möglichst hohen Anregungsintensität ist es günstig, T3 hinter T2 anzuordnen.

