DEUTSCHE DEMOKRATISCHE REPUBLIK

PATENTSCHRIFT

(12) **Wirtschaftspatent**

(19) **DD** (11) **220 812 A1**

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

4(51) **H 01 L 21/265**

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) WP H 01 L / 259 763 8 (22) 01.02.84 (44) 10.04.85

(71) Humboldt-Universität zu Berlin, 1080 Berlin, Unter den Linden 6, DD

(72) Kerkow, Hartmut, Dr. rer. nat. Dipl.-Phys.; Kreysch, Günter, Dr. rer. nat. Dipl.-Phys.; Lukasch, Bernd, Dipl.-Phys.; Kudella, Frank, Dr. rer. nat. Dipl.-Phys.; Griepentrog, Michael, Dipl.-Phys., DD

(54) Verfahren zur Herstellung von Dotierungsprofilen mit steilem Konzentrationsgradienten

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Dotierungsprofilen mit steilem Konzentrationsgradienten, die insbesondere für die Fertigung von Bauelementen mit kurzen Schaltzeiten, hoher Frequenz und schmalen pn-Übergängen geeignet sind. Aufgabe der Erfindung ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Dotierungsprofilen mit steilem Konzentrationsgradienten mittels Ionenimplantation. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß eine amorphe Schicht durch Ionenimplantation hergestellt wird, durch die die Verteilung der Ionen bei einer nachfolgenden Dotierungsimplantation gegenüber dem einkristallinen Substrat geändert wird, wodurch am Phasenübergang amorph-kristallin ein steiler Konzentrationsabfall erfolgt. Anschließend werden die Kristalle in bekannter Weise ausgeheilt und damit elektrisch aktiviert.

ISSN 0433-6461

5 Seiten

Erfindungsansprüche:

1. Verfahren zur Herstellung von Dotierungsprofilen mit steilem Konzentrationsgradienten mittels Ionenimplantation, **dadurch gekennzeichnet,** daß in einem Halbleiterkristall vor der eigentlichen Dotierungsimplantation durch Implantation mit kristallografisch gut löslichen Ionen bei Dosiswerten unterhalb von $5 \cdot 10^{14}$ Ionen/cm^2 und Temperaturen um oder unterhalb Raumtemperatur eine amorphe Deckschicht oder eine amorphe vergrabene Schicht erzeugt und diese Schichtstruktur bei Temperaturen unterhalb 300°C durch Implantation dotiert und mit bekannten Ausheilverfahren rekristallisiert und aktiviert wird.
2. Verfahren nach Punkt 1, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Ausdehnung der amorphen Schicht dem Dotierungsprofil entspricht.
3. Verfahren nach Punkt 1, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Grenzen der amorphen Schicht durch eine Zwischentemperung formiert werden.
4. Verfahren nach Punkt 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Reichweite der Ionen bei der Dotierungsimplantation die Dicke der amorphen Schicht nicht überschreitet und auch nicht wesentlich unterschreitet.
5. Verfahren nach Punkt 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet,** daß im Falle von (100)-Si-Kristallen, für die Dotierungsimplantation B- oder P-Ionen verwendet werden und die Kristalle zuvor mit Schwerionen wie Si, Ge, Sn oder As derart implantiert werden, daß zwar eine vollständige Amorphisierung mit scharfen Interface-Strukturen erreicht wird ohne den Kristall dabei umzudotieren.

