



(12) Ausschließungspatent

(11) DD 290 986 A5

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1

Patentgesetz der DDR

vom 27. 10. 1983

in Übereinstimmung mit den entsprechenden

Festlegungen im Einigungsvertrag

5(51) H 04 N 22/00

DEUTSCHES PATENTAMT

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) DD H 04 N / 334 669 3

(22) 17. 11. 89

(44) 13. 06. 91

(31) 5957/88

(32) 18. 11. 88

(33) HU

(71) siehe (73)

(72) Ferenczi, György, Dr. Dipl.-Ing., HU; Boda, János, HU; Huber, Detlef, HU; Mirk, Zoltán, Dipl.-Ing., HU; Tichy-Rács, Ádám, Dr. Dipl.-Phys., HU; Mojzes, Imre, Dr. Dipl.-Ing., HU; Hemm, Burkhard, Dipl.-Phys., DE

(73) MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZETE, 1047 Budapest, HU; GemeTeC, Gesellschaft für Meßtechnik und Technologie mbH, W - 8000 München, DE

(54) Verbessertes Verfahren und Vorrichtung zur Mikrowellenspektroskopie von tiefliegenden Niveaus in Halbleitern

(55) Mikrowellen-Transientspektroskopie; Halbleiter; Mikrowellenresonator; Sperrschicht; Impulsgenerator; Ladeimpedanz; Resonanzkurve; Resonator; Frequenzachse; Mikrowellengenerator; Detektor; Störstellen

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Mikrowellen-Transientspektroskopie tiefliegender Störstellen in Halbleitern, bei welchen eine Probe des Halbleitermaterials in das Feld eines Mikrowellenresonators gebracht und Anschlüsse einer Sperrschicht in der Probe mittels eines Impulsgenerators erregt werden. Die reaktive Komponente der Ladeimpedanz, die durch die Anwesenheit der Probe in dem Feld des Resonators verursacht ist, führt zu einer periodischen Verlagerung der Resonanzkurve des Resonators entlang der Frequenzachse. Der Resonator wird von einem Mikrowellengenerator erregt, der etwas gegenüber der Resonanzfrequenz des Resonators verstimmt ist, so daß die Mikrowellenenergie in dem Resonator in ihrer Amplitude durch die Änderungen der reaktiven Komponente moduliert wird. Ein Detektor tastet derartige Änderungen der Amplitude ab und diese Änderungen repräsentieren Transienteigenschaften von tiefen Störstellen in der Probe. Fig. 1

