

Erbium-dotiertes Silicium — Ausgangsmaterial für IR-Lichtquellen?

W. Jantsch, G. Hendorfer und L. Palmetshofer
Institut für Experimentalphysik, Johannes Kepler Universität,
4045 Linz-Auhof

Si:Er zeigt die auch von Er in anderen Wirtskristallen bekannte Photo-Lumineszenz bei 1.54 μm , die durch einen internen Übergang in der 4f Schale des Er zustande kommt. Diese Wellenlänge liegt nahe am Dämpfungs- und Dispersionminimum von Fasern für optische Nachrichtenübertragung und erlaubt optische Verstärkung in der Faser durch stimulierte Emission. Wir begründen das Interesse an derartigen Lichtquellen und berichten über erste Ergebnisse von Untersuchungen an Silizium, in das Er implantiert wurde.

Die derzeit jüngste, die 5. Generation von optischen Faserübertragungssystemen basiert auf der rein optische Verstärkung von Lichtsignalen innerhalb der Faser durch Erbium-Dotierung in der Faser: Erbium Atome in der Faser werden mit kurzelligem Licht ($\lambda = 0.98$ oder $1.44 \mu\text{m}$, diese beiden Wellenlängen haben ebenfalls außerordentlich geringe Dämpfung in Quarz-Fasern) in einen geeigneten angeregten, langlebigen Zustand gebracht und durch die eigentliche Trägerwelle mit $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ zu einer stimulierten Emission angeregt, die die Trägerwelle somit verstärkt. Diese Art der Verstärkung ist nicht nur einfach - man muß das Signal nicht mehr aus der Faser entnehmen und elektrisch verstärken, der Signalweg wird also durch den Verstärker nicht unterbrochen - sondern auch phasen- und polarisationserhaltend, was für die in der letzten Generation angewandten Methoden der Phasen- oder Frequenzmodulation besonders wichtig ist. Bei optimierten Systemen erreicht man derzeit Verstärkungen von 30..40 dB bei einer Pumpleistung von nur 10 mW. Mit derartigen Systemen sind Übertragungsleistungen von einigen 10^{12} bit.km möglich.

Kernpunkt dieses Verfahrens ist also die stimulierte Emission durch Erbium bei $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$. Dieser Übergang tritt innerhalb der 4f Schale von Er^{3+} auf: Erbium wird in den meisten Festkörpern im $3+$ Zustand eingebaut. In diesem Zustand besitzt die wie bei allen Lanthaniden ungefüllte 4f Schale 11 Elektronen. Der Grundzustand der 4f Schale ist ein $4I_{15/2}$ Zustand, d.h., der Bahndrehimpuls der f Elektronen beträgt $L=6$ und der Gesamtspin $S=3/2$, der Gesamtdrehimpuls ist daher $J=L+S=15/2$. Der nächste angeregte Zustand ist ein $4I_{13/2}$ Zustand, der 0.806 eV über dem Grundzustand liegt, was einer Lichtwellenlänge von $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$ entspricht. Dieser Übergang wird also für die stimulierte Emission ausgenützt.

Nun braucht man natürlich eine primäre Lichtquelle bei $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$, die die Trägerwelle erzeugt. Dafür können die heute bereits sehr weit entwickelten Quantentopf-Laser aus InGaAs und auch quarternären Legierungen verwendet werden. Der Nachteil solcher Laser besteht u.a. in der nicht allzu genau definierten Wellenlänge: für die oben beschriebenen Fasersysteme kommt nur ein recht enger Spektralbereich in Frage ($1.54\dots 1.56 \mu\text{m}$) in dem viele eng benachbarte Trägerwellenlängen untergebracht werden müssen um die Übertragungskapazität optimal zu nützen. Quantentopflaser haben relativ große Temperaturdrift und große Herstellungstoleranzen. Die komplexe Multiplexeinrichtung wäre in einem solchen System nur schwer integrierbar und kaum mit Silicium-Technik kompatibel. Eine weitere sehr attraktive Anwendung besteht in der Datenübertragung innerhalb eines

Chips und zwischen Chips durch integrierte Optik. Es gibt daher nach wie vor das dringende Bedürfnis nach Lichtquellen auf Si-Basis.