Hierzu 2 Seiten Zeichnungen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Dotierungsprofilen mit steilem Konzentrationsgradienten, das insbesondere geeignet ist zur Herstellung von Transistoren geringer Basisweite, von Kapazitätsdioden und von speziellen Halbleiteranordnungen für kurze Schaltzeiten und für hohe Frequenzen.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Mit Fremdatomen dotierte Schichten werden technisch hergestellt durch Diffusion, Implantation oder durch Epitaxie. Bei der Diffusion wird der Halbleiter bis kurz unterhalb des Schmelzpunktes in einer flüssigen oder gasförmigen Atmosphäre erhitzt, die das Dotierungselement enthält. Der Gradient im chemischen Potential zwischen den zunächst getrennten Stoffsystemen und dem vollständig durchmischten Stoffsystem als Endprodukt sorgt für eine allmähliche Durchdringung des Halbleiters mit den Fremdatomen. Den umgekehrten Prozeß der Verdampfung oder der Zersetzung des Halbleiters muß man durch entsprechende Vorkehrungen verhindern. Die Verteilungsprofile der Dotanden im Halbleiter ergeben sich dabei aus den Gesetzen der Diffusion und haben die Gestalt von Fehlerfunktionen (B. Truck „Interproduction to Diffusion in Semiconductors" London 1971), deren Form von den Oberflächenkonzentrationen der Dotanden und der Temperatur des Halbleiters abhängt. Auf diese Weise ist es möglich, die Profile durch die Regimeparameter zu beeinflussen, jedoch kann man prinzipiell an dem exponentiellen Profilverlauf nichts ändern.
Etwas steilere Profile erhält man durch die Ionenimplantation, deren Profilform annähernd die Gestalt von Gaußfunktionen haben (H. Ryssel, I. Ruge Ionenimplantation Leipzig 1978), deren Profilabfall umso flacher verläuft, je tiefer die Ionen in den Halbleiter eindringen.
Prinzipiell sollte man mit der Epitaxie abrupte Konzentrationsgradienten in der Dotierung erzielen können, jedoch sind bei den technisch verwendbaren Verfahren die Temperaturen bei der Materialabscheidung so hoch, daß im erheblichen Maße Diffusionsprozesse ablaufen, die eine Verschmierung an den Grenzübergängen bewirken. Nur unter Ausnutzung der Ultrahochvakuumtechnik ist diese Methode bisher erfolgreich erprobt worden, jedoch ist eine breite technische Realisierung damit nicht zu erwarten.
Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Oberfläche mit dem reinen Dotierungsmaterial zu belegen und anschließend durch kurzzeitiges Aufschmelzen oder durch Ionenbestrahlung mit der Oberfläche des Halbleiters zu durchmischen (2nd IBMM Albany, New York 1980). Shannon (J. M. Shannon BRD-AS 2056124) schlägt deshalb die Rückstoßimplantation als mögliches Verfahren vor. Wesentlicher Nachteil dieser Methode ist der genaue Abgleich zwischen Reichweite der Ionen und Dicke der aufgetragenen Schicht. Außerdem ist die Dotierungstiefe gering und der Halbleiter wird zusätzlich durch die implantierten Ionen für die Durchmischung belastet. Eine stärkere Bremsung der Ionen bei der Implantation soll man nach Duffy u. a. (M. C. Duffy, P. A. Schumann, T.-H. Yeh BRD-PS 1966237) durch eine vorhergehende Zerstörung des Kristallgefüges erzielen und dadurch steilere Profile erhalten. Die gleiche Wirkung sollte man aber auch durch Einschuß in eine irreguläre Kristallrichtung erhalten. Verhindert man dabei eine Probenerwärmung, so entsteht selbstregulierend genügend Strahlenschaden zur Bremsung der Ionen. Eine zusätzliche teilweise Zerstörung des Kristallgitters hätte nur zur Folge, daß undefinierte Restdefekte die elektrische Wirksamkeit der Dotanden einschränken.
Die bisher bekannt gewordenen Verfahren zur Erzeugung steiler Konzentrationsprofile sind entweder technologisch sehr aufwendig oder sind von zahlreichen Nebenwirkungen und Einschränkungen begleitet, so daß man nach neuen, technologisch einfachen Lösungen suchen sollte.

Ziel der Erfindung

Die Erfindung verfolgt das Ziel, ein Verfahren vorzulegen, nach dem in reproduzierbarer Weise Dotierungsprofile mit einem steilen Konzentrationsgradienten im Halbleiter hergestellt werden.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist die Bereitstellung eines Verfahrens zur Herstellung von Dotierungsprofilen mit steilem Konzentrazionsgradienten unter Verwendung der Ionenimplantation. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß im Halbleiter eine Schichtstruktur erzeugt wird, die aus einer amorphen Deckschicht auf einem einkristallinen Substrat besteht. Die amorphe Schicht wird im Halbleiter durch eine vorhergehende Amorphisierung mit kristallografisch gut löslichen Ionen durch Ionenbeschuß erzeugt. Wird bei der nachfolgenden Dotierungsimplantation die Energie der Ionen gerade so gewählt, daß die projezierte Reichweite der Ionen noch innerhalb der amorphen Schicht liegt, so gelangen nur noch die Ionen aus dem Profilausläufer in das einkristalline Substrat. Für diese Ionen ist die Kernbremsung gegenüber dem amorphen Material stark reduziert, da sie sich wegen ihrer niedrigen Energie mit großer Wahrscheinlichkeit parallel zu den Netzebenen bewegen (Kanalleitung). Dadurch ist ihre Verteilung im kristallinen Substrat gegenüber dem amorphen Kristall stark gestreckt und ihre Konzentration erheblich reduziert. Es entsteht an der Phasengrenze ein steiler Konzentrationsabfall der Dotierungsatome. Die praktische Anwendung dieses Verfahrens ist an zweierlei Voraussetzungen gebunden:
erstens muß die amorphe Schicht beim Ausheilen hinreichend gut rekristallisieren;
zweitens darf bei der Dotierungsimplantation das kristalline Substrat nicht zerstört werden.
Beide Bedingungen lassen sich z. B. für (100)-Si-Kristalle gut erfüllen, wenn für die Voramorphisierung schwere Ionen, wie Ge oder Sn, verwendet werden mit Dosiswerten, die gerade ausreichen, um die gewünschte Phasenumwandlung im Halbleiter zu erzielen (Dosiswerte unterhalb $5 \cdot 10^{14}$ Ionen/cm^2). Die zusätzlich im Halbleiter eingebrachten Ionen stellen dann keine allzu große Belastung des Materials für den Ausheilprozeß dar. Im Gegenteil, die Ge-Ionen können z. B. sogar kompensierend wirken auf die elastischen Spannungsfelder von B- oder P-Atomen in Si. Es muß weiterhin bedacht werden, daß die Steilheit der Profilausläufer davon abhängt, wie scharf der Phasenübergang am Interface ist. Zur Erhöhung des Konzentrationsgradienten bei leichten Ionen, wie z. B. für B-Ionen, ist der Profilverlauf an der Phasengrenze zwischen amorpher Deckschicht und kristallinem Substrat nach einer Voramorphisierung mit Ge- oder Sn-Ionen immer noch steiler, als das Dotierungsprofil im ungestörten Kristall. Soll aber auch mit Schwerionen eine Profilaufsteilung erreicht werden, so muß durch eine Formierung des Interface durch eine Temperung unterhalb der Rekristallisationstemperatur (etwa bis zu 400 °C maximal) der Gradient im Phasenübergang erhöht werden. Überschreitet die Dotierungsimplantation Dosiswerte von 10^{14} Ionen/cm^2, so ist die Strahlenschädigung des einkristallinen Substrats erheblich und die Phasengrenze wird dadurch verschmiert. Um diese Vorgänge zu verhindern, muß bei erhöhter Temperatur implantiert werden, etwa bei Temperaturen zwischen 100 und 300 °C. Die elektrische Aktivierung der dotierten Deckschicht kann durch epitaktische Rekristallisation erfolgen. Dazu muß der Kristall konventionell in einem Ofen bei Temperaturen zwischen 500 und 700 °C getempert oder durch einen Energieimpuls mindestens auf diese Temperaturen kurzzeitig erhitzt werden. Bei dem dabei ausgelösten Prozeß der Festphasenepitaxie werden die dotierten Fremdatome der amorphen Schicht in das restaurierte Kristallgitter eingebaut.

Ausführungsbeispiel

(100)-Si-Kristalle wurden bei Raumtemperatur mit Ge-Ionen voramorphisiert. Die Verwendung von Ge- oder Sn-Ionen empfiehlt sich, weil mit einer geringen Dosis ein hoher Amorphisierungsgrad erreicht wird. Gleichzeitig erhält man dabei einen relativ steilen Phasenübergang an der Grenze. Im Beispiel wurde die Amorphisierung durch eine 2-Stufenimplantation erzielt, um sicherzustellen, daß bei der epitaktischen Rekristallisation die Ausheilung allein vom Substrat her erfolgt und nicht auch gleichzeitig von Kristallen aus dem Oberflächenbereich. Als ein mögliches Implantationsregime hat sich die Amorphisierung mit 50 keV Ge-Ionen mit einer Dosis von $1 \cdot 10^{14}$ Ionen/cm^2 und 200 keV und $2 \cdot 10^{14}$ Ionen/cm^2 bewährt. Anschließend wurden die Kristalle ohne Zwischentemperung mit $1 \cdot 10^{15}$ B-Ionen/cm^2 bei einer Temperatur von 150 °C und einer Ionenenergie von 20 und 50 keV implantiert. Die chemischen Konzentrationsprofile der B-Ionen nach Ausheilung der Kristalle bei 650 °C in N_2Schutzgasatmosphäre zeigen die Abb. 1 und 2. Mit der Rutherford-Rückstreutechnik wurde die Dicke der amorphen Schicht zu 0,15 μm bestimmt. Aus beiden Darstellungen ist zu erkennen, daß genau in dieser Tiefe ein besonders steiler Konzentrationsgradient auftritt, wenn die Kristalle voramorphisiert wurden. Während in den benachbarten, nicht amorphisierten Kristallbereichen der Konzentrationsabfall etwa 2 Größenordnungen über einen Tiefenbereich von 0,1 μm beträgt, wird durch die Voramorphisierung ein Abfall um etwa 4 Größenordnungen erreicht.

