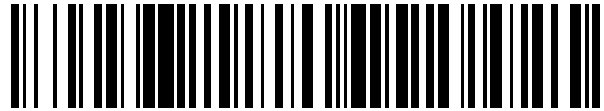


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 408 590**

51 Int. Cl.:

G01B 7/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.03.2009 E 09779165 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2013 EP 2409114**

54 Título: **Un método y un aparato para medir el espesor de una capa de metal provista sobre un objeto metálico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.06.2013

73 Titular/es:

**ABB AB (100.0%)
Kopparbergsvägen 2
721 83 Västerås , SE**

72 Inventor/es:

**LINDER, STEN y
THEGEL, LENNART**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 408 590 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Un método y un aparato para medir el espesor de una capa de metal provista sobre un objeto metálico

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un método y a un aparato para medir el espesor de una capa de material proporcionada sobre un objeto metálico, tal como una lámina metálica o una tira metálica. La invención es adecuada, por ejemplo, para medir el espesor de capas metálicas u objetos metálicos fabricados de diferentes tipos de aleaciones de aluminio.

Técnica anterior

10 Actualmente, en la producción de objetos metálicos, tales como laminas metálicas o tiras metálicas, es común producir objetos que tienen una pluralidad de capas de diferentes metales o aleaciones metálicas. Un objeto de una aleación metálica puede ser protegido, por ejemplo, con una película fina de una capa de otra aleación que el objeto. Por ejemplo, una lámina de aluminio de una cierta aleación puede ser revestida con una capa superficial de otra aleación que tiene buena resistencia contra corrosión. Cuando se producen tales objetos, la producción se inicia a partir de dos láminas metálicas más gruesas, que se ponen juntas y las láminas metálicas apiladas son arrolladas entonces hasta un espesor deseado en un tren de laminación. Un problema con este método de producción es que las láminas de metales diferentes pueden tener diferentes propiedades de flotación durante la deformación y de acuerdo con ello las láminas son comprimidas de manera diferente durante la laminación. De acuerdo con ello, los productores de tales láminas metálicas tienen una necesidad de medir el espesor de la capa metálica. Además, existe un interés en medir la resistividad eléctrica de la capa con el fin de comprender cambios del metal que suceden durante el proceso de laminación.

20 El tren de laminación incluye al menos dos rodillos y un sistema de control del espesor que controla el intersticio entre los rodillos y, por lo tanto, el espesor del objeto producido. Para el control del espesor, el espesor del objeto se mide, al menos, en un punto sobre la tira después de la laminación, es decir, después de que el objeto ha pasado a través de los rodillos. Esta medición se utiliza como entrada al control del espesor, junto con un valor deseado del espesor del objeto.

25 Hung-Chi Yang y col: "Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate; Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate", Measurement Science and Technology, vol. 13, no. 8, páginas 1259-1265 (1 Agosto 2002) muestran la medición del espesor de una capa metálica sobre un objeto metálico. Una bobina que colabora con una función escalonada produce un campo magnético que induce una corriente en la capa a medir. Los cambios del campo magnético debidos a esta corriente inducida son medidos como una corriente en la bobina de recepción. Otros documentos que muestran la medición de espesores de capas conductoras son US6040694A, DE102006025356A1, US 2003/038628A1, US 2007/090833A1, Ananth Sethuraman and James H. Rose: "Rapid inversion of eddy current data for conductivity and thickness of metal coating", Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 14, no. 1, páginas 39-46 (Marzo 1995) and US2007/273371 A1.

Objetos y resumen de la invención

40 Un objeto de la presente invención es proporcionar un método para medir el espesor de una capa metálica proporcionada sobre un objeto metálico.

Este objeto se consigue por un método como se define en la reivindicación 1.

45 Los metales y las aleaciones de metales con diferentes composiciones tienen diferente resistividad. La presente invención utiliza el hecho de que la profundidad de penetración en un material de una corriente inducida sobre el tiempo depende de la resistividad del material y de que la capa metálica tiene una resistividad que difiere de la resistividad del objeto metálico. De acuerdo con la invención, un campo magnético variables en el tiempo induce una corriente en la superficie de la capa. La corriente inducida se propaga a través de la capa y dentro del objeto metálico. La corriente inducida produce un campo magnético secundario. Los cambios sobre el tiempo del campo magnético secundario se miden fuera de la capa mientras la corriente inducida se propaga a través de la capa y dentro del objeto metálico. De manera adecuada, los cambios del campo magnético secundario se miden por medio de una bobina. Por lo tanto, los cambios del campo magnético se miden midiendo la tensión a través de la bobina.

55 La magnitud del campo magnético a través de la bobina depende de la profundidad de penetración de la corriente inducida. Por lo tanto, el campo magnético se reduce cuando la corriente inducida se propaga a través del material. La profundidad de penetración en un cierto tiempo después del instante en el que la corriente ha sido inducida es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad del material penetrado. De acuerdo con ello, existe un cambio en la tensión medida, es decir, en el cambio del campo magnético, en el instante en el que la corriente inducida pasa a

través del límite entre la capa y el objeto. Utilizando una relación matemática conocida entre los cambios del campo magnético, el tiempo de propagación, y la resistividad de material propagado, y una relación matemática conocida entre la profundidad de penetración de la corriente inducida, el tiempo de propagación, y la resistividad del material propagado, es posible derivar una relación entre el espesor de la capa y los valores medidos de los cambios del campo magnético. De acuerdo con la invención, esta relación se puede utilizar para determinar el espesor de la capa.

La invención hace posible determinar automáticamente el espesor de una capa metálica sobre un objeto metálico. Además, la invención hace posible determinar el espesor de la capa sin estar en contacto con la para o el objeto. Por lo tanto, el método de acuerdo con la invención es adecuado para uso en la producción de productos que incluyen una capa metálica producida sobre una lámina o tira de metal, tal como para control del espesor de la capa.

Aunque es posible utilizar diferentes tipos de variaciones del campo magnético, es conveniente generar la variación como una función escalonada, en la que el campo magnético se cambia repentinamente a un valor que difiere considerablemente de su valor previo. El campo magnético puede caer hasta un valor considerablemente más bajo, o el campo magnético se puede incrementar hasta un valor considerablemente más alto. Por ejemplo, la variación es generada permitiendo repentinamente que el campo magnético caiga a cero. Tal función escalonada es fácil de generar y facilita el cálculo del espesor de la capa.

De acuerdo con la invención, el método comprende detectar cuándo los valores medidos de los cambios del campo magnético se desvían de valores esperados de cambios de un campo magnético para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa, y sobre la base de esto estimar el tiempo que la corriente inducida tarda en propagarse a través de la capa y alcanza el límite entre la capa metálica y el objeto metálico, y determinar el espesor de la capa sobre la base de un relación matemática entre el espesor y el tiempo que la corriente inducida tarda en llegar al límite entre la capa metálica y el objeto metálico.

