



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

① CH 655 201 A5

⑤ Int. Cl.⁴: H 01 J 43/00
H 01 L 29/66

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑲ Gesuchsnummer: 6041/81

⑳ Anmeldungsdatum: 18.09.1981

㉔ Patent erteilt: 27.03.1986

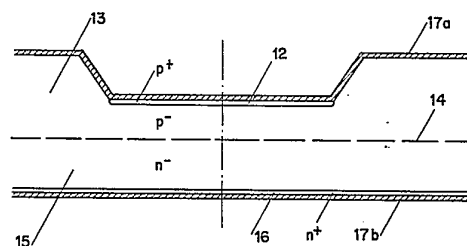
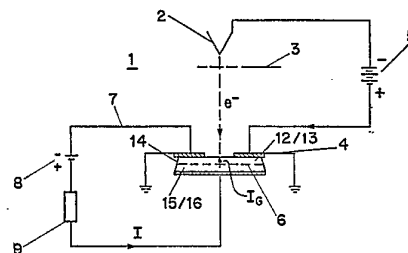
④⑤ Patentschrift veröffentlicht: 27.03.1986

⑦③ Inhaber:
BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie.,
Baden

⑦② Erfinder:
Roggwiller, Peter, Dr., Neerach-Riedt
Sittig, Roland, Dr., Umiken

⑤④ Elektronisches Bauelement bestehend aus einer Elektronenkanone und einer Halbleiterdiode.

⑤⑦ Ein elektronisches Bauelement mit Elektronenkanone (1) und Halbleiterdiode (6), welche in einer Vakuumröhre eingebaut sind, hat eine Stromverstärkung von 2000 und erreicht einen Wirkungsgrad von 92 bis 97 % je nach Schaltfrequenz. Dazu besteht die Halbleiterdiode (6) aus einer 1,2 μm dicken, hochdotierten p-Schicht (12), einer 45 μm dicken, schwachdotierten p-Schicht (13), getrennt durch den pn-Übergang (14) von einer 70 μm dicken, schwachdotierten n-Schicht (15) und einer 5 μm dicken, hochdotierten n-Schicht (16).



PATENTANSPRÜCHE

1. Elektronisches Bauelement bestehend aus einer Elektronenkanone (1) und einer Halbleiterdiode (6), welche in einer Vakuumröhre angeordnet sind, wobei die Halbleiterdiode (6) aus einer hochdotierten p-Schicht (12), einem pn-Übergang (14), einer schwachdotierten n-Schicht (15) und einer hochdotierten n-Schicht (16) besteht, und wobei die p-Schicht (12) unter Elektronenbeschuss steht, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der hochdotierten p-Schicht (12) und dem pn-Übergang (14) eine schwachdotierte p-Schicht (13) angeordnet ist, und dass der pn-Übergang (14) mindestens 10 µm von der anodenseitigen Oberfläche der Halbleiterdiode (6) entfernt ist.

2. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die hochdotierte p-Schicht (12) in ihrem Maximum mindestens 10^{19} Akzeptoren pro cm^3 und eine Dicke von 0.1 µm bis 1.5 µm besitzt.

3. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die schwachdotierte p-Schicht (13) eine Dicke von 10 µm bis 70 µm besitzt und ein zum pn-Übergang (14) leicht abfallendes Dotierungs-Profil hat, wobei die mittlere Dotierung $(1.0 \pm 0.5) \cdot 10^{15}$ Akzeptoren pro cm^3 beträgt.

4. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Dotierung und Dicke der schwachdotierten n-Schicht (15) derart sind, dass die Sperrspannung der Halbleiterdiode mehr als 500 V beträgt.

5. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die hochdotierte n-Schicht (16) in ihrem Maximum mindestens 10^{19} Donatoren pro cm^3 und eine Dicke von 2 bis 10 µm besitzt.

6. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektronenkanone (1) eine Vakuumtriode ist.

7. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterdiode (6) Teil der Anode (4) der Elektronenkanone (1) ist.