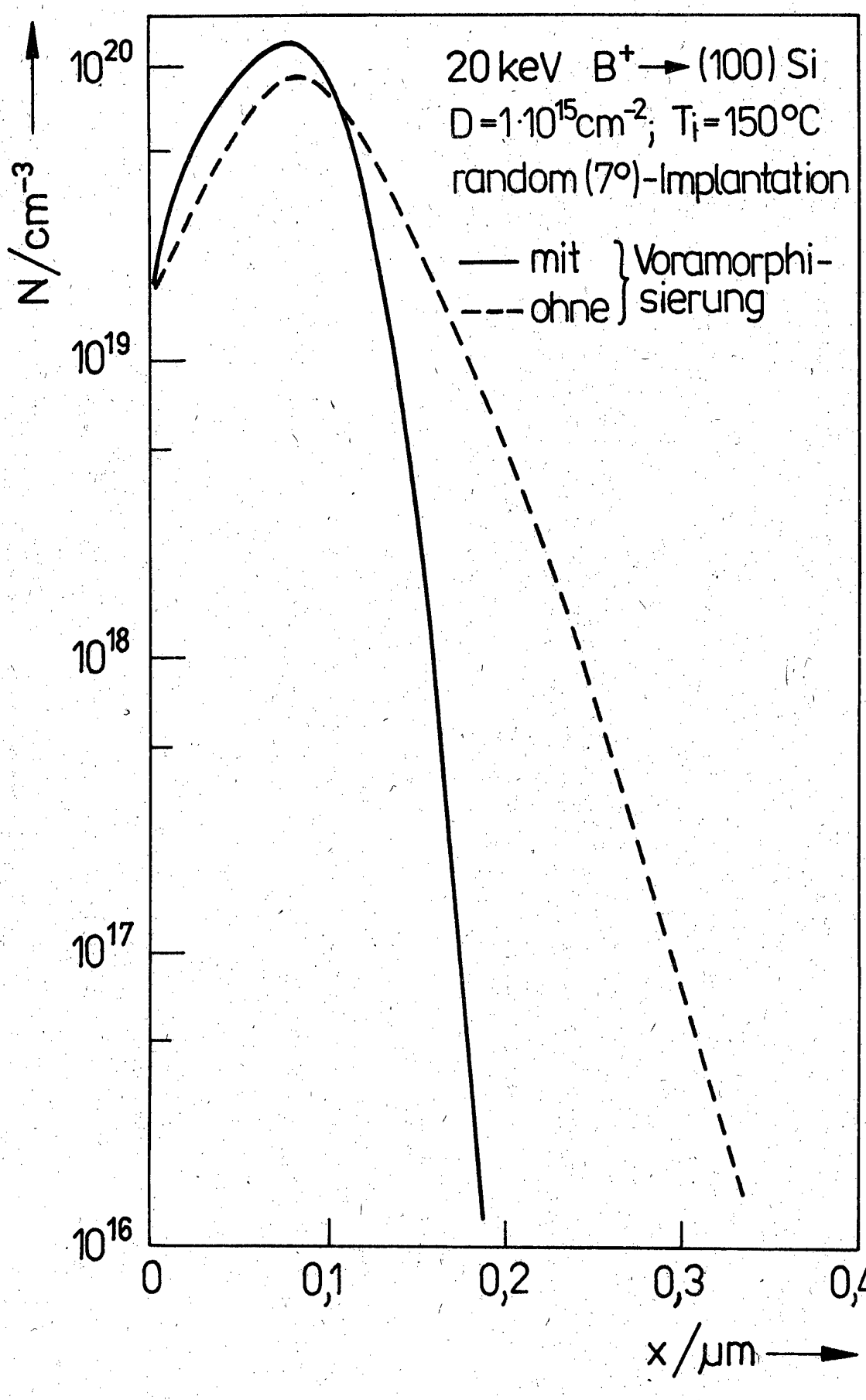

20 keV B+ → (100) Si
D = 1·10^15 cm^-2; Ti = 150 °C
random (7°)-Implantation
— mit } Voramorphi-
--- ohne } sierung
N/cm^-3
10^20
10^19
10^18
10^17
10^16
0
0,1
0,2
0,3
0,4
x/µm