Detectando cuándo los valores medidos del campo magnético se desvían de valores esperados para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa, es posible determinar el tiempo que la corriente inducida tarda en propagarse a través de la capa y llegar al límite entre la capa metálica y el objeto metálico y de acuerdo con ello determinar la profundidad de penetración en el instante en el que la corriente pasa el límite entre la capa y el objeto. El espesor de la capa se determina como la profundidad de penetración en el instante en el que la corriente pasa el límite entre la capa y el objeto.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende integrar los cambios medidos del campo magnético y determinar el espesor de la capa basado en una relación matemática entre el espesor de la capa y la integral de los valores medidos de los cambios del campo magnético. Esta forma de realización utiliza el hecho de que la profundidad de penetración es proporcional a la integral del cambio medido del campo magnético. La integración de los valores de medición es ventajosa, puesto que proporciona valores de medición estables y facilita la comprensión de la medición.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende determinar el instante en el que la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad, que es el instante en el que la corriente pasa el límite, y sobre esta base estimar el tiempo que la corriente inducida tarda en llegar al límite entre la capa metálica y el objeto metálico. Esta forma de realización utiliza el hecho de que existe una relación lineal entre la integral del cambio del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo después de que la corriente ha sido introducida en la superficie de la capa metálica, y de que la relación lineal depende de la resistividad de los materiales propagados.

La profundidad de penetración es proporcional a la integral del cambio medido del campo magnético. De acuerdo con ello, el espesor de la capa es proporcional a la integral del cambio medido del campo magnético en el instante en el que la corriente pasa el límite entre la capa metálica y el objeto metálico. Integrando la tensión medida desde el instante en el que la corriente ha sido inducida, se obtienen el campo magnético y sus cambios sobre el tiempo. Si la tensión integrada se representa gráficamente contra la raíz cuadrada del tiempo, se obtiene una línea esencialmente recta, con tal que la corriente inducida se propague a través de la capa. La pendiente de la línea es proporcional a la resistividad en la capa. Cuando la corriente inducida ha penetrado la capa hasta que ha alcanzado el límite entre la capa y el objeto y comienza a penetrar el objeto, la pendiente de la línea en la representación gráfica cambiará.

Después de algún tiempo en el que la corriente inducida se ha propagado una porción en el material del objeto, se obtiene de nuevo una línea esencialmente recta, pero con una pendiente diferente. La pendiente de esta línea es proporcional a la resistividad del material del objeto. De acuerdo con ello, existe un cambio detectable en la integral de la tensión medida, es decir, en el cambio del campo magnético, en el instante en el que la corriente pasa la línea entre la capa y el objeto. Este cambio hace posible determinar la integral del cambio medido del campo magnético en el instante en el que la corriente pasa el límite entre la capa metálica y el objeto. El espesor de la capa se calcula sobre la base de la integral del cambio medido del campo magnético en el instante en el que la corriente pasa el

límite entre la capa metálica y el objeto metálico y una constante predeterminada.

5 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende determinar el instante en el que la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad, que es el instante en el que la corriente pasa el límite, y basado en ello determinar el instante en el que la corriente pasa el límite. De acuerdo con esta forma de realización, se detecta cuándo los valores medidos de los cambios del campo magnético se desvían de valores esperados de cambios de un campo magnético para un objeto homogéneo detectando cuándo la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad. Una ventaja de esta forma de realización es que es fácil detectar
10 cuándo los valores medidos se desvían de la linealidad.

15 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende determinar el valor integral ($\int u(t\delta)$) cuando la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad y sobre esta base estimar el espesor de la capa como proporcional al valor integral determinado.

20 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende: calcular la línea de la integral del cambio medido del campo magnético, cuando se representa gráficamente contra la raíz cuadrada del tiempo después de que la corriente ha sido inducida en la superficie de la capa metálica y antes de que la variación del campo magnético se ha propagado a través de la capa metálica, calcular la línea de la integral del cambio medido del campo magnético, cuando se representa gráficamente contra la raíz cuadrada del tiempo después de que la corriente ha sido inducida en la superficie de la capa metálica y después de que la variación del campo magnético ha sido propagada a través de la capa metálica, y determinar la integral del cambio medido del campo magnético en el instante en el que la corriente pasa el límite entre la capa metálica y el objeto metálico como el punto de intersección entre la línea de la integral del cambio del campo magnético antes de que la variación del campo magnético se propague a través de la capa metálica y la línea de la integral del cambio del campo magnético después de que la variación del campo magnético se ha propagado a través de la capa metálica.
25

30 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende determinar la resistividad de la capa metálica sobre la base de los cambios medidos del campo magnético antes de que la variación del campo magnético se haya propagado a través de la capa metálica. En algunas aplicaciones, existe un deseo de determinar la resistividad de la capa y/o la resistividad del objeto. De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende determinar la resistividad del objeto metálico sobre la base del cambio medido del campo magnético después de que la variación del campo magnético se ha propagado a través de la capa metálica. Debido al hecho de que la tensión medida es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad, es posible determinar la resistividad de la capa y del objeto utilizando los mismos valores de medición que se utilizan para determinar el espesor de la capa. Además, es ventajoso determinar la resistividad de la capa y del objeto y utilizar la resistividad determinada para facilitar los cálculos del espesor de la capa.
35

40 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el método comprende integrar los cambios medidos del campo magnético, detectar cuándo los valores medidos integrados se desvían de los valores integrados esperados de cambios de un campo magnético para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa y, sobre la base de ello, determinar la integral del cambio medido del campo magnético en el instante en el que la corriente pasa el límite, y determinar el espesor de la capa sobre la base de la integral del cambio medido del campo magnético en el instante en el que la corriente pasa el límite entre la capa metálica y el objeto metálico.
45

Otro objeto de la presente invención es proporcionar un aparato para medir el espesor de una capa metálica proporcionada sobre un objeto metálico.

50 Este objeto se consigue por un aparato como se define en la reivindicación 9.

Breve descripción de los dibujos

55 La invención se explicará a continuación más detalladamente por la descripción de diferentes formas de realización de la invención y con referencia a las figuras anexas.

La figura 1 muestra un ejemplo de un aparato para medir el espesor de una capa metálica sobre un objeto metálico de acuerdo con la invención.

60 La figura 2 muestra otro ejemplo de un aparato para medir el espesor de una capa metálica sobre un objeto metálico de acuerdo con la invención.

La figura 3 muestra un ejemplo de una corriente a través de una bobina de emisión cuando se genera una variación del campo magnético.

La figura 4 muestra la tensión a través de una bobina de recepción debida a la variación generada del campo magnético.

5 La figura 5 muestra un ejemplo de la tensión medida a través de la bobina de recepción para una capa con una resistividad que difiere de la resistividad del objeto comparada con valores esperados de la tensión para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa.