8. Elektronisches Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektronenkanone (1) eine Vakuumdiode ist, welche eine nach dem Prinzip der Feldemission arbeitende Kathode besitzt.

Die Erfindung bezieht sich auf ein elektronisches Bauelement nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Ein solches Bauelement ist bekannt aus Solid State Technology (Juli 1974), S. 31-35. Dort wird ein elektronisches Bauelement beschrieben, mit einer planaren Triodenanordnung als Elektronenkanone. Die Elektronen werden erzeugt von einer Glühkathode und beschleunigt bis zu Energien von 12 bis 15 keV. Der Elektronenstrahl zielt auf eine in Sperrichtung gepolte Diode, welche entweder eine pn-Schichtdiode oder eine Schottky-Diode ist. Dieser Strahl erzeugt dann in der Diode Elektron-Loch-Paare. Über die Diode ist eine Spannung von 400 Volt über einen Lastwiderstand von 100 Ω angelegt. Der Strom im Lastkreis ist direkt proportional zur in der Diode freigemachten Ladung. In einer anderen Anordnung wird der Strahl zwischen zwei Platten elektrisch abgelenkt und kann somit hochfrequent moduliert werden. Es werden dann zwei Dioden statt einer verwendet. Eine solche Vorrichtung kann Spannungen bis auf ± 100 Volt bei einem Lastwiderstand von 50 Ω verstärken. Die Bandbreite geht von Gleichspannung bis 300 MHz. Die Vorrichtung ist luftgekühlt; andere Typen für grössere Leistungen sind mit flüssiger oder mit Pressluft-Kühlung ausgestattet.

Die hier verwendete Diode besteht aus einer dünnen hochdotierten p-Schicht (0.3 µm), welche in eine schwachdotierte n-Schicht von 50 µm Dicke hineindiffundiert ist. Auf der anderen Seite dieser n-Schicht befindet sich eine dicke, hoch-

dotierte n-Schicht. Die hochdotierte p-Schicht erstreckt sich nur unweit über das bestrahlte Gebiet hinaus. Ausserhalb dieses Gebietes ist auf der Dioden-Anordnung eine SiO_2 -Schicht aufgebracht. Darüber liegt dann eine Aluminium-Schicht, welche auch das bestrahlte Gebiet überdeckt. Die Dicke dieser Schicht ist im bestrahlten Gebiet dünner, und ausserhalb dicker, um dort eine abschirmende Wirkung zu erzielen.

Es werden aber Sekundärelektronen und Röntgenstrahlen erzeugt, welche in unmittelbarer Nähe des bestrahlten Gebietes Elektron-Loch-Paare in der SiO_2 -Schicht erzeugen. Die Elektronen wandern hinaus, die Löcher bilden bei Zimmertemperatur eine positive Ladung, welche die Sperrspannung von 300 bis 400 Volt bis auf ungefähr 120 Volt reduziert. Dies findet schon nach einigen Betriebsstunden statt. Um diese Probleme zu beheben, wird auf die SiO_2 -Schicht zunächst eine Glasschicht aufgebracht. Eine weitere Verbesserung besteht darin, dass eine zusätzliche, kegelförmige Metallabschirmung auf die Aluminiumschicht um das bestrahlte Gebiet aufgebracht wird. Zusätzlich wird die hochdotierte p-Schicht an den Rändern dicker gefertigt.

Ein wesentlicher Nachteil der obigen Bauelemente ist, dass die Betriebsweise bei hohen Leistungen zu übermässigen Verlusten in der Halbleiterdiode führt, da der Laststrom bei anliegender Restspannung geführt werden muss, um unerwünschte Speicherladungen in der Diode zu verhindern. Ein anderer Nachteil ist, dass der Rand der Diode speziell ausgebildet werden muss, um eine ausreichende Sperrfähigkeit zu erreichen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein aus einer Elektronenkanone und einer Halbleiterdiode bestehendes elektronisches Bauelement aufzubauen, das zum Schalten elektrischer Leistungen von 10 kW oder mehr bei Frequenzen bis zu 100 kHz geeignet ist.