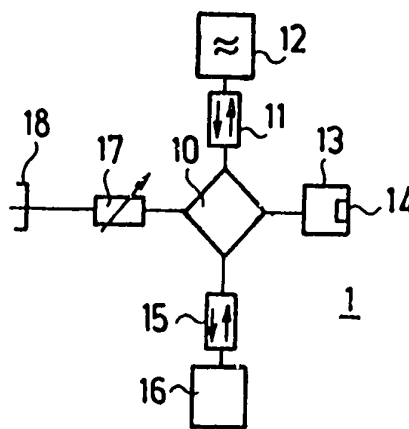


Fig. 1

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Mikrowellen-Transientspektroskopie tiefliegender Stellen in Halbleitern mit elektrisch aktiven Defekten, welche eine Sperrschicht aufweisen, die zur Bildung einer Raumladungsschicht unter Sperrvorspannung in einem Probenmaterial desselben fähig ist und mit einem Kontaktpaar zum Anlegen der Vorspannung versehen ist, wobei
 - a) eine Raumladungsschicht in der Sperrschicht durch Vorspannen der Sperrschicht in Sperrrichtung über an die Kontakte gekoppelte Vorspannmittel erzeugt wird,
 - b) die elektrisch aktiven Defekte in der Sperrschicht gefüllt werden,
 - c) ein thermischer Emissionsprozeß abgetastet wird, der zu einem thermischen Gleichgewichtszustand hin fortschreitet, der nach dem Füllstand vorliegt, wobei das Probenmaterial, das die Sperrschicht enthält, in ein Mikrowellenfeld eines Mikrowellenresonators mit einer Resonanzkurve eingebracht wird, und mittels eines Mikrowellensignals einer Mikrowellenquelle mit vorbestimmter Frequenz wenigstens während des Abtastschrittes erregt wird, und
 - d) der Füllschritt periodisch wiederholt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß
 - e) in dem Abtastschritt an dem Resonator die Mikrowellenamplitude gemessen wird, die auf Grund von Änderungen der reaktiven Komponente der Probe während des thermischen Emissionsprozesses vorliegt, wobei der Mikrowellenresonator gegen die Frequenz derart verstimmt wird, daß die Frequenz auf eine Flanke der Resonanzkurve des Resonators fällt.
2. Vorrichtung zur Mikrowellen-Transientspektroskopie tiefliegender Stellen in Halbleitern, mit einem Mikrowellenresonator mit einer Resonanzfrequenz, einem Mikrowellengenerator, der den Resonator mit einem Mikrowellensignal erregt, einer zu untersuchenden Halbleiterprobe, die eine mit Anschlüssen versehene Sperrschicht aufweist, und Abtastmitteln zum Abtasten der Reaktion der Probe auf Impulse des Impulsgenerators, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Frequenz des Mikrowellensignals des Generators (12) etwas von der Resonanzfrequenz derart abweicht, daß das Erregungssignal auf eine Flanke der Resonanzkurve des Resonators (13) fällt und der Detektor (16) eine Amplitudenmodulation der Mikrowellenenergie in dem Resonator (13) in Antwort auf Änderungen der reaktiven Komponente (C_v) der Sperrschicht abtastet.

Hierzu 2 Seiten Zeichnungen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Mikrowellen-Transientspektroskopie tiefliegender Störstellen in Halbleitern.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

In der veröffentlichten Internationalen Anmeldung WO 87/05701 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Prüfen elektrisch aktiver Verunreinigungen von Halbleitermaterialien oder -strukturen beschrieben, bei welcher eine von dem zu testenden Halbleiter genommene Probe in ein Mikrowellenfeld gelegt und Änderungen der Mikrowellenabsorption in Antwort auf eine spezifizierte Anregung einer in der Probe vorhandenen Sperrschicht gemessen wurden.

Dieses Verfahren benutzt die gleichen Prinzipien wie die gut bekannte Tiefen-Transient-Spektroskopie, wobei jedoch anstelle der Prüfung der transienten Kapazitätswerte in Antwort auf eine spezifizierte periodische Anregung die Änderungen in der Mikrowellenabsorption abgefühlt und gemessen werden.

Die oben erwähnte Internationale Patentanmeldung enthält einen detaillierten Vergleich zwischen der konventionellen DLTS-Technik (Transient-Spektroskopie tiefer Störstellen oder Tiefen-Transient-Spektroskopie) und der vorgeschlagenen Mikrowellenabsorptions-Meßtechnik, wodurch demonstriert wird, daß diese letztere Technik viele Vorteile auf Grund der wesentlich höheren Frequenz des Mikrowellenfeldes im Vergleich zu der in DLTS-Messungen benutzten Brückenfrequenz hat. Wenngleich die periodische Messung von Änderungen der Mikrowellenabsorption in der Probe einen grundsätzlichen Schritt nach vorn im Vergleich zu früheren Methoden gebracht hat, existiert ein Bedarf zur Steigerung der Prüfempfindlichkeit bei der Prüfung von elektrisch aktiven Verunreinigungen.