10 La figura 6 muestra la corriente inducida en la superficie de una capa metálica debida a una variación generada del campo magnético.

La figura 7 muestra la corriente inducida que mueve hacia delante el límite entre la capa y el objeto.

15 La figura 8 muestra la corriente inducida que pasa a través del límite entre la capa y el objeto y que se mueve a través del objeto.

La figura 9 muestra otro ejemplo de un aparato para medir el espesor de una capa metálica sobre un objeto de metal.

20 La figura 10 muestra la integral de la tensión medida a través de la bobina de recepción para un objeto con una capa de una resistividad diferente comparada con valores medidos de la integral de la tensión para un objeto con la misma resistividad que la capa.

Descripción detallada de formas de realización preferidas de la invención

25 La figura 1 muestra aparatos para medir el espesor de una capa metálica 2 sobre un objeto metálico 1 de acuerdo con una forma de realización de la invención. El objeto 1 está fabricado de metal o de una aleación de metal y está provisto con una capa 2 de un metal o aleación de metal que tiene una resistividad que difiere de la resistividad del objeto. La capa es fina comparada con el espesor del objeto. La capa está, por ejemplo, entre 0,1 mm y 1 mm. El objeto 1 es, por ejemplo, una lámina y una capa puede estar provista sobre un lado o sobre los dos lados de la lámina. El espesor de la capa 2 debe medirse.

30 El aparato comprende un primer dispositivo dispuesto para generar un campo magnético y está posicionado cerca de la capa metálica. El primer dispositivo incluye una bobina 4, llamada en adelante una bobina de emisión, y medios de suministro de corriente 7 para suministrar una corriente a la bobina de emisión 4. El primer dispositivo está dispuesto para generar un campo magnético y una variación repentina del campo magnético, de manera que se induce una corriente en la superficie de la capa 2. La variación del campo magnético es generada por la generación de una variación de la corriente suministrada a la bobina de emisión 4. El aparato comprende, además, un segundo dispositivo dispuesto para medir los cambios del campo magnético fuera de la capa metálica debido a la corriente inducida. El segundo dispositivo comprende una bobina 5, llamada en adelante una bobina de emisión, y equipo de medición 8 para medir la tensión a través de la bobina de recepción. Las bobinas 4 y 5 están dispuestas en el mismo lado del objeto que la capa 2.

35 El aparato comprende, además, una unidad de cálculo 9 configurada para recibir la tensión medida a través de la bobina de recepción 5 y para determinar el espesor de la capa sobre la base de los valores de medición a partir del equipo de medición 8. Los valores de medición son almacenados con el instante en el que se toman los valores de medición. Por lo tanto, es posible calcular el tiempo desde el que se generó la variación hasta que se tomaron los valores medidos.

40 La figura 2 muestra otro ejemplo de un aparato para medir el espesor de una capa metálica sobre un objeto metálico de acuerdo con la invención. El aparato comprende un circuito de control 12 dispuesto para controlar la corriente suministrada a la bobina de emisión 4. El circuito de control 12 está conectado a la base de un transistor 14, que está conectado a la bobina de emisión 4. El extremo opuesto de la bobina de emisión 4 está conectado a tierra. El transistor 14 está dispuesto para suministrar una corriente constante a través de la bobina de emisión y a tierra. Además, el transistor 14 está dispuesto para permitir un cambio rápido desde un nivel a otro, por ejemplo para desconectar la corriente. El transistor está controlado por el circuito de control 12, que es de manera ventajosa digital. De manera alternativa, se puede disponer más que un transistor entre el circuito de control y la bobina de emisión. El aparato comprende, además, una resistencia de descarga 16 dispuesta sobre la bobina de emisión 4. El transistor se desconecta inmediatamente, pero durante un corto espacio de tiempo fluye una corriente a través de la resistencia de descarga 16. El tiempo para la caída completa de la corriente se determina por la resistencia 16. El equipo de medición para medir la tensión a través de la bobina de recepción 5 comprende un amplificador diferencial 17, y un convertidor AD 19. La salida desde el convertidor AD 19 es transferida hasta la unidad de cálculo 9.

45 La bobina de emisión 4 y la bobina de recepción 5 están dispuestas cerca de la capa 2 y con preferencia con sus ejes centrales 6 dirigidos perpendicularmente a la superficie de la capa. En una forma de realización preferida, la

bobina de emisión 4 está dispuesta de tal manera que el eje central de la bobina de emisión está coaxial con el eje central de la bobina de recepción. No obstante, también es posible utilizar otras posiciones de la bobina de emisión y de la bobina de recepción, con tal que la bobina de recepción detecte cambios sobre el tiempo del campo magnético causados por la capa y el objeto. La distancia entre la bobina de emisión 4 y la capa 2 depende de la situación de medición. Una distancia de medición pequeña proporciona un buen resultado de medición, pero, por otra parte, puede ser difícil mantener una distancia pequeña debido al hecho de que el objeto se mueve con la capa. Esto significa que, en la práctica, es adecuado que la distancia de medición esté entre 3 y 30 mm.

El tamaño de la bobina de emisión 4 y el número de espiras dependen de la situación de medición, de tal manera que cuando se miden capas finas, la inductancia de la bobina debería ser pequeña y cuando se miden capas gruesas, la inductancia de la bobina debería ser grande. Esto significa, en la práctica, que cuando se miden capas finas, el número de espiras de la bobina es desde unas pocas espiras hasta aproximadamente diez espiras, o cuando se miden capas gruesas, el número de espiras es diez veces mayor. El número de espiras de la bobina de recepción es principalmente el mismo que el número de espiras de la bobina de emisión. El segundo dispositivo puede incluir una o más bobinas de recepción con el fin de conseguir ciertos efectos. Por ejemplo, es posible disponer la bobina de recepción 5 con una pluralidad de bobinas con el fin de conseguir que el aparato sea independiente de la distancia con respecto a la capa. En otra forma de realización, la misma bobina se puede utilizar como bobina de emisión y de recepción.

La figura 3 muestra un ejemplo de la corriente en la bobina de emisión 4. Una corriente constante es alimentada a través de la bobina de emisión 4 durante un periodo de tiempo que es suficientemente largo para que el campo magnético generado alrededor de la bobina de emisión penetre la capa 2 y al menos una parte del objeto 1, y el campo magnético se vuelve estable. Posteriormente, en un instante inicial t1, la corriente se cambia repentinamente desde un valor a otro valor. En el ejemplo mostrado en la figura 2, la variación se genera desconectando repentinamente la corriente a través de la bobina de emisión. La corriente es desconectada en un instante t1. Debido a la inductancia de la bobina de emisión y a la resistencia del resistor de descarga, la corriente en la bobina de emisión no se desconecta inmediatamente. En un instante t2, la corriente en la bobina de emisión ha caído a cero.

La figura 4 muestra la tensión medida a través de la bobina de recepción 5 debido a la variación generada del campo magnético mostrado en la figura 3. Como se muestra en la figura, existe un pico en la tensión medida entre los instantes t1 y t2. La tensión medida antes del instante t2 no es utilizada para determinar el espesor de la capa. En el instante t2 no existe ya ningún campo magnético generado por la bobina de emisión, debido a que no fluye ninguna corriente a través de la bobina de emisión. Sin embargo, el cambio en el campo magnético ha inducido una corriente en la superficie de la capa 2. Esta corriente será rodeada por un campo magnético que rodeará también la bobina de recepción 5. La resistencia del campo magnético en la bobina de recepción depende de la resistencia de la corriente inducida en la capa y de la distancia entre la corriente y la bobina de recepción.

Es importante reducir el periodo de tiempo t1 desde el instante en el que la corriente ha sido desconectada hasta el instante t2 cuando la corriente a través de la bobina es cero. Esto es particularmente importante cuando se miden capas finas. Cuando se miden capas finas, el instante desde el que se ha desconectado la corriente hasta que la corriente a través de la bobina es cero debería ser inferior a 0,1 μs. Éste es el tiempo entre t1 y t2 como se muestra en la figura 3. En el instante t2, la corriente ha cesado a través de la bobina de emisión y se puede iniciar la medición del espesor de la capa. La figura 4 muestra la tensión medida a través de la bobina de recepción debido a la variación generada del campo magnético mostrado en la figura 3. Como se muestra en la figura, existe un pico en la tensión medida entre los instantes t1 y t2. La tensión medida antes del instante t1 no se utiliza para determinar el espesor de la capa.

Es bien conocido el hecho de que si el campo magnético sobre la bobina de recepción cambia, se induce una tensión en la bobina de recepción. La tensión inducida es u(t) de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$u(t) = C1 \cdot \frac{dB_{coil}(t)}{dt} \quad (1)$$

B_{coil}(t) es el campo magnético en la dirección del eje de la bobina integrado sobre la superficie de la bobina. C1 es una constante que depende del número de espiras de la bobina.

La figura 6 muestra la corriente inducida en la superficie de la capa metálica debido a la variación generada del campo magnético en el instante t2. En el instante t2, la corriente solamente es inducida en la superficie de la capa. La figura 7 muestra la corriente inducida en un instante t3. En este instante, la corriente está penetrando en la capa y se mueve hacia el límite 22 entre la capa y el objeto. Cuando la corriente inducida se mueve más hacia el límite 22, se cambia el campo magnético en la bobina de recepción. El cambio del campo magnético se puede calcular, por ejemplo, por medio de ecuaciones de Maxwell. Si el campo magnético que ha sido aplicado por la bobina de emisión era principalmente constante sobre la capa, el campo magnético en la bobina de recepción se puede describir como:

$$B_{coil}(t) = C3 + C2 \cdot \sqrt{\rho1 \cdot t} \quad (2)$$

t es el tiempo transcurrido desde que se generó la variación del campo magnético

$\rho1$ es la resistividad de la capa, y

C3, C2 son constantes.

- 5 La tensión a través de la bobina de recepción es el cambio del campo magnético sobre la bobina de recepción. Derivando la fórmula 2, se puede determinar la tensión a través de la bobina de recepción.

$$u(t) = \frac{C1 \cdot C2}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho1}{t}} \quad (3)$$

u(t) es la tensión medida en el instante t transcurrido desde que se generó la variación del campo magnético.

- 10 Si la tensión se mide en un instante t3, el tiempo t transcurrido desde que se generó la variación del campo magnético es t3 – t2.

A partir de la expresión 3 anterior se puede determinar la raíz cuadrada de la resistividad de la capa como:

$$\sqrt{\rho1} = \frac{2}{C1 \cdot C2} \cdot u(t3) \cdot \sqrt{t3 - t2} \quad (4)$$

u(t3) es la tensión medida en el instante t3.

t2 es el instante en el que la corriente fue inducida en la capa.

- 15 La constante $2/[C1 \cdot C2]$ se puede determinar midiendo en el instante t3 sobre un material homogéneo con resistividad conocida y aplicando la expresión 3.

A partir de la fórmula 10 es posible determinar la resistividad de la capa sobre la base de la tensión medida en el instante t3.

- 20 Mientras la corriente inducida se desplaza a través de la capa y de acuerdo con ello el cambio del campo magnético tiene lugar solamente en la capa, la tensión medida seguirá la relación de tiempo de acuerdo con la expresión 3 anterior. Sin embargo, cuando la corriente penetra el límite 22 entre la capa y el objeto, la tensión medida no seguirá ya la expresión 3, ya que la resistividad $\rho2$ del objeto es diferente de la resistividad $\rho1$ de la capa. Cuando la corriente inducida ha penetrado profundamente en el objeto y de acuerdo con ello después de un tiempo bastante largo, la tensión medida se describe por la siguiente relación:

$$25 \quad u(t) = \frac{C1 \cdot C2}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho2}{t}} \quad (5)$$

$\rho2$ es la resistividad del objeto.

La figura 8 muestra la corriente inducida que pasa a través del límite 22 entre la capa 2 y el objeto 1 y que se mueve a través del objeto.

- 30 La figura 5 muestra cómo la tensión a través de la bobina de recepción varía como una función de tiempo para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa, la curva de trazos marcada con una B, y cómo la tensión a través de la bobina de recepción varía como una función de tiempo para un objeto con una capa de una resistividad diferente, la curva marcada con A. Las curvas se solapan hasta el instante tδ en el que la corriente inducida cruza el límite entre la capa y el objeto. La curva B se desvía de la curva A en el instante tδ debido a la diferencia de resistividad entre la capa y el objeto. Comparando los valores de la tensión medida con valores calculados de la
- 35 tensión para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa, es posible detectar cuándo la curva se desvía y de acuerdo con ello determinar el instante tδ en el que la corriente inducida cruza el límite entre la capa y el objeto.

- 40 Insertando la raíz cuadrada de la resistividad de acuerdo con la fórmula 4 en la expresión para la tensión de acuerdo con la fórmula 3, es posible calcular una relación de tensión – tiempo para el caso de un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa, como se describe por la curva B.

$$u(m) = u(t_3) \cdot \sqrt{\frac{t_3 - t_2}{m - t_2}} \quad (6)$$

5 En un instante adecuado después de t_3 , antes de que se produzca el cambio debido al límite entre la capa y el objeto, se inicia una recopilación automática de valores de medición con preferencia con una longitud constante de la etapa, desde el instante t_3 hasta t_n . De acuerdo con una primera forma de realización de la invención, se calcula una desviación entre el valor de medición recopilado y un valor calculado a partir de la fórmula 6 para cada valor de medición. Cuando esta desviación se incrementa por encima de un valor límite predefinido, el tiempo desde t_3 se registra como una medida del tiempo que la corriente tarda en penetrar en la capa y alcanzar el límite entre la capa y el objeto. Este tiempo se designa con t_{δ} .