Diese Aufgabe wird bei einem Bauelement der eingangs genannten Art erfindungsgemäss durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Die wichtigsten Vorteile der Erfindung sind, dass im eingeschalteten Zustand fast keine Durchlassspannungen auftreten, und daher sehr hohe Ströme geführt werden können. Aufgrund der hier vorgeschlagenen Dimensionierung können die Schaltverluste sehr klein gehalten werden, so dass das Bauelement bis zu Frequenzen im 100 kHz Bereich betrieben werden kann.

Nachfolgend wird anhand von Zeichnungen ein Ausführungsbeispiel der Erfindung näher erläutert. Dabei zeigt:

Fig. 1 einen schematischen Aufbau des erfindungsgemässen Bauelementes

Fig. 2 das Dotierungsprofil der Halbleiterdiode

Fig. 3 den Aufbau der Halbleiterdiode

Fig. 4 eine praktische Ausführungsform des erfindungsgemässen Bauelementes.

In Fig. 1 wird der schematische Aufbau des Bauelementes gezeigt. Es besteht aus einer Elektronenkanone 1, welche eine Kathode 2, ein Gitter 3 und eine Anode 4 umfasst, sowie eine Halbleiterdiode 6. Diese wird auf ihrer anodenseitigen Oberfläche mit dem Elektronenstrahl e^- bestrahlt. In der Figur 2 wird das Dotierungsprofil der Halbleiterdiode 6 im bestrahlten Gebiet gezeigt. Dabei bezeichnet die Abszisse 10 den Abstand von der anodenseitigen Oberfläche der Halbleiterdiode 6 ausserhalb des bestrahlten Gebietes in µm, und die Ordinate 11 die Differenz zwischen Majoritäts- und Minoritätsladungsträgern $[N_A - N_D]$ pro cm^3 . Eine hochdotierte p-Schicht 12 und eine schwachdotierte p-Schicht 13 sind durch den pn-Übergang 14 von der schwachdotierten n-Schicht 15 und der hochdotierten n-Schicht 16 getrennt.

Die hochdotierte n-Schicht 16 besitzt in ihrem Maximum mindestens 10^{19} Donatoren/cm³, und eine Dicke von 2 bis 10 µm. Dotierung und Dicke der schwachdotierten n-Schicht 15 sind derart, dass die Sperrspannung der Halbleiterdiode 6 mehr als 500 V beträgt, speziell 0,5 bis 1,5 kV. Beispielsweise kann hierfür die Dotierung $(1.0 \pm 0.5) 10^{15}$ cm⁻³, und die Dicke 20 bis 100 µm betragen.

In der Figur 3 wird der Aufbau der Halbleiterdiode 6 gezeigt. Sie weist eine Vertiefung auf, in welcher die anodenseitige Oberfläche durch die Elektronen e⁻ bestrahlt wird. Des weiteren weist sie im bestrahlten Gebiet eine höher dotierte p-Schicht 12, eine niedriger dotierte p-Schicht 13, einen pn-Übergang 14, eine niedriger dotierte n-Schicht 15, und eine höher dotierte n-Schicht 16 auf. Die Kontaktmetallisierungen 17a, 17b sind 1.0 µm dick. Bei der Metallisierung 17a beträgt die Dicke im bestrahlten Gebiet 0.1–0.3 µm.

In Figur 4 wird eine praktische Ausführungsform des Bauelementes gezeigt. Sie besteht aus der Elektronenkanone 1 die Kathode 2, das Gitter 3, und die Anode 4 umfasst, sowie aus der Halbleiterdiode 6. Anschlussbolzen 18 sind in einem Glasisolator 19 eingefasst. Die Anode 4 wird über das Rohr 20 mit Wasser gekühlt.

Die Wirkungsweise des erfindungsgemässen Bauelementes ist wie folgt.

