

P14-2000-105

В.С.Вариченко¹, А.Ю.Дидык, А.М.Зайцев^{1,2}, В.Ю.Явид¹,
С.Н.Якубеня¹

**РЕКОМБИНАЦИЯ
НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ
БОРА С ЭНЕРГИЕЙ 92 МэВ**

Направлено в оргкомитет конференции
«Радиационная физика твердого тела»,
Севастополь, июль 2000 г.

¹Белорусский государственный университет, Минск

²Университет Ферна, Хаген, Германия

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация сопровождается генерацией большого числа дефектов структуры, которые в значительной мере определяют электрофизические свойства материала. Среди введенных повреждений можно выделить ансамбль рекомбинационно- активных дефектов. Они, обладая высокими значениями сечений захвата электронов и дырок (или их асимметрией), обуславливают процессы рекомбинации и прилипания неравновесных носителей заряда. Рекомбинация электронно-дырочных пар описывается величиной времени жизни неравновесных носителей заряда t . Это одна из наиболее чувствительных величин к воздействию высокоэнергетичных частиц [1, 2].

Исследование рекомбинационно-активных дефектов в ионно-имплантированных полупроводниках позволяет внести вклад в решение по крайней мере двух проблем физики взаимодействия высокоэнергетических ионов с веществом: во-первых, это уточнение механизмов образования радиационных нарушений и закономерностей их отжига, а во-вторых, установление природы и параметров введенных дефектов. Определенные успехи в решении этих задач достигнуты при изучении рекомбинационных центров в Si, локализованных в пределах области залегания имплантированной примеси или в непосредственной от нее близости [3-6].

Следует отметить, что для высокоэнергетической ионной имплантации характерны высокая плотность нарушений и вытянутая их форма, что, по-видимому, имеет прямую связь с пространственным распределением энергии, выделенной при торможении частиц [7]. Естественно предположить, что эти особенности дефектообразования окажут непосредственное влияние на формирование ансамбля рекомбинационно-активных дефектов.

Цель работы - выявить основные рекомбинационно-активные дефекты, сформированные в процессе имплантации кремния ионами бора с энергией 92 МэВ и последующего отжига, изучить их свойства.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовался кремний, легированный фосфором, с удельным сопротивлением 20 и 70 Ом·см, выращенный как по методу Чохральского, так и бестигельной зонной плавкой. Величина времени жизни при комнатной температуре в Si, выращенном по методу Чохральского, была $(6,0 \pm 0,8) \times 10^{-5}$ с, а в Si, выращенном бестигельной зонной плавкой, - $(1,8 \pm 0,3) \times 10^{-4}$ с. Имплантация проводилась ионами бора с энергией 92 МэВ дозами 2×10^{13} и 1×10^{15} см⁻². Образцы имели размеры 2,3×5,0×1,5 мм.

Величина времени жизни неравновесных носителей заряда определялась методом фазового детектирования сигнала фотопроводимости [8, 9]. Возбуждение фотопроводимости в исследуемом образце осуществлялось синусоидально модулированным светом гелий-неонового лазера на длине волны 0,63 мкм. Частота модуляции светового потока устанавливалась с учетом получения минимальной погрешности в определении t [10] и изменялась в пределах 1 - 10 кГц. Сигнал фотопроводимости регистрировался с помощью измерительного СВЧ-преобразователя в трехсантиметровом диапазоне.

Для исследования зависимости t от температуры образец вместе с измерительным СВЧ-резонатором помещался в стеклянный криостат с жидким азотом. Температура образца задавалась с помощью нагревателя и контролировалась германиевым диодом.

Изохронный отжиг образцов проводился в интервале температур 570-900 К в атмосфере азота. В процессе отжига контролировалась величина электропроводности и термоЭДС.

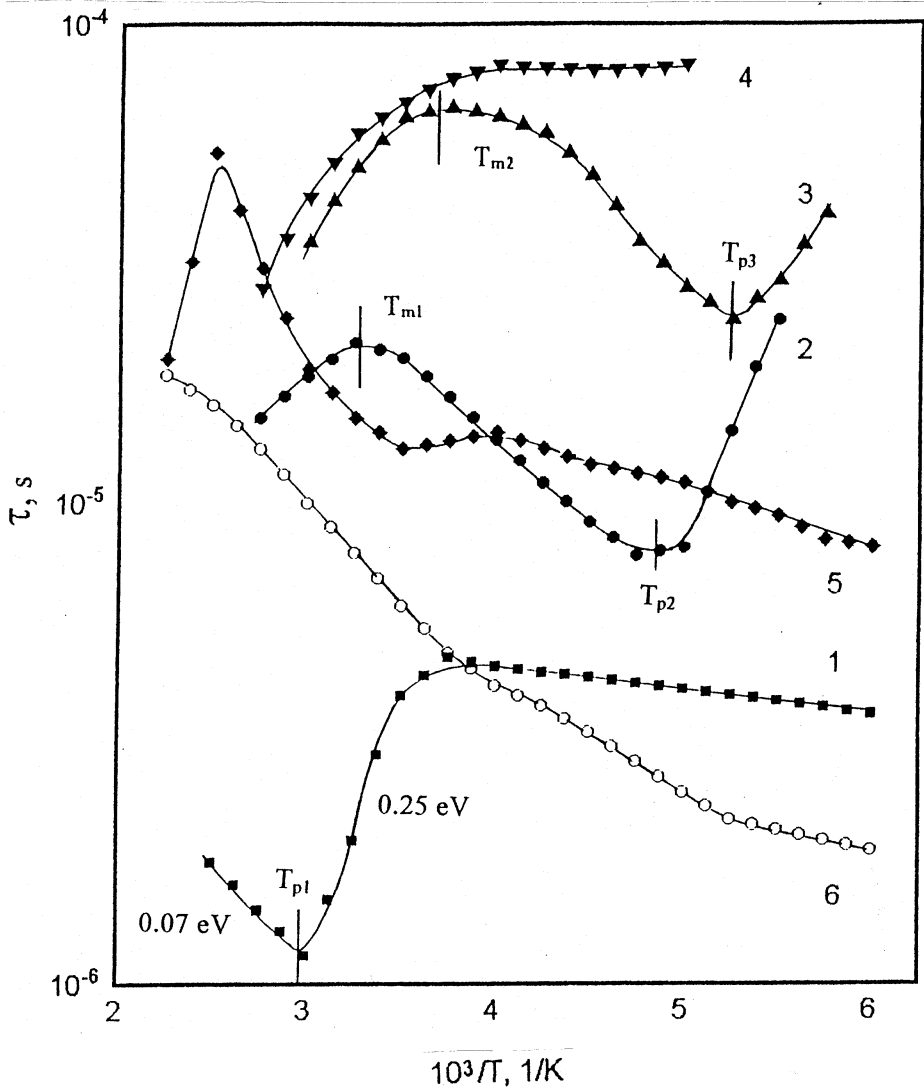
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование электропроводности, термоЭДС и сигнала фотопроводимости в кремнии после имплантации показало высокую степень дефектности области, в которой происходит торможение ионов бора. Рассчитанный с помощью программы TRIM-95 средний проективный пробег $R_p \sim 239$ мкм. Установлено, что в

процессе имплантации происходит компенсация материала, а в ряде случаев даже конверсия типа проводимости. Концентрация рекомбинационно-активных центров настолько велика, что используемым нами методом точно определить величину времени жизни не представлялось возможным ($t < 1 \times 10^{-7}$ с). Тем не менее, следует отметить высокое значение коэффициента деградации t ($K_t > 10^{-6}$ см² с⁻¹), характерное для кристаллов кремния, облученных тяжелыми частицами: нейтронов, протонов, α -частиц, ионов различных энергий [1-4]. Специфика дефектообразования при воздействии таких частиц заключается в том, что помимо точечных дефектов реализуются каскады смещений и энергетические пики, на месте которых могут формироваться протяженные дефекты и области скопления дефектов (ОСД), например, области разупорядочения.

Большая часть дефектов решетки, возникающих при внедрении ионов в кремний, отжигается в несколько стадий при температуре ~ 900 К и ниже [7, 11, 12]. На первой стадии отжига (до 570 К) происходит преимущественно диссоциация изолированных дефектов - примесно-дефектных комплексов и дивакансий. На рисунке представлены температурные зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда на различных этапах изохронного отжига. Из рисунка видно, что отжиг в течение 20 мин при 573 К привел к частичному восстановлению величины времени жизни. Зависимость $\tau = f(10^3 / T)$ приобретает вид, характерный для случая, когда процессы рекомбинации определяются двумя видами рекомбинационно-активных дефектов, один из которых является центром рекомбинации, а другой – центром прилипания неосновных носителей заряда [13]. Оценка энергетического положения уровней в запрещенной зоне по прямолинейным участкам зависимости $\ln \tau = f(10^3 / T)$ в соответствии с моделью, представленной в [13], дала следующие значения: центр рекомбинации $E_c - 0,07 \pm 0,01$ эВ, а центр прилипания $E_v + 0,25 \pm 0,02$ эВ.