10 De la misma manera que en conexión con las expresiones 3 y 4, es posible calcular por medio de ecuaciones de Maxwell la profanidad de la penetración δ de la corriente inducida en un material conductor de electricidad en un cierto momento después de que ha ocurrido la variación del campo magnético aplicado. La profundidad de penetración δ en la capa se puede calcular como:

$$\delta = C_4 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot t} \quad (7)$$

15 C_4 es una constante, y C_4 está en el orden de 100 si la resistividad se da en nOhmios, d se da en μm y el tiempo en μs .

Si la expresión 4 se inserta en la expresión 7, y el tiempo t es $t_{\delta} - t_2$, es posible calcular la profundidad de la corriente inducida en el instante t_{δ} cuando la corriente penetra el límite entre la capa y el objeto, y de acuerdo con ello el espesor d de la capa:

$$d = \delta = \frac{2C_4}{C_1 \cdot C_2} \cdot u(t_3) \cdot \sqrt{t_3 - t_2} \cdot \sqrt{t_{\delta} - t_2} \quad (8)$$

20 t_2 es el instante en el que la corriente ha sido inducida en la capa.

t_{δ} es el tiempo que la corriente tarda en alcanzar el límite entre la capa y el objeto.

La constante $2C_4/[C_1 \cdot C_2]$ se puede determinar de diferentes maneras. Una manera consiste en determinar la constante teóricamente. También es fácil determinar la constante midiendo. Se puede realizar una medición sobre un material con una capa de un espesor conocido.

25 La expresión 8 describe una relación matemática entre el espesor de la capa d , un valor medido $u(t_3)$ de los cambios del campo magnético fuera de la capa metálica en un instante t_3 , y el tiempo que la corriente tarda en alcanzar el límite entre la capa y el objeto.

30 De acuerdo con una forma de realización preferida de la invención, se integran las señales de medición. Se ha probado que es muy conveniente integrar la señal desde la bobina de recepción antes de utilizarla para calcular el espesor y resistividad de la capa. La integración proporciona valores de medición más estables y facilita la comprensión de la medición.

35 La figura 9 muestra un ejemplo de un aparato para la medición del espesor de una capa metálica sobre un objeto metálico, que es adecuado para la ejecución de esta forma de realización de la invención. En esta forma de realización, el suministro de corriente a la bobina de emisión está dispuesto de la misma manera que la forma de realización mostrada en la figura 2. La bobina de recepción 5 está conectada a un amplificador diferencial 17 como en la forma de realización descrita en la figura 2. Este aparato difiere del aparato descrito en la figura 2 en que comprende un integrador 24 conectad entre la unidad de cálculo 9 y el amplificador diferencial 17. La señal de medición $u(t)$ recibida desde la bobina de recepción es integrada con el comienzo en el instante t_2 . Esto se realiza por medio de un conmutador 25, que está dispuesto de tal manera que se inactiva y se pone a cero cuando el conmutador de cierre, y el integrador 24 es activado cuando el conmutador está abierto. El conmutador está cerrado hasta el instante t_2 . En el instante t_2 , el conmutador se abre y se inicia la integración. La señal después del integrador es medida en tres instantes t_3 , t_4 y t_5 . El aparato comprende tres amplificadores 26 de muestra y retención. Las tres mediciones se realizan midiendo la señal en instantes correspondientes en los tres amplificadores 26 de muestra y retención. Tres valores de medición $lu(t_3)$, $lu(t_4)$ y $lu(t_5)$ se utilizan para calcular el espesor de la capa y la resistividad de la capa y posiblemente también para el objeto. Los cálculos se realizan en la unidad de cálculo 9 que, por ejemplo, es un ordenador PC.

La tensión medida a través de la bobina de recepción cuando la corriente inducida se desplaza a través de la capa se describe por la fórmula 3. Integrando la fórmula 3 desde el instante t_2 hasta t , la tensión integrada $lu(t)$ se

describe con la fórmula siguiente, f la diferencia de tiempo entre t1 y t2 es tan pequeña que t1 y t2 son principalmente el mismo tiempo:

$$lu(t) = \int_{t_2}^t u(t) dt = C1 \cdot C2 \cdot \sqrt{\rho_1 \cdot (t - t_2)} \quad (9)$$

5 Puesto que esta expresión es igual que la expresión para la profundidad de penetración δ , excepto las constantes, la tensión integrada $lu(t)$ es proporcional a δ . La tensión integrada es, por lo tanto, una medida de la profundidad que la corriente inducida ha penetrado en el material. De acuerdo con esta forma de realización de la invención, la tensión integrada $lu(t)$ se mide en un instante t3, y si la desconexión de la corriente ha ido muy rápida, el tiempo desde la variación de la variación de la corriente hacia la bobina de emisión es t3 - t2. A partir de la expresión 6 anterior es posible determinar la raíz cuadrada de la resistividad de la capa por la fórmula:

$$10 \quad \sqrt{\rho_1} = \frac{1}{C1 \cdot C2} \cdot \frac{lu(t_3)}{\sqrt{t_3 - t_2}} \quad (10)$$

La constante $1/[C1 \cdot C2]$ se puede determinar midiendo sobre una lamina metálica con resistividad conocida.

A partir de la fórmula 10 es posible determinar la resistividad de la capa sobre la base de la integral de la tensión medida en el instante t3.

15 Mientras el cambio del campo magnético permanece en la capa, la tensión integrada seguirá la relación de tiempo de acuerdo con la fórmula 9. Sin embargo, cuando la corriente inducida ha penetrado el límite 22 entre la capa y el objeto, esta relación cambiará. Cuando la corriente inducida ha penetrado profundamente en el material de base del objeto, la tensión integrada se describirá por la relación siguiente:

$$lu(t) = C1 \cdot C2 \cdot \sqrt{\rho_2 \cdot (t - t_2)} \quad (11)$$

20 ρ_2 es la resistividad del objeto. Combinando las fórmulas 9 y 10 se consigue una relación de tiempo para el objeto homogéneo de la misma resistividad que la capa:

$$lu(t) = lu(t_3) \cdot \sqrt{\frac{t - t_2}{t_3 - t_2}} \quad (12)$$

25 La figura 10 ilustra lo que sucede cuando la corriente inducida penetra el límite entre la capa y el objeto, montando la tensión medida integrada como función de la raíz cuadrada del tiempo. Como se ve a partir de la figura 12, existe una relación lineal entre la tensión integrada y la raíz cuadrada del tiempo. La línea de trazos, designada con D, muestra valores calculados de la integral de la tensión para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa. La curva designada con C muestra una señal de la tensión integrada medida sobre un objeto cubierto con una capa de una resistividad que difiere del material del objeto. Como se ve a partir de la figura, la primera parte de la curva C tiene una pendiente que difiere de la segunda parte de la curva. La pendiente de la primera parte de la curva C es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad ρ_1 de la capa, y la pendiente de la segunda parte de la curva C es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad ρ_2 del objeto.