Die Elektronenkanone 1 ist an eine Hochspannungsquelle 5 angeschlossen. Damit werden in der Elektronenkanone 1 mit triodenartigem Aufbau schnelle Elektronen e⁻ mit einer Energie von 10 keV bis 20 keV erzeugt (Fig. 1). Die Intensität wird von einem Gitter 3 gesteuert. Die Anodenseite der Halbleiterdiode 6 wird von den Elektroden bestrahlt, welche pro Elektron einige Tausend Elektron-Loch-Paare erzeugen. Die Halbleiterdiode 6 ist in Sperrichtung an die Spannungsquelle 8 über den Lastkreis 7 und den Lastwiderstand 9 angeschlossen. Durch die Dotierung werden in der Diode elektrische Felder hervorgerufen, in denen die Ladungsträger getrennt werden, so dass ein entsprechender Strom durch die Diode 6 und den Lastkreis 7 fliesst.

Die Halbleiterdiode 6 soll die erzeugten freien Ladungsträger mit möglichst hohem Wirkungsgrad trennen. Zu diesem Zweck wird ein inneres Feld von ausreichender Stärke benötigt. Die Ladungstrennung erfolgt in einem Diffusionsfeld, welches durch die dünne hochdotierte p-Schicht 12 erzeugt wird (Fig. 2). Lage und Stärke dieses Feldes ist von momentanen Strom- und Spannungswerten praktisch unabhängig. Das Diffusionsfeld erstreckt sich über einen Bereich zwischen 0.8 µm und 1.6 µm unter der Oberfläche und beträgt etwa 1700 Vcm^{-1} . In Tiefen über etwa 1.6 µm sind keine inneren Felder von Bedeutung mehr vorhanden, so dass der Strom hier durch Diffusion weiterfliesst. Die Diffusionsstärke ist somit proportional zum Konzentrationsgradienten an freien Ladungsträgern, was bedeutet, dass mit steigendem Strom auch die Menge an gespeicherter Ladung im Bauelement zunimmt. Die Zeitabhängigkeit der Speicherladung Q kann durch die Gleichung

$$Q = I_G - I - \frac{Q}{\tau}$$

beschrieben werden. I_G entspricht darin dem Strom, welcher aus der Generationszone ins Innere des Bauelementes fliesst, während I den Strom im Lastkreis darstellt. τ ist die mittlere Lebensdauer der Ladungsträger.

Die Schaltgeschwindigkeit, und damit die Verluste, sind stark abhängig vom Arbeitspunkt des Bauelementes. Bei starker Übersteuerung wird der Stromanstieg schneller. Dabei steigt die gespeicherte Ladung während langer Zeit (bis etwa 1 Trägerlebensdauer) praktisch linear an, und ist am Ende des Ansteuerpulses umso grösser, je länger dieser

gedauert hat. Diese Ladung fliesst praktisch vollständig ab, bevor der pn-Übergang 14 frei geworden ist und Spannung aufnehmen kann, so dass nur sehr geringe Ausschaltverluste erzeugt werden. Das Schaltverhalten wird auch durch den Abstand des pn-Übergangs 14 beeinflusst. Bei geringerer Dicke der schwachdotierten p-Schicht 13 erhöht sich die Einschaltgeschwindigkeit, da das Volumen über der Diffusionsstrecke bis zur Grenze der Raumladungszone schneller mit Ladungsträgern gefüllt ist. Im bestrahlten Gebiet ist deshalb eine 60 µm dicke Vertiefung in der schwachdotierten p-Schicht 13 vorgesehen (Fig. 3). Diese p-Schicht 13 ist hier 45 µm dick.

Der Widerstand der schwachdotierten n-Schicht 15 beträgt etwa $10 \Omega \text{ cm}$, was, zusammen mit der dicken schwachdotierten p-Schicht 13 (welche grösser oder gleich $10 \mu\text{m}$ sein sollte), einer Durchbruchspannung von etwa 1 kV entspricht. Bei dieser Spannung reicht die Raumladungszone nur etwa 28 µm in die schwachdotierten p-Schicht 13 hinein. Die Kontaktmetallisierung 17a sollte möglichst dünn gewählt werden, muss jedoch über eine ausreichende Leitfähigkeit verfügen um den Strom verlustfrei ableiten zu können. Schichtdicken zwischen 0.1 µm und 0.3 µm haben sich als günstig erwiesen. Die Dicke der hochdotierten p-Schicht 12 beträgt etwa 1.2 µm, gemessen von der Si-Oberfläche. Diese Dicke ist der Eindringtiefe von Elektronen im Energiebereich von 10–15 keV angepasst. Die schwachdotierte n-Schicht ist 70 µm dick, die hochdotierte n-Schicht ist etwa 5 µm dick.

Die schnellen Elektronen e⁻ zur Ansteuerung des Bauelementes werden in einer Vakuumröhre beschleunigt, in welcher die Halbleiterdiode 6 als Teil der Anode integriert ist (Fig. 4). Ein Gitter 3 zwischen Kathode 2 und Anode 4 dient zur Steuerung des Elektronenstromes, der im Pulsbetrieb möglichst schnell ein- und ausgeschaltet werden muss. Die Röhre ist axial aufgebaut und besitzt keine weiteren Einrichtungen zur Strahlfokussierung. Sie ist auf einen Betriebsdruck von etwa 10^{-5} Torr evakuiert: Infolge der hohen inneren Verstärkung von 2–3000 genügt für einen Laststrom von 100 A bereits ein Elektronenstrom von 50 mA.

Die Glühkathode 2 kann auch durch eine sogenannte kalte Kathode ersetzt werden, welche nach dem Prinzip der Feldemission arbeitet. Mit Hilfe spezieller Ätztechniken hergestellte Mikroemitter, mit einer Packungsdichte bis $10^6/\text{cm}^2$, bilden eine Kathode 2, welche einen Strom in der Grössenordnung von 10 A/cm^2 emittiert. Dieser Strom wird durch eine integrierte Elektrode gesteuert, so dass das Gitter 3 überflüssig wird.

Das Gitter 3 ist ein Tantal-Becher mit stirnseitiger Öffnung von 5 mm Durchmesser, und umschliesst die Kathode 2. Die Öffnung ist durch ein Lochgitter mit 70% Transparenz überdeckt. Zur elektrischen Kontaktierung sind das Gitter 3 und die Kathode 2 an Durchführungen angeschlossen, welche mit den Anschlussbolzen 18 verbunden sind. Der Glasisolator 19 dient dabei gleichzeitig als Röhrensockel. Der Kathoden-Gitter-Abstand beträgt etwa 1 mm und der Gitter-Anoden-Abstand etwa 15 mm. Das Gitter 3 und die Kathode 2 befinden sich auf negativer Spannung von 10 bis 20 kV, weshalb bei der Gittersteuerung eine Potentialtrennung eingebaut ist. Die Schaltung wird deshalb zur Erzeugung negativer Gitterspannungspulse (kleiner als -150 V) über ein Lichtleiterkabel an die Signalquelle angekoppelt (nicht gezeichnet).

Zur Ableitung der Verlustwärme (hauptsächlich Anodenverlustleistung der Röhre) ist in der Anode 4 eine Wasserkühlung eingebaut, welche über die Kühlwasserrohre 20 angeschlossen ist.

Das elektronische Bauelement erreicht einen Wirkungsgrad von 92 bis 97% je nach Schaltfrequenz, bei einer Stromverstärkung von 2000.