Ziel der Erfindung

Das Ziel der Erfindung ist es, diesen Bedarf zu befriedigen.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu schaffen, durch welche eine gesteigerte Empfindlichkeit erreicht werden kann.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß in dem Abtastschritt an dem Resonator die Mikrowellenamplitude gemessen wird, die auf Grund von Änderungen der reaktiven Komponente der Probe während des thermischen Emissionsprozesses vorliegt, wobei der Mikrowellenresonator gegen die Frequenz derart verstimmt wird, daß die Frequenz auf eine Flanke der Resonanzkurve des Resonators fällt.

Die Vorrichtung gemäß der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz des Mikrowellensignals des Generators etwas von der Resonanzfrequenz derart abweicht, daß das Erregungssignal auf eine Flanke der Resonanzkurve des Resonators fällt und der Detektor eine Amplitudenmodulation der Mikrowellenenergie in dem Resonator in Antwort auf Änderungen der reaktiven Komponente der Sperrschicht abtastet.

Es wurde gemäß der Erfindung gefunden, daß zusätzlich zu oder genauer einhergehend mit Änderungen in der Mikrowellenabsorption in der Probe während des thermischen Emissionsprozesses, der nach dem Auffüllen elektrisch aktiver Defekte in der Probensperrschicht stattfinden, auch Änderungen in der Reaktionskomponente der von der Probe repräsentierten Mikrowellenimpedanz stattfinden. Änderungen einer Reaktanz in einem Feld eines Mikrowellenresonators können leicht gemessen werden und der empfindlichste Weg zur Messung solcher Änderungen liegt in der Messung der Änderungen der Signalamplitude eines Mikrowellenresonators, der gegen die Erregungsfrequenz verstimmt ist, so daß diese letztere Frequenz auf den Neigungsabschnitt, vorzugsweise in einen mittleren Bereich des Neigungsabschnittes der Resonanzkurve des Resonators fällt.

Solch eine Amplitudenmessung kann zu einer Empfindlichkeit führen, die um etwa zwei Dezimalstellen größer als diejenige ist, die bei Anwendung der Mikrowellenabsorptionstechnik erhalten werden kann.

Das Verfahren gemäß der Erfindung kann für Prüfungen verwendet werden, die im einzelnen in der genannten Internationalen Anmeldung beschrieben sind, wobei der Unterschied lediglich in der wesentlich gesteigerten Empfindlichkeit und dem einfacheren Meßsystem liegt, mit welchen die Amplitudenänderungen gemessen werden können.

Ausführungsbeispiele

Die Erfindung wird nun anhand von bevorzugten Ausführungsformen mit Bezugnahme auf die Zeichnung erläutert. In der Zeichnung zeigt

Fig. 1: das schematische Blockdiagramm der für die Messungen verwendeten Meßbrücke,

Fig. 2: das Gesamtblockdiagramm eines Meßsystems,

Fig. 3: die elektrisch äquivalente Ersatzschaltung eines belasteten Resonators,

Fig. 4: die Kurve der Frequenz über dem Reflexionskoeffizienten für einen auf die Erregungsfrequenz abgestimmten Resonator,

Fig. 5: eine Kurve ähnlich wie Fig. 4, für welche der Resonator gegen die Erregungsfrequenz verstimmt ist,

Fig. 6: die Abhängigkeit der Mikrowellensignalamplitude bei Sperrrichtungsvorspannung der abgefühlten, von einer Diode repräsentierten Sperrschicht,

Fig. 7: experimentell gemessene Reflexionskoeffizienten für eine Si:Se-Probe und

Fig. 8: das Arrhenius-Diagramm der Si-Se⁰-Probe.

Die in Fig. 1 gezeigte Meßbrücke 1 weist ein magisches T 10 mit einem ersten Anschluß auf, der über den Trenner 11 an den Mikrowellengenerator 12 gekoppelt ist, der vorzugsweise ein Gunn-Oszillator ist. Ein zweiter Anschluß des magischen T 10 ist an einen Hohlraumresonator 13 vorzugsweise mittels eines geeigneten Koppelgliedes angeschlossen. In dem Hohlraumresonator 13 ist eine Halbleiterprobe 14, die durchgemessen werden soll, in solcher Weise angeordnet, daß ihre Temperatur geändert werden kann und elektrische Erregungsimpulse auf Anschlüsse einer in der Halbleiterprobe 14 vorhandenen Sperrschicht angelegt werden können. Ein dritter Anschluß des magischen T 10 ist über einen zweiten Trenner 15 an einen Amplitudendetektor 16 angeschlossen. Ein vierter Anschluß ist an einen Abgleicher angeschlossen, der von einem Dämpfungsglied 17 gebildet wird, welcher von einem Phasenschieber 18 belastet wird.

Die Meß- oder Impedanzbrücke 1 aus Fig. 1 bildet einen Teil eines in Fig. 2 gezeigten Meßsystems. In diesem System ist der Impulsgenerator 20 an die Probe in der Brücke zum periodischen Anlegen und Abschalten einer Sperrvorspannung an bzw. von der Sperrschicht entsprechend der aktuellen Meßaufgabe gekoppelt. Der Mikrowellengenerator 12 wird von einem Sägezahn-generator 21 gesteuert. Die Temperatur der Halbleiterprobe 14 kann über die Temperaturregler 22 variiert werden. Ein Oszilloskop 23 kann zum Anzeigen der Wellenform des Signals des Amplitudendetektors 16, des Impulsgenerators 20 und des Sägezahn-generators 21 verwendet werden. Ein Ausgang des Amplitudendetektors 16 ist an einen Signalanalysator 24 gekoppelt, der an einen Datenverarbeitungsrechner 25 angeschlossen werden kann.

Der Hohlraumresonator 13 wird durch die Anwesenheit der Halbleiterprobe 14 belastet. Die elektrisch äquivalente Ersatzschaltung eines solchen belasteten Resonators ist in Fig. 3 gezeigt. Zwischen Anschlüssen A und B enthält die Schaltung 3 Hauptkomponenten, nämlich Widerstandskomponenten R, die Induktivität L und Kapazitäten C. Die periodische Erregung der Sperrschicht in der Halbleiterprobe 14 ändert die Belastung des Resonators, und in der Ersatzschaltung wird dies durch einen veränderlichen Widerstand R_v dargestellt, der in Reihe mit dem festen Widerstand R_f geschaltet ist. Zusätzlich hierzu bildet die Probe eine sich ändernde Reaktanz, die durch die sich ändernde Kapazität C_v repräsentiert wird, die parallel zu der festen Kapazität C_f geschaltet ist. Die Resonanzfrequenz des Resonators wird durch die sich ändernden Werte des veränderlichen Widerstandes R_v nicht geändert, jedoch wird dieser Wert durch die Änderung der Kapazität C_v nach einer Quadratwurzelfunktion geändert. Fig. 4 zeigt die Kurve der Frequenz über der Signalamplitude für den Hohlraumresonator 13, der auf die Erregungsfrequenz von 10,3 GHz abgestimmt ist. Wenn der Hohlraumresonator 13 gegen die Erregungsfrequenz verstimmt ist, wie in Fig. 5 gezeigt, hat der Reflexionskoeffizient (der proportional zu dem Signal ist, das von dem Detektor 16 erhalten werden kann) die aus Fig. 5 ersichtliche Form.

In Antwort auf das periodische Füllen der Halbleiterprobe 14 mittels des Impulsgenerators 20 ändert die Reaktionskomponente C_v ihren Wert periodisch, was dazu führt, daß die Kurve in Fig. 5 parallel zu der Frequenzachse verlagert wird und daher die Signalamplitude diesen Änderungen folgt. Wenn die Erregungsfrequenz auf den mittleren Bereich der linear abfallenden Flanke der Kurve eingestellt wird, dann folgen die Änderungen der abgetasteten Amplitude den Verlagerungen der Resonanzkurve. In dem Amplitudendetektor 16 wird eine Amplitudenmodulation erhalten, welche die Information über das Transientverhalten der Halbleiterprobe 14 trägt.