30 Los instantes de la medición t4 y t5 se seleccionan de tal manera que la corriente inducida ha penetrado el límite entre la capa y el material de base y una parte del material del objeto. En esos instantes, la tensión integrada es lineal a la raíz cuadrada del tiempo, pero con una pendiente que es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad ρ_2 del objeto. El punto de intersección entre la línea que pasa a través de los puntos $lu(t_4)/t_4$ y $lu(t_5)/t_5$ y la línea calculada de acuerdo con la fórmula 12 proporciona el punto en el diagrama en el que la corriente inducida penetra el límite entre la capa y el objeto. Combinando la fórmula 7 y la fórmula 10, se puede determinar la profundidad de penetración δ para la corriente inducida y de acuerdo con ello el espesor d de la capa, de acuerdo con la expresión siguiente:

$$d = \delta = \frac{C4}{C1 \cdot C2} \cdot \frac{lu(t_3)}{\sqrt{t_3 - t_2}} \cdot \sqrt{t_5 - t_2} \quad (13)$$

40 t δ es el instante en el que la corriente inducida penetra el límite entre la capa y el objeto. El instante t δ se puede terminar como el instante en el que la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz

cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad.

Puesto que la tensión integral $lu(t)$ es proporcional a la profundidad de penetración δ , el valor de la tensión integrada $lu(t\delta)$ en el punto de intersección $t\delta$ es proporcional al espesor d de la capa. Por lo tanto, el espesor d de la capa es proporcional al valor integral determinado en el tiempo $t\delta$ en el que la corriente penetra en el límite.

$$d = C5 \cdot lu(t\delta) \quad (14)$$

5 $lu(t\delta)$ es la integral de la tensión medida en el instante $t\delta$. La constante $C5$ se puede determinar midiendo un objeto con una capa de espesor conocido.

10 Por ejemplo, $lu(t\delta)$ se determina como el valor integral cuando la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad, como se muestra en la figura 10, y el espesor d de la capa se estima sobre la base de ello. Esta forma de realización es más sencilla que la utilizada en la expresión 13, puesto que no es necesario determinar el instante $t\delta$ en el que la corriente inducida penetra en el límite entre la capa y el objeto.

15 Con el fin de proporcionar una medición exacta del espesor de la capa, el material del objeto debe ser grueso con relación a la capa, al menos tres veces más grueso que la capa y el instante $t4$ debe medirse un tiempo largo después de que la corriente inducida ha pasado a través del límite, más adecuadamente cinco veces el tiempo que tarda en penetrar la capa. No obstante, es posible utilizar el método de acuerdo con la invención también para casos en los que no se cumplen estas exigencias.

20 El instante $t3$ debería elegirse para que la corriente inducida no haya penetrado todavía la capa. Además, los instantes $t4$ y $t5$ deberían elegirse para que la corriente inducida haya penetrado bien el límite entre la capa y el objeto. Esto requiere que se conozca durante la medición al menos aproximadamente cuándo la corriente inducida penetra el límite. En muchos casos, el espesor aproximado de la capa se conoce de antemano, pero se desea determinar el espesor con una mayor exactitud. En esos casos, es posible utilizar la medición aproximada medida previamente del espesor para determinar los instantes $t3$, $t4$ y $t5$. En una primera medición, se mide la tensión integrada en el instante $t3$ que es lo más corto posible y a partir de esta medición se calcula la raíz cuadrada de la resistividad de la capa a partir de la fórmula 4 por medio del tiempo estimado de penetración, se determinan los instantes $t4$ y $t5$ y se ajustan de acuerdo con ello los amplificadores de muestra y retención. Si no se conoce el valor aproximado del espesor de la capa, se selecciona el instante $t3$ lo más corto posible en una primera medición y se seleccionan los instantes $t4$ y $t5$ lo más tarde posible. A partir de los valores de medición correspondientes sobre la integral de la tensión, se calcula un primer valor para el tiempo de penetración de acuerdo con la fórmula 13. Este valor calculado sobre el tiempo de penetración se utiliza como un valor de referencia para los otros tiempos.

La forma de la relación entre la tensión integrada y la raíz cuadrada del tiempo se puede calcular para tiempos justamente un poco más largos que $t\delta$. Tales cálculos, aunque complicados, se pueden utilizar para determinar d , incluso cuando $t4$ y $t5$ se seleccionan directamente después de $t\delta$.

35 A continuación se describe otra forma de realización de la invención. En esta forma de realización, la resistividad $\rho1$ de la capa se conoce de antemano. La resistividad se puede conocer debido al hecho de que se conoce la composición del material, o midiendo la resistividad antes de aplicar la capa sobre el objeto. Además, la resistividad del material del objeto se conoce de antemano.

40 Si la resistividad conocida de la capa se inserta en la expresión 3 y se conoce la constante $C1 \cdot C2$, se puede calcular una relación entre tensión – tiempo para el caso de un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa. En un instante $t4$ adecuado, después del instante en el que la corriente inducida ha pasado el límite entre la capa y el objeto, se mide un valor de la tensión integrada y se calcula el espesor d de la capa sobre la base de la señal medida integrada $lu(t4)$, el instante de la medición $t4$ y la resistividad $\rho1$ de la capa y la resistividad $\rho2$ del objeto de acuerdo con la relación siguiente:

$$d = lu(t4) - \sqrt{\frac{lu(t4)^2 - \rho2 \cdot t4 - lu(t4)^2}{\frac{\rho2}{\rho1} - 1}} \quad (15)$$

45 El instante $t4$ se selecciona para que sea más largo que el tiempo que la corriente tarda en penetrar el límite entre la capa y el objeto, es decir, más largo que el tiempo en el que los valores de la tensión medida comienzan a desviarse para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa.