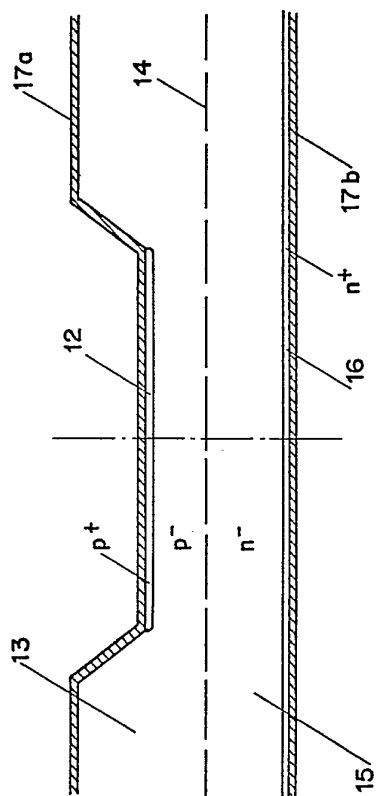


Fig. 3

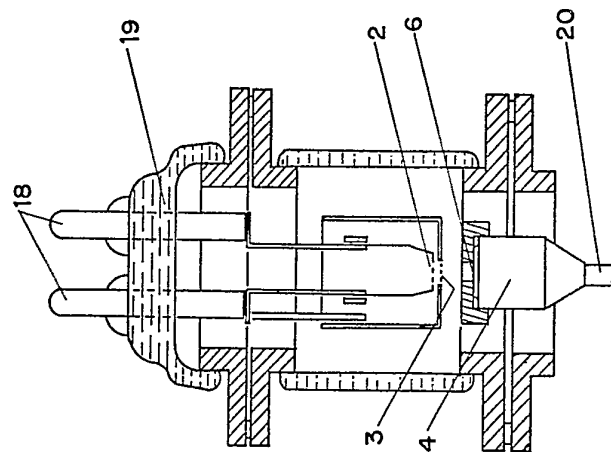


Fig. 4

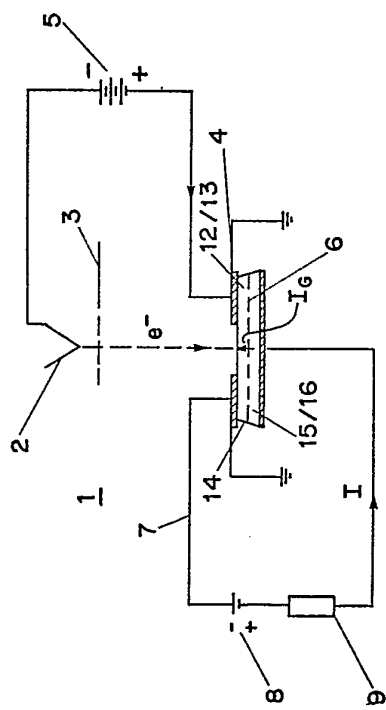


Fig. 1

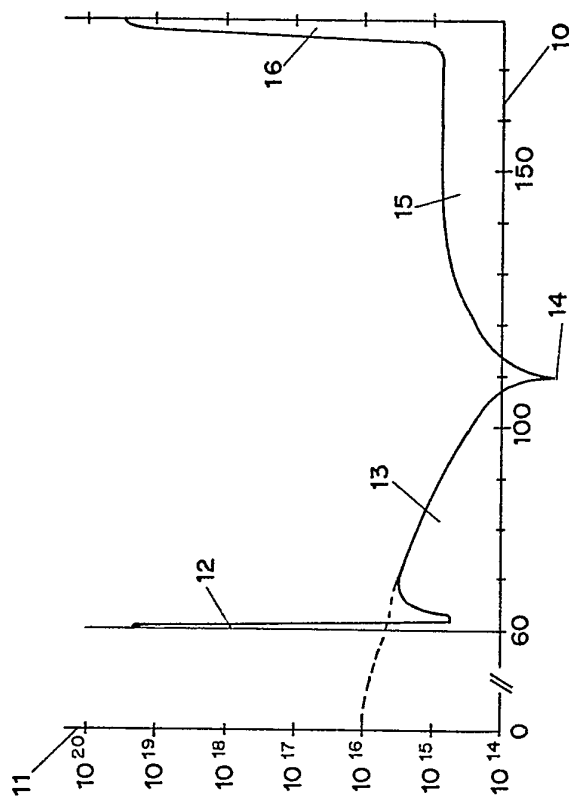


Fig. 2