Im Zusammenhang mit den Figuren 6 bis 8 wird ein Beispiel gegeben, welches die Korrelation der Ergebnisse von Messungen zeigt, die mit dem vorliegenden Verfahren an einer bekannten Probe mit bekannten Eigenschaften dieser Probe durchgeführt wurde.

In dem Beispiel wurde eine GaAs-Schottky-Mischdiode als Amplitudendetektor 16 verwendet. Das Detektorsignal wurde mit einem Breitband (50 MHz)-Vorverstärker verstärkt und die Transienten wurden mit einem schnellen Transientenrekorder aufgezeichnet. Ein zylindrischer Mikrowellen-Hohlraumresonator 13, der in dem TM_{011} -Modus arbeitet, wurde aufgebaut und die Halbleiterprobe 14 wurde auf dem von 80 K bis 450 K temperatursteuerbaren Boden des Hohlraums befestigt. Damit der erforderliche Breitbandbetrieb zugelassen war, wurde der Qualitätsfaktor des Hohlraumresonators auf 1000 gesetzt (die Grundkonstruktion des Hohlraumresonators erlaubte die Verwirklichung eines Faktors bis 10000, jedoch mußte der Qualitätsfaktor wegen des Erfordernisses, Transienten bis herunter zu 50 ns Zeitkonstante zu messen, absichtlich reduziert werden).

Für die neuen Experimente wurde eine Si-p⁺n-Sperrschicht verwendet. Eine 12 µm dicke Epischicht vom n-Typ ($1,10^{15} \text{ cm}^{-3}$) wurde auf einem hochleitfähigen Substrat aufgebaut. $1,10^{14} \text{ cm}^{-3}$ Se wurde in die Epischicht gestrichen und die 2 µm dicke p⁺-Schicht wurde durch Ionenimplantation aufgebaut und zusätzliche Al-Kontakte wurde eingedampft.

Um theoretische Überlegung zu realisieren, bestand der erste Schritt darin, festzustellen, ob das Mikrowellensignal proportional zu den Breiten der Raumladungsschicht ist.

Experimente, wie in der Schrift von D. V. Lang in: „Thermally Stimulated Relaxation Process in Solids“, Abhandlungen in Applied Physics (1979, 37, 93 Bräunlich, ed. Springer) beschrieben, wurden durchgeführt. Die Messungen wurden durch Änderungen der Sperrvorspannung der Diode und Einstellen der Füllimpulsamplitude in solcher Weise durchgeführt, daß während der Impulsdauer Flachband-Bedingungen erzielt wurden. Die Abhängigkeit der Mikrowellen-Signalamplitude von der Sperrvorspannung ist in Fig. 6 gezeigt. Die Kurve zeigt eine Quadratwurzel-Abhängigkeit von der Sperrvorspannung. Im nächsten Schritt wurde die Gültigkeit des äquivalenten Schaltungsmodells untersucht. Die Amplitude der Mikrowellentransienten wurde als Funktion der Mikrowelle-Signalfrequenz durch Abstimmung des Gunn-Oszillators mittels des angeschlossenen Varaktors gemessen. Die Resonanzfrequenz des mit der Probe beschickten Hohlraumresonators betrug 10,3033 GHz. Das Ergebnis ist aus Fig. 7 ersichtlich. Die experimentellen Daten sind sehr gut an die theoretische Kurve angepaßt, wodurch bestätigt wird, daß die maximale Signalstärke bei 5 MHz Verstimmung gegen die Resonanzfrequenz liegt. In Fig. 7 ist die kontinuierliche Linie die theoretisch vorhergesagte Kurve für die Änderung des Ansprechwertes, wie in Fig. 5 gezeigt, wenn die Änderungen von C_v in der Ersatzschaltung aus Fig. 3 berücksichtigt wurden.