Erbium-Dotierung scheint auch hier eine Möglichkeit zu bieten: Erbium liefert in vielen Festkörpern [1-3] eben jene optischen Übergänge, die auch für die stimulierte Emission in der Faser genutzt werden und das bei fast wirtsunabhängiger Wellenlänge. Der Grund dafür liegt in der starken Lokalisierung der 4f Zustände: die Ausdehnung der Wellenfunktion ist kleiner als der Gitterabstand des Kristallgitters. Die 4f Zustände werden daher von Nachbaratomen kaum beeinflusst, merken also kaum etwas von der chemischen Bindung, etc. Der temperaturabhängige Gitterabstand, der Hauptverursacher der Temperaturdrift der Interband-Laser ist, hat hier wesentlich geringeren Einfluß.

Auch in Si findet man daher eine durch Er-Dotierung hervorgerufene Photolumineszenz (PL) bei $1.54\mu\text{m}$, die, wenn man eine geeignete Anregungsmöglichkeit realisieren kann, genau in den gewünschten Bereich fallen würde. Die Ausbeute ist allerdings nicht sehr groß, sodaß man derzeit von technisch nutzbaren Bauelementen noch weit entfernt ist. Vorteile sind jedoch bereits erkennbar: die Übergänge sind außerordentlich scharf - die Linienbreite liegt unterhalb des Auflösungsvermögens typischer PL Apparaturen. Die Wellenlänge ist eine atomare Eigenschaft und daher auch von Temperatur und Kristalleigenschaften viel schwächer abhängig als bei einem Quantentopflaser. Dazu käme die leichte Integrierbarkeit sowohl der optischen Komponenten als auch der elektronischen Steuerung derselben in einem gemeinsamen Chip.

Die Erhöhung des Wirkungsgrades der Er-Emission ist also derzeit ein zentrales Anliegen der anwendungsorientierten Forschung auf diesem Gebiet, die sich allerdings noch auf eher alchemistischem Niveau befindet. Erste Ergebnisse zeigen, daß der Wirkungsgrad in Tiegelgezogenem (CZ) wesentlich größer ist als in zonengereinigtem (FZ) Material [2,3]. Durch Koimplantation von leichten Elementen wie N, C, B, oder F kann der Wirkungsgrad um eine Größenordnung erhöht werden, P-Implantation erniedrigt den Wirkungsgrad.[2,3]

Wir haben in Linz eine Photo-Lumineszenzanlage unter Verwendung eines Fourier-Spektrometers aufgebaut und damit auch mit Erbium implantierte Si-Proben untersucht. Der Vorteil von Fourier Spektroskopie liegt hier in dem außerordentlich hohen Auflösungsvermögen ($\Delta\nu < 0.01 \text{ cm}^{-1}$), das in erster Näherung die an sich schon hohe Empfindlichkeit des Fourier Prinzips nicht beeinträchtigt. Messungen an Si:Er zeigen im Bereich von $1,53 \dots 1.54 \mu\text{m}$ außerordentlich reiche Spektren mit mehr als 50 außerordentlich scharfen Linien. Die Anwendung des Fourier-Prinzips erlaubt trotz geringer Ausbeute die Auflösung von Feinstruktur, die hier durch Kristallfeldaufspaltung, also eine geringfügige, aber hier wegen der geringen Linienbreite noch nachweisbare Wechselwirkung zustande kommt.

Lage und Muster (Intensitätsverteilung) der Spektrallinien hängen von der Präparation und dem Ausgangsmaterial ab (s. Abb.1). Offensichtlich werden verschiedene Komplexe, also Defektmoleküle im Si Wirtskristall gebildet und hochauflösende PL Spektroskopie bietet erstmals eine Möglichkeit diese verschiedenen Komplexe zu unterscheiden. Aus der Anzahl der zu einem Muster gehörigen Linien, deren Zusammengehörigkeit aus der Temperatur- und auch der Dosisabhängigkeit gefunden werden kann, kann man mit gruppentheoretischen Überlegungen auf die Symmetrie des Komplexes rückschließen. Bisher konnten wir Zentren mit kubischer Symmetrie mit nenneswertem Anteil nur in FZ-Material identifizieren und zwar an Hand der 5-fachen Aufspaltung. Dieses Spektrum, das auch in CdTe gefunden wurde, dürfte auf isoliertes, substitutionelles Erbium zurückzuführen sein. Komplexe kommen in CZ Material wesentlich häufiger vor und besitzen höhere PL-Ausbeute.



