

**Thesis Title**        Implanted and Activated Carbon Distribution Profiles in Silicon:  
Ion Beam Synthesis of Silicon Carbide

**Author**                Mr. Saweat Intarasiri

**Degree**                Doctor of Philosophy in Physics

**Thesis Advisory Committee**

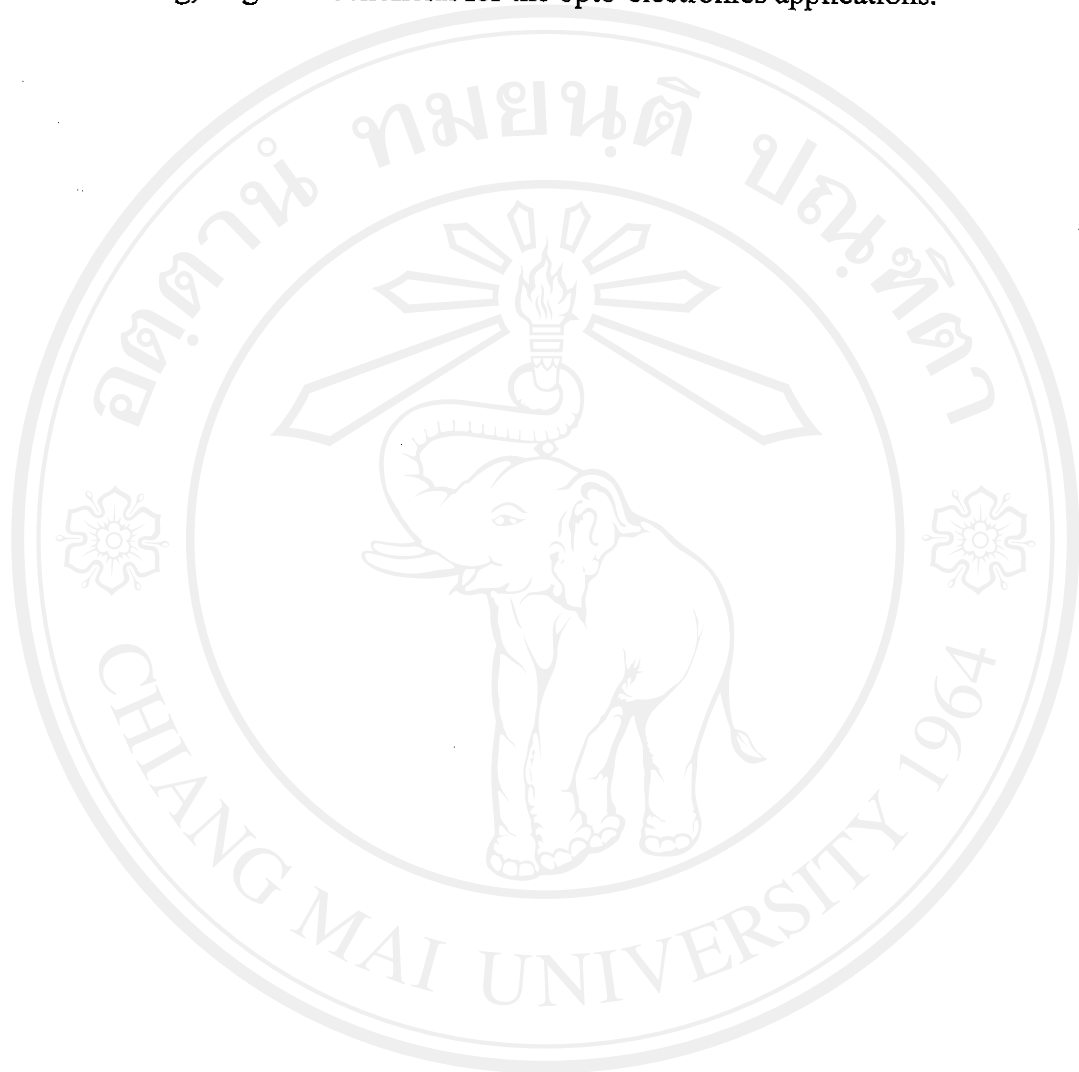
Assoc. Prof. Dr. Somsorn Singkarat	Chairperson
Prof. Dr. Göran Possnert	Member
Prof. Dr. Thiraphat Vilaithong	Member