La presente invención no está limitada a las formas de realización descritas, sino que se puede variar y modificar dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

- 1.- Un método para medir el espesor de una capa metálica (2) provista sobre un objeto metálico (1), en el que la capa metálica tiene una resistividad (ρ_1) que difiere de la resistividad (ρ_2) del objeto metálico, y el método comprende:
- 5 generar un campo magnético constante en la proximidad estrecha de la capa metálica,
 generar una variación repentina del campo magnético para que se induzca una corriente en la superficie de la capa metálica,
 medir los cambios del campo magnético fuera de la capa metálica debido a la corriente inducida durante un periodo de tiempo que es más largo que el tiempo que la corriente tarda en propagarse a través de la capa metálica,
- 10 detectar cuándo los valores medidos de los cambios del campo magnético se desvían de valores esperados de cambios de un campo magnético para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa y, sobre la base de ello, estimar el tiempo que la corriente inducida tarda en propagarse a través de la capa y alcanza el límite entre la capa metálica y el objeto metálico, y
- 15 determinar el espesor (d) de la capa sobre la base de una relación matemática entre el espesor de la capa y el tiempo que la corriente inducida tarda en alcanzar el límite entre la capa metálica y el objeto metálico.
- 2.- El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicha variación es generada como una función escalonada, en la que el campo magnético se cambia repentinamente a un valor que difiere considerablemente de su valor previo.
- 20 3.- El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha variación es generada al permitir repentinamente que el campo magnético caiga a cero.
- 4.- El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que los cambios del campo magnético se miden midiendo la tensión a través de una bobina (5) posicionada cerca de la capa (2).
- 25 5.- El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el método comprende integrar los cambios medidos del campo magnético y determinar el espesor (d) de la capa sobre la base de una relación matemática entre el espesor de la capa y la integral de los valores medidos de los cambios del campo magnético.
- 30 6.- El método de acuerdo con las reivindicaciones 4 y 5, en el que el método comprende determinar el valor integral ($\int u(t\delta)$) cuando la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad y sobre la base de ello, estimar el espesor de la capa como proporcional al valor integral determinado.
- 35 7.- El método de las reivindicaciones 4 y 5, en el que el método comprende determinar el instante ($t\delta$) en el que la relación entre la integral del cambio medido del campo magnético y la raíz cuadrada del tiempo se desvía de la linealidad, que es el instante en el que la corriente pasa el límite, y sobre la base de ello, estimar el tiempo que la corriente inducida tarda en llegar al límite entre la capa metálica y el objeto metálico.
- 40 8.- El método de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el método comprende determinar la resistividad de la capa metálica sobre la base de los cambios medidos del campo magnético antes de que la variación del campo magnético se haya propagado a través de la capa metálica.
- 45 9.- Un aparato para medir el espesor de una capa metálica (2) provista sobre un objeto metálico (1), en el que la capa metálica tiene una resistividad (ρ_1) que difiere de la resistividad (ρ_2) del objeto metálico, caracterizado por que el aparato comprende:
- 50 un primer dispositivo (4, 7) dispuesto para generar un campo magnético constante en la proximidad estrecha de la capa metálica, y para generar una variación repentina del campo magnético para que se induzca una corriente en la superficie de la capa metálica,
- un segundo dispositivo (5, 8) dispuesto para medir los cambios del campo magnético fuera de la capa metálica debido a la corriente inducida durante un periodo de tiempo que es más largo que el tiempo que la corriente tarda en propagarse a través de la capa metálica, y
- 55 una unidad de cálculo (9) configurada para recibir los cambios medidos del campo magnético y para detectar cuándo los valores medidos de los campos del campo magnético se desvían de los valores esperados de cambios de un campo magnético para un objeto homogéneo con la misma resistividad que la capa y, sobre la base de ello, estimar el tiempo que la corriente inducida tarda en propagarse a través de la capa y llega al límite entre la capa metálica y el objeto metálico, y determinar el espesor (d) de la capa sobre la base de una relación matemática entre el espesor de la capa y el tiempo que la corriente inducida tarda en alcanzar el límite entre la capa metálica y el objeto metálico.
- 60 10.- El aparato de acuerdo con la reivindicación 9, en el que dicho primer dispositivo comprende una bobina (4) suministrada con una corriente variable en el tiempo y el primer dispositivo está dispuesto para generar dicha

variación cambiando repentinamente la corriente suministrada a la bobina.

5 11.- El aparato de acuerdo con la reivindicación 9 ó 10, en el que dicho segundo dispositivo comprende una bobina (5) y el segundo dispositivo está dispuesto para medir los cambios del campo magnético a través de la bobina midiendo la tensión a través de la bobina.

10 12.- El aparato de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en el que el aparato comprende un integrador (17) dispuesto para integrar los cambios medidos del campo magnético, y la unidad de cálculo (9) está configurada para recibir los cambios medidos integrados del campo magnético, y para determinar el espesor (d) de la capa sobre la base de una relación matemática entre el espesor de la capa y la integral de los valores medidos de los cambios del campo magnético.

15 13.- El aparato de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el que la unidad de cálculo (9) está configurada para determinar la resistividad de la capa metálica sobre la base de los cambios medidos del campo magnético antes de que la variación del campo magnético se haya propagado a través de la capa metálica.