Fig. 1

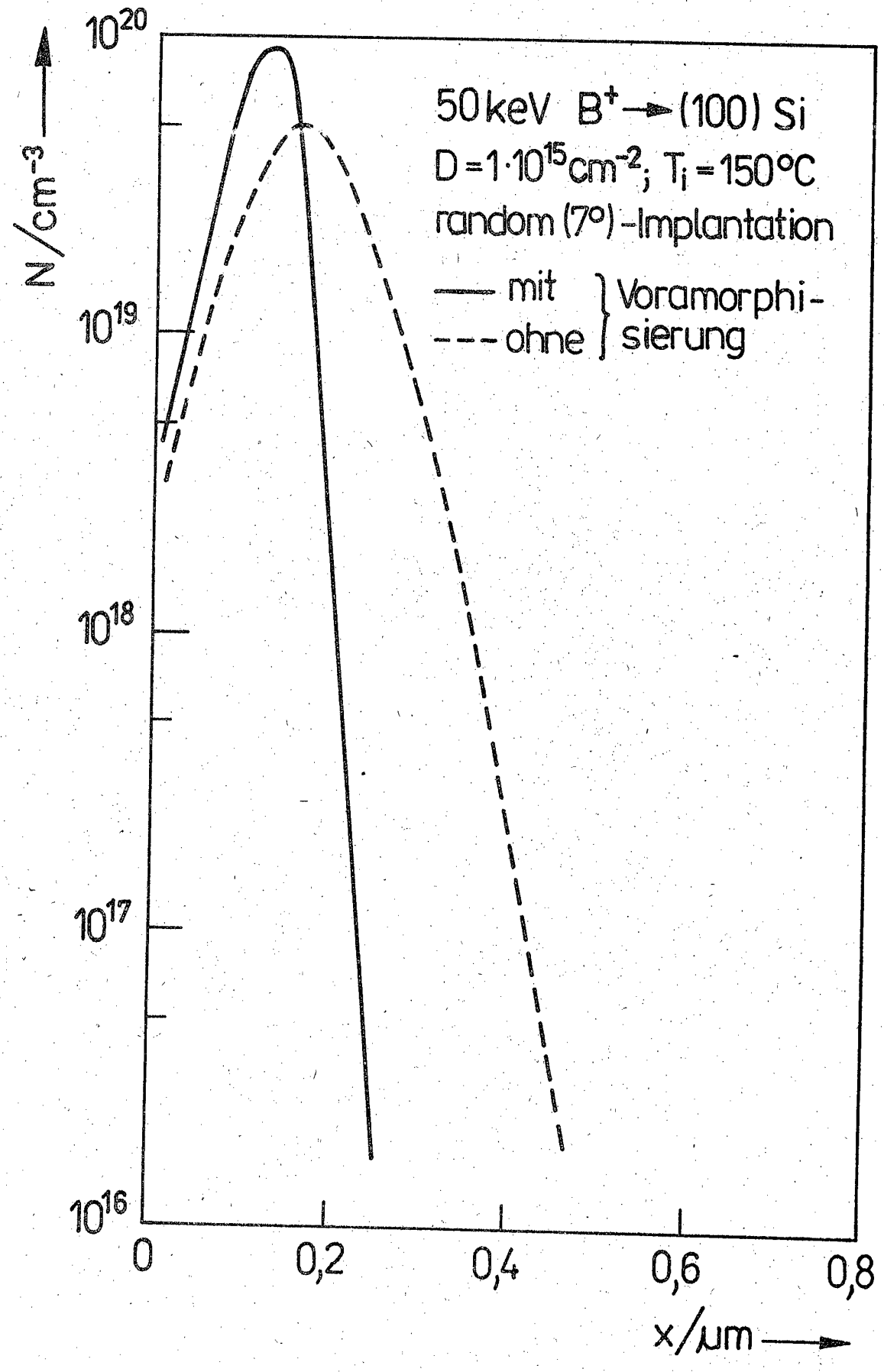

50 keV B+ → (100) Si
D = 1·10^15 cm^-2; Ti = 150°C
random (7°) - Implantation
mit
ohne
Voramorphi-sierung
N/cm^-3
10^20
10^19
10^18
10^17
10^16
0
0,2
0,4
0,6
0,8
x/µm

Fig. 2