Abb.1: Photolumineszenz (Intensität vs. Wellenzahl (obere x-Skala) bzw. Wellenlänge (untere x-Skala)) von mit Erbium implantiertem CZ- (untere Kurve) und FZ-(obere Kurve) Silicium bei 5K. Für die Messung an FZ Material wurde die Verstärkung um einen Faktor 10 erhöht.

Die PL-Ausbeute wird im wesentlichen durch den Anregungsmechanismus und die Übergangswahrscheinlichkeit innerhalb der 4f Schale bestimmt. Aus der Tatsache, daß die Lage der PL-Linien durch die Nachbaratome kaum beeinflußt wird, schließen wir, daß die Übergangswahrscheinlichkeit innerhalb der 4f Schale kaum durch die Nachbarschaft beeinflußt werden sollte. Diese Annahme kann jedoch relativ einfach durch Lebensdauermessungen überprüft werden.

Die Anregungsmechanismen sind bisher kaum bekannt. Beobachtet wurde, daß für die effiziente Anregung Licht mit einer Photonenenergie oberhalb der Bandkante benötigt wird. Auch bei der Beleuchtung der Rückseite der Probe tritt die PL auf, obwohl die Eindringtiefe von sichtbarem Licht nur etwa 1 μm beträgt und daher das anregende Licht die implantierte Schicht an der anderen Probenoberfläche mit Sicherheit nicht erreicht. Diese Beobachtung legt nahe, daß die Energieübertragung vom Licht auf den Halbleiter und schließlich auf das Er-Ion durch Elektron-Loch Paare erfolgen kann. Elektron-Loch Paare können in Si, speziell bei tiefen Temperaturen, über mm-Distanzen diffundieren. Der Transfer auf das Er schließlich könnte durch Bildung eines an das Er gebundenen Exzitons erfolgen, das bei seiner Rekombination seine Energie an das Er-Ion durch Intra-4f Anregung abgibt. Aus bisher ungeklärten

Gründen scheint dieser Mechanismus für Er-Komplexe mit niedrigerer Symmetrie besser zu funktionieren als für das substitutionelle Er mit tetraedrischer Si-Umgebung. Denkbar wäre hier etwa ein resonanter Transfer- Mechanismus, bei dem der Energieübertrag dann am besten funktioniert, wenn das Exziton in seiner Energie mit einem Übergang innerhalb der 4f Schale des Er übereinstimmt.

Neben diesem Anregungsmechanismus scheint es auch den von dem Faserverstärker her bekannten der unmittelbaren, optischen Anregung innerhalb der 4f Schale zu geben, wie wir aus ersten Untersuchungen mit Hilfe von Anregungsspektroskopie wissen: wir beobachten eine resonante Erhöhung der Ausbeute bei Anregung mit $\lambda = 0.98 \mu\text{m}$, einer Wellenlänge die einem der intra-4f Anregungsprozesse entspricht.

In der Folge sind folgende Forschungsarbeiten geplant:

- Untersuchungen des Energiediagramms des isolierten Er in Si und der Einfluß von Symmetrie-erniedrigenden Fremdatomen in der Nachbarschaft
- Identifizierung von Komplexen durch Kombination von PL mit den Struktur- und Spezies-empfindlichen magnetischen Resonanzverfahren (ESR, ODMR etc.)
- Systematische Untersuchung des Zusammenhanges der Präparationsbedingungen und der gebildeten Komplexart
- Systematische Untersuchung der Anregungsmechanismen der verschiedenen Komplexarten.

Letztlich sollen die Erkenntnisse ausgenutzt werden um die Bedingungen für eine optimale Ausbeute durch Kombination von geeigneten Präparationsbedingungen und Anregungsmethoden zu ermitteln.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse wurden gemeinsam mit A. Adleff, J. Enzenhofer und H. Ruckser im Rahmen deren Diplomarbeiten und unter Mitarbeit von H. Przbylinska während eines Gastaufenthaltes in Linz gewonnen.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Ennen, J. Wagner, H. D. Müller und R. S. Smith, *J. Appl. Phys.* **61**, 4877 (1987)
- [2] J. Michel, J.L. Benton, R. F. Ferrante, D.C. Jakobson, and D. J. Eaglesham, *J. Appl. Phys.* **70**,2672 (1991)
- [3] J. Michel, L. C. Kimerling, J. L. Benton, D. J. Eaglesham, E. A. Fitzgerald, D. C. Jacobson, J. M. Poate and Y. H. Xie, *Mat. Science Forum* **83-87**, 653 (1992)