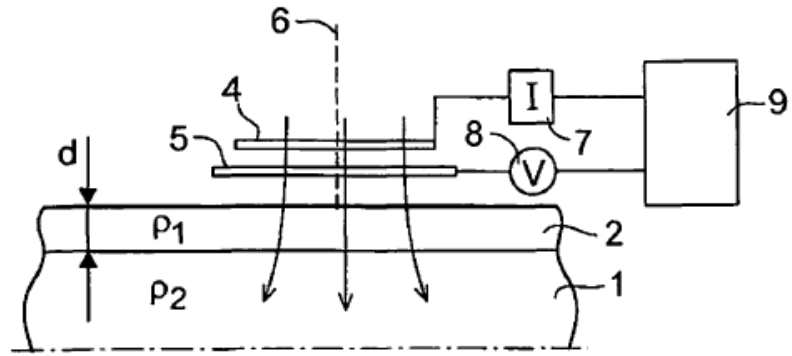


Fig. 1

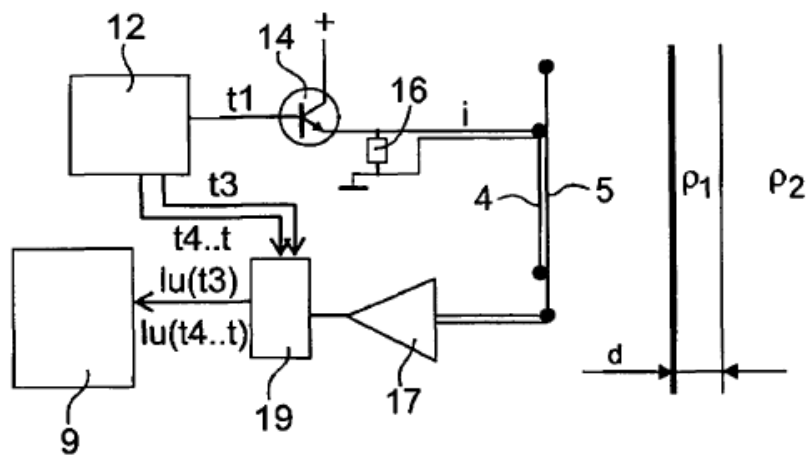


Fig. 2

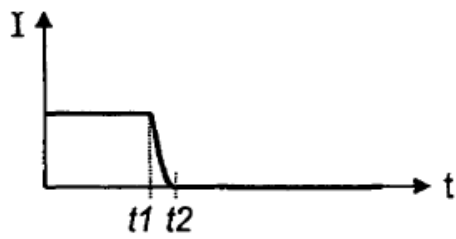


Fig. 3

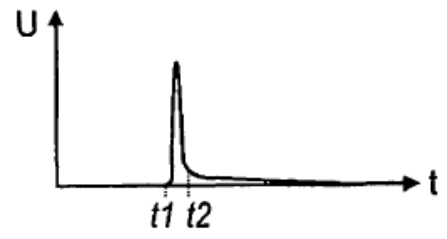


Fig. 4

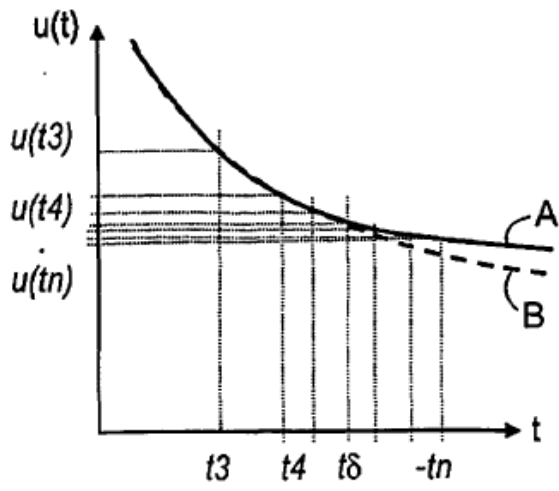


Fig. 5

Fig. 6

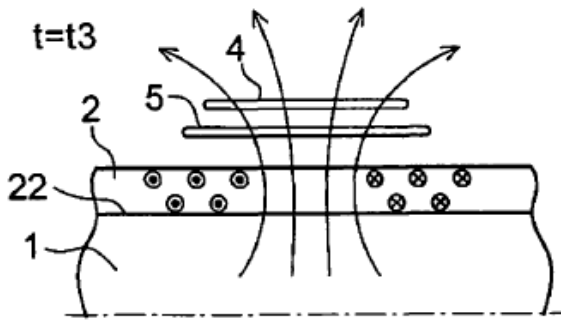
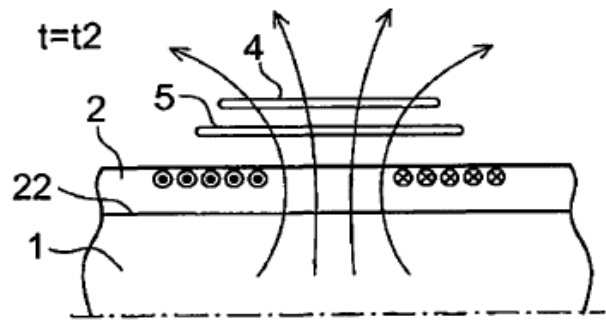
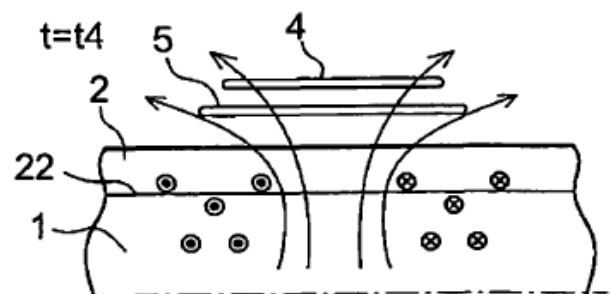


Fig. 7

Fig. 8



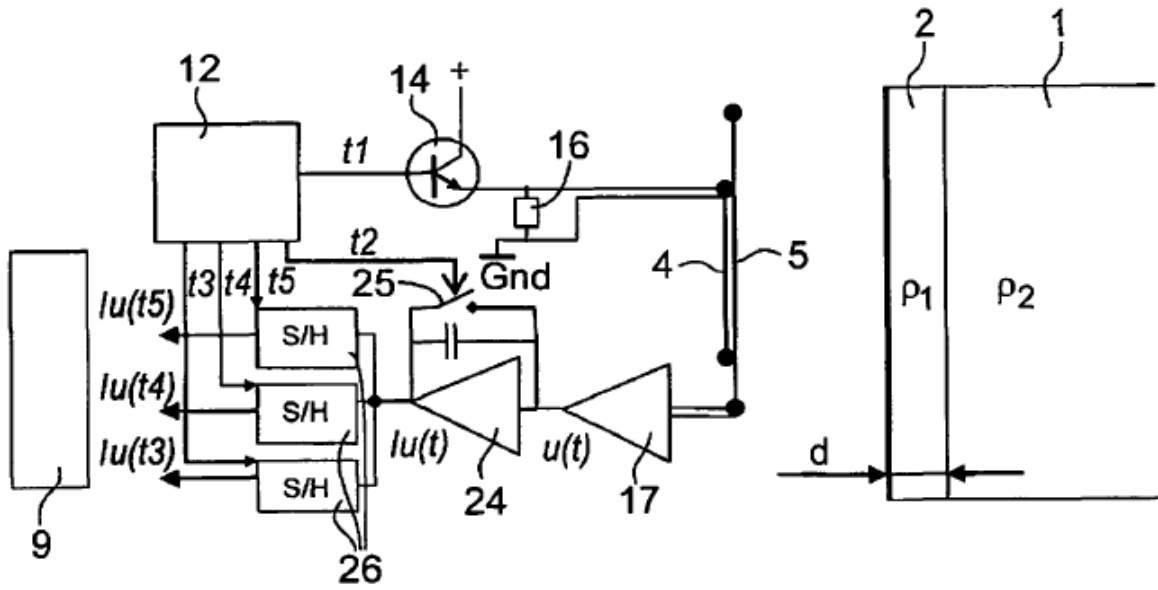


Fig. 9

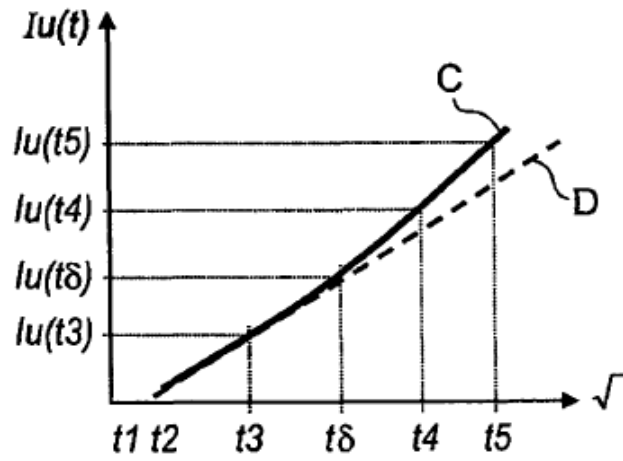


Fig. 10