Um den Geschwindigkeitsvorteil der Mikrowellendetektion der thermischen Emission gegenüber konventionellen Techniken zu verifizieren, wurde die thermische Emission des Se⁰-Pegels im Si, eine der am genauesten studierten Tiefstellen (wie H. G. Grimmeiss, E. Janzen und B. Skarstam, J. Appl. Phys. 1980, 51, 3740, beschreiben) gemessen. Die Ergebnisse sind in Fig. 8 gezeigt, in welcher die leeren Kreise den Si:Se⁰-Pegel aus dieser Bezugsveröffentlichung und die vollen Kreise Daten aus den vorliegenden Versuchen zeigen. Die schnellste von uns gemessene Emissionsrate betrug 20 MHz, d. h., sie war etwa vier Größenordnungen schneller als früher berichtet. Es gibt keine Grenze zur Messung langsamer Transienten mit dem Mikrowellensystem unterhalb des in Fig. 8 dargestellten Bereiches. Aus Messungen des Signalrauschpegels wurden als Abtastgrenze $N_T/N_D \times 10^{-6}$ für den gesamten Frequenzbereich ermittelt.

Die gemessene Aktivierungsenergie entspricht dem früher in der Veröffentlichung von Grimmeiss et al. genannten Wert, wobei die aus Fig. 8 ersichtliche geringfügige Parallelverschiebung aus höheren Fangquerschnittswerten im vorliegenden Fall gegenüber denjenigen nach der Bezugsveröffentlichung herrührt.

Von diesen Betrachtungen und aus den Versuchen hat sich erwiesen, daß das Abfühlen der Mikrowellen-Reflexionsänderungen, die durch die thermische Emission von gefangenen Trägern aus der Raumladungsschicht einer Halbleiter-Sperrschicht verursacht sind, am empfindlichsten und einfachsten für das Abfühlen thermischer Emission ist. Ein Vorteil von vier Größenordnungen beim Messen thermischer Emissionsraten wurde nachgewiesen, wobei die hohe Empfindlichkeit aufrechterhalten blieb.

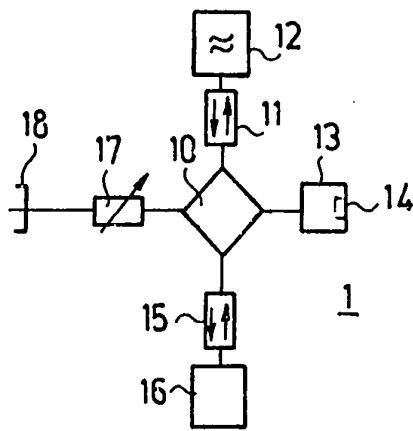


Fig. 1

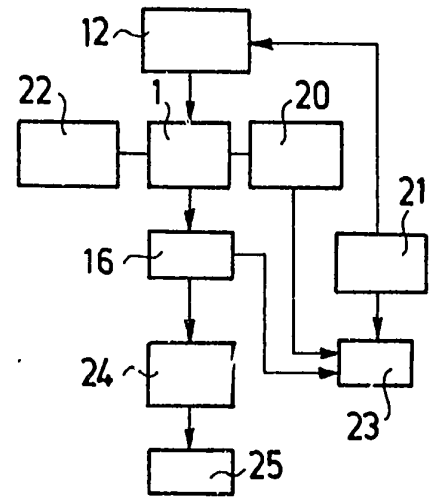


Fig. 2

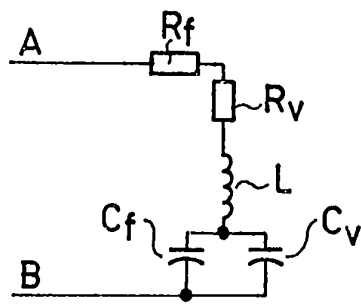


Fig. 3

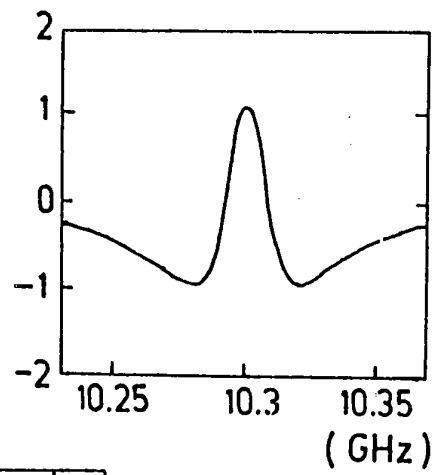


Fig. 4

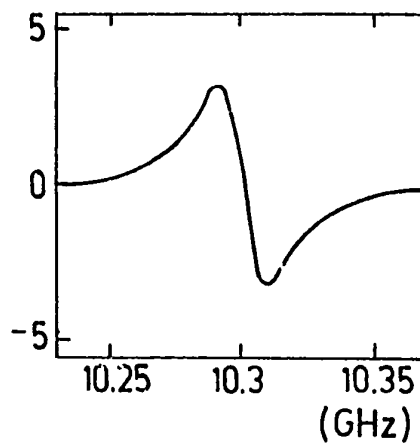


Fig. 5

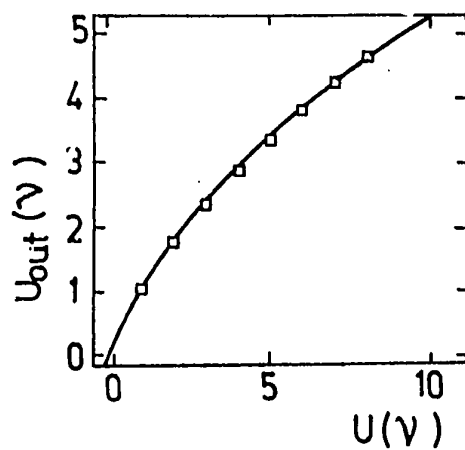


Fig.6

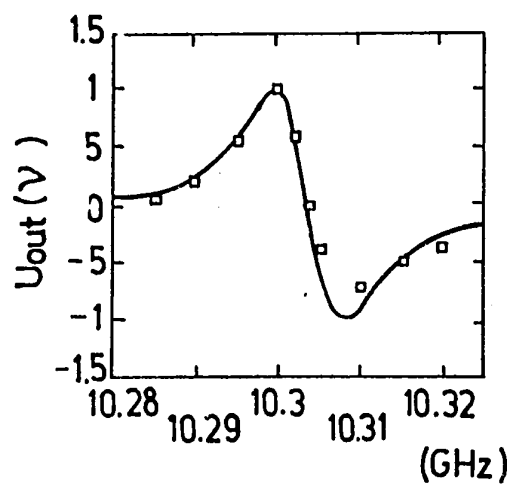


Fig.7

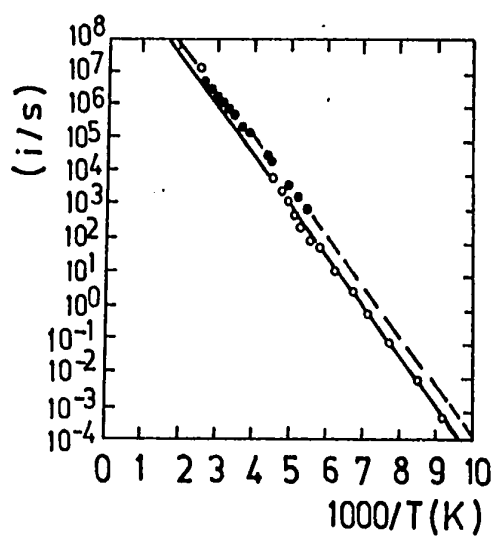


Fig.8