Последующий отжиг в диапазоне 573-673 К (кривые 2, 3) сопровождается существенным ростом времени жизни, сдвигом точки перехода от области рекомбинации к области прилипания неосновных носителей заряда (T_{p1} , T_{p2} и T_{p3}) в



Температурные зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда τ на различных этапах изохронного отжига Si<P>, имплантированного ионами бора с энергией 92 МэВ. Доза ионов $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Температура отжига, К: 1 - 573, 2 - 648, 3 - 673, 4 - 773, 5 - 823

сторону более низких температур и появлением характерного максимума на кривой $\tau = f(10^3 / T)$ (T_{m1} , T_{m2}). Попытки объяснить наблюдаемые в процессе отжига изменения температурных зависимостей t в рамках основных моделей рекомбинации [13-15] наталкиваются на определенные трудности. Действительно, в случае полупроводника n -типа проводимости с рекомбинационным уровнем в верхней половине запрещенной зоны

$$\tau \approx \frac{1}{\gamma_p N} \left(\frac{n_0 + n_1}{n_0} \right), \quad (1)$$

где n_0 - равновесная концентрация электронов в матрице кристалла, n_1 - концентрация электронов в зоне проводимости, когда уровень Ферми совпадает с уровнем дефектов, N - концентрация центров рекомбинации, γ_p - коэффициент рекомбинации для дырок. Снижение N приводит к росту t в области температур, где доминирует рекомбинационный уровень ($T > T_{pi}$). Однако уменьшением N в процессе отжига нельзя объяснить температурный сдвиг T_{pi} и рост t в области прилипания. При температурах ниже T_{pi} τ не должно зависеть от N [13] и в пределе стремиться к величине

$$\tau = \frac{1}{n_0 \gamma_n}, \quad (2)$$

где γ_n - коэффициент рекомбинации для электронов на уровне прилипания. В свою очередь, в соответствии с (1) и (2), компенсация материала, т.е. уменьшение n_0 при отжиге, приводит к росту τ в области температур ионизации как центров рекомбинации, так и центров прилипания с одновременным сдвигом зависимости в сторону более низких температур, как это и наблюдается в эксперименте.

Однако такое объяснение находится в противоречии с результатами по измерению электропроводности: проводимость поврежденных при имплантации участков кристалла растет с температурой отжига. Разрешить данное противоречие можно, предположив, что рекомбинация и прилипание неравновесных носителей заряда проходит в основном не в матрице кристалла, а на центрах, локали-

зованных в областях скопления дефектов, проводимость которых компенсируется в процессе их отжига. Выражение (1) в этом случае можно записать в следующем виде [16]:

$$\tau \approx \frac{1}{b\gamma_p N^r} \left(\frac{n_0^r + n_1}{n_0^r} \right), \quad (3)$$

где

$$n_0^r = n_0 \exp\left(-\frac{\psi_0}{kT}\right) \quad (4)$$

- равновесная концентрация электронов внутри области разупорядочения, ψ_0 - равновесная высота потенциального барьера на границе области и матрицы, N^r - концентрация центров рекомбинации внутри ОСД, b - относительная доля объема, занимаемая ОСД.

Точная идентификация центров рекомбинации и прилипания, локализованных в ОСД, в настоящее время не представляется возможной. Тем не менее следует отметить, что вид зависимостей $\tau = f(10^3 / T)$ и численные значения τ одинаковы как для кремния, выращенного по методу Чохральского, так и для кремния, полученного зонной плавкой. Это указывает на то, что образование данных центров и их состав не связаны с основной технологической примесью в кремнии - кислородом. Если учесть, что основные радиационные дефекты, из которых строятся ОСД, в частности, области разупорядочения - дивакансии [7], в основном ликвидированы отжигом свыше 573 К ($T_{отж}$ дивакансии 550 К), можно предположить, что рекомбинационные центры, скорее всего, связаны с термически устойчивыми многовакансионными комплексами. При определении положения уровней рекомбинационно-активных центров в запрещенной зоне по энергии активации прямолинейных участков на зависимостях $\ln \tau = f(10^3 / T)$ следует учитывать величину потенциального барьера ψ_0 . Обычно, в кремнии и германии, величина ψ_0 лежит в диапазоне энергий 0,05 ÷ 0,11 эВ [16-19]. Следовательно, в соответствии с (3) и (4) уровень рекомбинационного центра расположен у $E_c - (0,12 \div 0,18)$ эВ.

Концентрацию равновесных электронов n_0^r в области разупорядочения можно оценить по температуре максимумов T_{m1} и T_{m2} на зависимостях $\tau = f(10^3 / T)$ (кривые 2 и 3), соответствующей переходу к собственной проводимости [14, 15]. Она оказалась равной $1,9 \times 10^{10}$ и $7,2 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ для материалов, отожженных соответственно при 648 и 673 К. Это означает, что образовавшиеся в процессе высокоэнергетической ионной имплантации и последующего отжига области скопления дефектов являются сильно компенсированными включениями.

Последующий отжиг t при более высоких температурах (кривые 5 и 6) однозначно свидетельствует о смене механизма рекомбинации неравновесных носителей заряда и связан с развалом ОСД. Следует отметить, что отжиг вплоть до 898 К не приводил к полному восстановлению величины времени жизни. Это связано, по-видимому, с присутствием в кристалле более устойчивых дефектных образований типа краевых дислокаций и дислокационных петель [7, 11].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в результате имплантации в кремний ионов бора с энергией 92 МэВ и последующего отжига формируются сильно компенсированные области скопления дефектов, в состав которых входят центры, определяющие процессы рекомбинации и прилипания неравновесных носителей заряда. Можно предположить, что доминирующие центры рекомбинации связаны с многовакансионными комплексами и вносят в запрещенную зону кремния энергетические уровни $E_c - (0,12 \div 0,18) \text{ эВ}$.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке фонда INTAS, проект № 94-1982.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вопросы радиационной технологии полупроводников. Новосибирск: Наука, 1980.
2. Р.Ф. Коноплева, В.Н. Остроумов. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. М.: Атомиздат, 1975.
3. A. Mogro-Campero and R.P. Love. Mat. Res. Soc. Simp. Proc. 27. Ion Implantation and Ion Beam Processing of Materials, 1984, p. 534.
4. F.E. Doany, D.Grischkowsky, C.-C. Chi. Appl. Phys. Lett., 1987, v.50, №8, p.460.
5. J. Hlavka, Ya.V. Fattachov, R.M. Bayazitov, I.B. Khaibullin, E.I. Styrkov. Kernforsch. Rossendorf. Dresden, Part 1, 1985, p.179.
6. W.R. Fahrner, J.R. Laschinski, D. Braeunig, M. Knoll, A. Neidig. Phys. Stat. Sol.(A), 1985, v.89, №1, p.347.
7. Ф.Ф. Комаров. А.П. Новиков, В.С.Соловьев, С.Ю. Ширияев. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. Минск: изд-во Университетское, 1990.
8. С.В. Богданов, В.Д. Копыловский. ФТТ, 1961, т.3, с.926.
9. М.И. Тарасик, С.Н. Якубеня, А.М. Янченко. Электронная техника, серия "Материалы", 1985, вып. 8, с.48.
10. S.N. Jakubnja. Phys. Stat. Sol.(A), 1996, v.154, p.707.
11. Легирование полупроводников методом ядерных реакций (под ред. Л.С. Смирнова), Новосибирск: Наука, 1981.
12. Дж. Мейер, Л.Эрикссон, Дж. Дэвис. Ионное легирование полупроводников. М.: Мир, 1973.
13. B.G. Streetman. J. Appl. Phys., 1966, v.37, №8, p.3137.
14. W. Shockley, W.T. Read. Phys. Rev., 1952, v.87, №5, p.835.
15. R.H. Hall. Phys. Rev., 1952, v.87, №5, p.387.
16. Ю.М.Покотило, В.Д. Ткачев, В.И.Уренев, В.Ю. Явид. ФТП, 1979, т.13, с.1775.
17. Ю.М. Покотило, В.Ю. Явид. ФТП, 1985, т.19, № 6, с.993.
18. Л.И. Мурын, Ю.М. Покотило, В.Ю.Явид. ФТП, 1984, т.18, №11, с.2066.
19. O.L. Curtis e.a. IEEE Trans. Nucl. Sci., v. NS-14, 1969, №6, p.68.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 мая 2000 года.

Вариченко В.С. и др.

P14-2000-105

Рекомбинация неравновесных носителей заряда в кремнии,
имплантированном ионами бора с энергией 92 МэВ

Исследованы температурные зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда t в имплантированных ионами бора с энергией 92 МэВ слоях кремния n -типа. Установлено, что величину t определяют рекомбинационные центры, локализованные в сильно компенсированных областях скопления дефектов, образованных в процессе имплантации и последующего отжига. Показано, что доминирующие центры рекомбинации связаны с многовакансионными комплексами и вносят в запрещенную зону кремния энергетические уровни $E_c - (0,12 \div 0,18)$ эВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Varichenko V.S. et al.

P14-2000-105

Recombination of Nonequilibrium Charge Carriers
in Silicon Irradiated with 92 MeV Boron Ions

Temperature changes versus lifetime of nonequilibrium charge carriers t in n -type silicon layers implanted with 92 MeV boron ions have been investigated. It was established that t is determined by recombination centres localized in strongly compensated regions of accumulated defects produced during the implantation process and subsequent annealing. It was shown that dominant recombination centres are concerned with multivacancy complexes and produce energy levels $E_c - (0.12 \div 0.18)$ eV in a silicon band gap.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.В.Калинникова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 13.06.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,99

Тираж 290. Заказ 52072. Цена 1 р. 19 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области