**ABSTRACT**

On one hand, ion beam synthesis (IBS) of SiC by using high-fluence carbon ion implantation in silicon in combination with subsequent or *in situ* thermal annealing, which is well compatible with silicon device technology, has been systematically prove as a possible technique for forming nano-crystalline cubic SiC (3C-SiC) layers containing a minor amount of foreign impurities at a given depth in silicon substrate. On the other hand, the irradiation of swift heavy ion has shown to be able to alter the crystalline properties of materials. Therefore, the goal of this work is to form and modify the nano-SiC using ion beam techniques. The study focuses on an investigation of the crystalline quality of a newly born phases as well as their dependence on the implantation conditions and annealing treatments. In this study, a silicon carbide layer was synthesized by 80 or 40-keV  $^{12}\text{C}^+$  implantation of a p-type (100) Si wafer at a fluence of  $1.7 \times 10^{17}$  or  $6.5 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> at room temperature or elevated temperature. The implanted samples were subsequently crystallized by 2 techniques; namely solid phase crystallization by thermal annealing and ion beam assisted crystallization by swift heavy ion-beam annealing. The former was performed

in a vacuum furnace in the temperature range of 800 – 1100 °C, while the latter was performed by irradiation of 10 - 30 MeV  $^{127}\text{I}$ -ions to a fluence of  $10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup> at temperature ranges from 80 to 800 °C. The distribution of the implanted carbon in Si-substrate before and after the annealing treatment was investigated by time-of-flight energy elastic recoil detection analysis (ToF-E ERDA). Infrared spectroscopy and Raman scattering measurement were used to monitor the formation of SiC, and detailed information about the SiC film properties was obtained by analyzing the peak shape of the Si-C stretching absorption mode. The change in crystallinity of the synthesized layer was probed by glancing incidence X-ray diffraction measurement. Transmission electron microscopy (TEM) was also used to confirm the results and to model the crystallization process. All these measurements show results in a coherent way. (1) The ion implantation structure synthesized at room temperature is an amorphous Si-C layer embedded in Si-substrate. This amorphous structure has been transformed to crystalline phase of 3C-SiC at annealing temperature as high as 900 °C. The increasing of annealing temperature significantly improves the crystallinity of SiC, in a way that, the higher temperature the better crystallinity. (2) For the ion implantation at 400 °C, the as-implanted samples form a layered structure with a nano-crystalline 3C-SiC layer centered at the mean projected range of the implanted C-atoms distribution. Next to this layer, both above and below, are a thin amorphous Si-C structure and a defected single crystalline Si layer. Upon annealing the crystallites of the middle 3C-SiC layer increase in size, but the layer becomes somewhat thinner, while the single crystalline Si-layers above and below, grow in thickness. At the annealing temperature of 1100 °C, the amorphous Si-C layer above and below 3C-SiC are completely transformed to crystalline 3C-SiC (carbon-rich region) or defected Si (Si-rich region) depending on the carbon concentration. The crystallinity and the grain size of 3C-SiC increase upon the increasing of annealing temperature. The average grain size of 3C-SiC increases from ~6 nm for as-implanted state to ~10 nm for annealing at 1100 °C. (3) The crystallinity of the SiC layer synthesized by high-dose high temperature C-ion implantation is enhanced by the low-fluence swift heavy ion bombardment, and favored by higher energy, higher fluence and higher substrate temperature. The results are explained in terms of inelastic thermal spike of electronics deposition energy of the projectiles. The

formation of this nano-crystalline SiC embedded in the Si-substrate, whether by room or high temperature ion implantation with subsequently thermal annealing or swift heavy ion beam annealing, might be beneficial for the opto-electronics applications.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ รูปแบบการกระจายของสารเชิงคาร์บอนที่ถูกฝังและถูกกระตุ้นในซิลิกอน:  
การสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีไอออนบีม

ผู้เขียน นายเสวต อินทศิริ

ปริญญา วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. สมพร สิงขรัตน์

ประธานกรรมการ

Prof. Dr. Goran Pössnert

กรรมการ

ศ. ดร. ธีรพัฒน์ วิสัยทอง

กรรมการ

บทคัดย่อ

ด้านหนึ่ง กระบวนการสังเคราะห์วัสดุโดยใช้ลำไอออน (IBS) โดยการฝังไอออนคาร์บอนในซิลิกอน ร่วมกับการแอนนัลที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไปกันได้กับเทคโนโลยีอุปกรณ์ซิลิกอน ได้ถูกศึกษาอย่างเป็นระบบว่า สามารถสร้างชั้นที่ประกอบด้วยผลึกขนาดนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์แบบลูกบาศก์ (3C-SiC) ที่ความลึกเข้าไปในซิลิกอนใด ๆ ได้ โดยมีการเจือปนของสารอื่นในระดับต่ำ ในอีกด้านหนึ่ง การระดมยิงด้วยลำไอออนหนักพลังงานสูง สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงผลึกของวัสดุได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นในการสร้างและปรับปรุงผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดนาโนโดยการใช้นิวเคลียสไอออน การศึกษาวิจัยได้เน้นไปที่การตรวจสอบคุณภาพของผลึกที่ถูกสร้างขึ้นมา เมื่อใช้เงื่อนไขการฝังไอออนและการแอนนัลที่เงื่อนไขแตกต่างกัน ในการทดลองซิลิกอนคาร์ไบด์จะถูกสร้างโดยการฝังด้วยไอออนคาร์บอนพลังงาน 80 หรือ 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ลงในแผ่นซิลิกอนชนิดพี แบบระนาบ (100) ด้วยจำนวนโดส  $1.7 \times 10^{17}$  หรือ  $6.5 \times 10^{17}$

ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง หรือ อุณหภูมิสูง หลังจากฝังไอออน ชื้นตัวอย่างจะถูกนำไปทำให้เป็นผลึกด้วยวิธีการแตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือ การแอนนัลที่อุณหภูมิสูง และการระดมยิงด้วยลำไอออนหนักพลังงานสูง วิธีการแรก จะทำการแอนนัลชื้นตัวอย่างที่อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1000 °C ส่วนวิธีการที่สอง จะระดมยิงด้วยไอออนไอโอดีน พลังงาน 10 ถึง 30 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยจำนวนโดสประมาณ  $10^{12}$  ไอออน ต่อ ตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 80 ถึง 800 °C การกระจายของไอออนคาร์บอนในซิลิกอนก่อนและหลังการทำให้เป็นผลึกดังกล่าว ได้ถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการกระเจิงแบบย้อนกลับ (elastic recoil detection analysis) อินฟราเรด และรามานสเปกโตรสโคปี ได้ถูกนำมาใช้ตรวจสอบการเกิดของซิลิกอนคาร์ไบด์ และ คุณสมบัติของผลึกที่ถูกสร้างขึ้น อนุมานได้จากวิเคราะห์ฟลักการดูดกลืนของ Si-C การเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลึกที่ระดับความลึกต่าง ๆ ได้ตรวจวัดโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลจากการวัดได้ตรวจสอบเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคต่าง ๆ ที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า (1) การฝังไอออนที่อุณหภูมิห้อง จะทำให้ Si-C จะอยู่รวมกันเป็นโครงข่ายอสัณฐาน เรียงกันเป็นชั้นในซิลิกอน เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 °C โครงข่ายเหล่านี้ จะเปลี่ยนเป็นผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการแอนนัล จะช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของผลึก (2) สำหรับการฝังไอออนที่อุณหภูมิ 400 °C ผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดนาโน จะกระจายอยู่ในระดับความลึกที่ตำแหน่งพีคของโปรไฟล์การกระจายไอออน เหนือขึ้นไป และต่ำลงมาจากชั้นดังกล่าว Si-C จะอยู่รวมกันเป็นโครงข่ายอสัณฐานเหมือนกรณีการฝังไอออนที่อุณหภูมิห้อง หลังการแอนนัล ขนาดเกรนของซิลิกอนคาร์ไบด์จะใหญ่ขึ้น และส่วนชั้นที่เป็นซิลิกอนจะขยายเข้าไปในส่วนที่เป็นโครงข่ายอสัณฐาน ทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นเป็น 1100 °C โครงข่ายอสัณฐานจะหายไปทั้งหมด กลายเป็นผลึกซิลิกอนหรือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอนที่บริเวณดังกล่าว คุณภาพของผลึกและขนาดของเกรนของผลึก จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแอนนัล โดยเริ่มต้นที่ประมาณ 6 นาโนเมตร สำหรับชื้นตัวอย่างที่ไม่ได้แอนนัล ถึงประมาณ 10 นาโนเมตร เมื่อแอนนัลที่ 1100 °C (3) คุณภาพของผลึกจะดีขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการระดมยิงด้วยไอออนหนักพลังงานสูง โดยที่ยังพลังงานสูงขึ้น หรือ โดสสูงขึ้น หรือ อุณหภูมิชื้นตัวอย่างขณะระดมยิงสูงขึ้น จะให้ผลที่ดีกว่า ผล

การทดลองดังกล่าวนี้ ได้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีเทอร์มอลสไปด์ หนึ่ง ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดนาโนที่  
สร้างขึ้นได้จากการศึกษาวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ อาจเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ทางด้าน  
ออฟโตอิเล็กทรอนิกส์



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved