

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА ИМПЛАНТИРОВАННОГО ХЛОРОМ КРЕМНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Омельяновская Н. М., Краснобаев Л. Я.

Исследовано влияние температуры отжига на электрофизические свойства *n*- и *p*-типа кремния, имплантированного хлором с энергией 200 кэВ и дозами $1 \cdot 10^{13}$ и $1 \cdot 10^{15}$ см⁻². Измерения профиля распределения носителей заряда и слоевого сопротивления структур после отжига при $T = 350\text{--}1000^\circ\text{C}$ показали, что хлор образует с радиационными дефектами электрически активные комплексы, которые в зависимости от температуры обработки могут быть как донорного, так и акцепторного типа.

Большое количество технологических процессов микроэлектроники сопровождается взаимодействием хлора и хлоросодержащих соединений с монокристаллическим кремнием: газовое и плазмохимическое травление, эпитаксия, «хлорное» окисление, формирование *p*—*n*-переходов имплантацией молекулярных ионов хлоридов. Эти процессы сопровождаются внедрением атомов хлора в приповерхностную область монокристалла. В этой связи возникает вопрос о влиянии Cl на электрофизические свойства кремния. В [1] показано, что ионная имплантация Cl в кремний *p*-типа приводит к образованию *p*—*n*-перехода. Процесс активации атомов В в слоях, последовательно имплантированных ионами Cl⁺ и В⁺ либо ионами ВCl⁺, имеет характер, отличный от активации В в слоях, имплантированных только ионами В⁺ [2-4].

Цель нашей работы состояла в исследовании влияния температуры отжига на электрофизические свойства кремния, имплантированного хлором.

В работе использовались кремниевые пластины, выращенные по методу Чохральского, с ориентацией поверхности (100) *n*-типа проводимости, легированные фосфором с концентрацией $1 \cdot 10^{15}$ см⁻³, и *p*-типа, легированные бромом с концентрацией $1.8 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Ионная имплантация проводилась на установке «HVEE-500». Ионы Cl⁺ имплантировались с энергией 200 кэВ дозами $1 \cdot 10^{13}$ и $1 \cdot 10^{15}$ см⁻², причем последняя превышает дозу аморфизации кремния. После имплантации образцы изохронно отжигались в печи в атмосфере аргона в течение 30 мин.

Измерение слоевого сопротивления проводилось на четырехзондовой установке FPP-100 «Veeco». Профили распределения носителей в кристаллах, имплантированных ионами Cl⁺ с дозой $1 \cdot 10^{13}$ см⁻², определялись из *C*—*V*-характеристик барьеров Шоттки, которые формировались вакуумным напылением Au на структуры *n*-типа и напылением Al на структуры *p*-типа проводимости.

Чтобы убедиться в том, что наблюдавшиеся нами изменения концентрации носителей связаны непосредственно с имплантацией Cl, исходные пластины кремния отжигались в тех же условиях, что и имплантированные ионами Cl⁺.

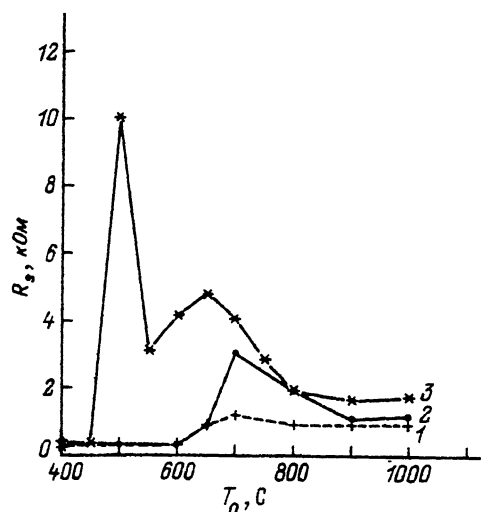


Рис. 1. Зависимость R_s для образцов кремния p -типа ($N = 1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) от температуры изохронного отжига.

1 — неимплантированный образец, имплантированные ионами Cl^+ с энергией 200 кэВ и дозами, см^{-2} : 2 — 10^{15} , 3 — 10^{15} .

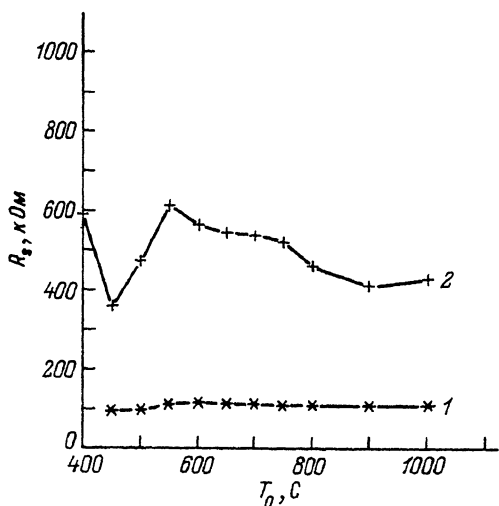


Рис. 2. Зависимость R_s для образцов кремния n -типа ($N = 1.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) от температуры изохронного отжига.

1 — неимплантированный образец; 2 — образец, имплантированный ионами Cl^+ с энергией 200 кэВ и дозой $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 1, 2 представлены зависимости изменения слоевого сопротивления имплантированных и неимплантированных ионами Cl^+ структур n - и p -типа, последовательно с шагом 50°C подвергавшихся термообработке в диапазоне температур от 350 до 1000°C .

Как видно из кривых 1 рис. 1, 2, сопротивление неимплантированных кристаллов под воздействием термообработок меняется незначительно и качественно отличается от характера изменения сопротивления образцов, имплантированных ионами Cl^+ . $C-V$ -измерения показали, что термообработки во всем исследовавшемся диапазоне температур не приводят к изменению профиля распределения носителей в неимплантированных образцах.

Увеличение сопротивления структуры p -типа, имплантированной дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ после отжига при $T = 500^\circ\text{C}$ (рис. 1, кривая 3), свидетельствует об образовании $p-n$ -перехода. Последующий ход кривой в диапазоне температур $550-650^\circ\text{C}$ носит характер обратного отжига. Дальнейший отжиг при более высоких температурах приводит к уменьшению и стабилизации сопротивления структуры. Зависимость $R_s(T)$ для образца с дозой имплантации $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ носит сходный характер (рис. 1, кривая 2). Однако эта кривая сдвинута в область более высоких температур, что объясняется, по-видимому, меньшей концентрацией Cl в имплантированной области, а также отсутствием процессов аморфизации и рекристаллизации в приповерхностном слое, которые имеют место при дозе имплантации $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Слоевое сопротивление имплантированных Cl кристаллов n -типа (рис. 2, кривая 2) при отжиге изменяется незначительно и свидетельствует об отсутствии $p-n$ -перехода.

Профили распределения носителей в образцах после отжига при $T = 650-1000^\circ\text{C}$ приведены на рис. 3 для кристаллов n -типа проводимости и на рис. 4 для кристаллов p -типа.

Для интерпретации полученных результатов, по-видимому, надо предположить, что во время отжига имплантированный в кремний Cl^+ способен образовывать электрически активные комплексы с дефектами, индуцирован-

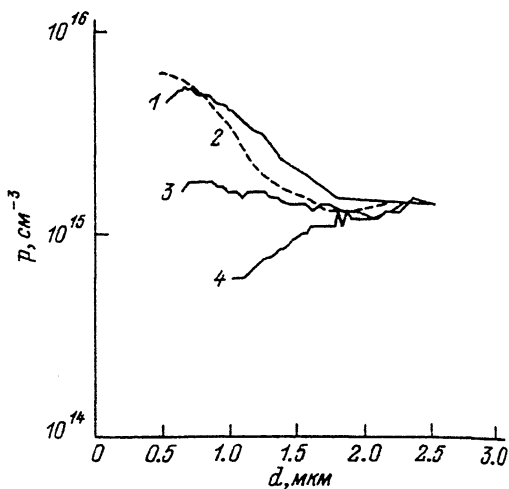
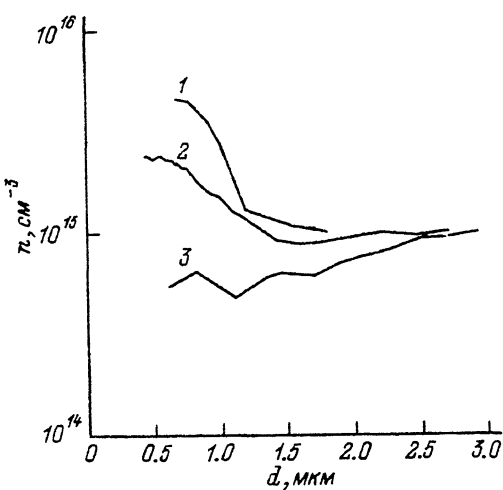


Рис. 3. Профили носителей заряда в кремнии n -типа, имплантированном ионами Cl^+ с энергией $2\text{K}\text{K}$ кэВ и дозой 1K^{13} см^{-2} для различных температур изохронного отжига.

T , °C: 1 — 1000, 2 — 650, 3 — 800; n — концентрация носителей, d — глубина.

Рис. 4. Профили носителей заряда в кремнии p -типа, имплантированном ионами Cl^+ с энергией $2\text{K}\text{K}$ кэВ и дозой 1K^{13} см^{-2} для различных температур изохронного отжига.

T , °C: 1 — 900, 2 — 800, 3 — 700, 4 — 1000; p — концентрация носителей, d — глубина.

ными ионной имплантацией. На то, что образование дополнительных носителей заряда обусловлено ионизацией комплексов, включающих в себя атомы Cl , указывает профиль распределения этих носителей, который коррелирован с распределением атомов Cl : в ряде случаев носители заряда имеют гауссово и близкое к нему распределение (рис. 3, 4), подобное гауссову распределению имплантированного Cl .

При изменении температуры отжига происходит трансформация спектра вторичных радиационных дефектов. Их взаимодействие с атомами Cl сопровождается изменением типа комплексов Cl —радиационный дефект, которые могут быть как донорного, так и акцепторного типа. Это в свою очередь приводит к изменению профиля распределения дополнительных носителей заряда в полупроводнике. Измеренная концентрация носителей заряда в имплантированном слое ($\sim 1 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{12}$ см^{-2}) не соответствует дозе имплантации Cl ($1 \cdot 10^{13}$ см^{-2}). Как известно [2], при $T > 700$ °C атомы Cl приобретают тенденцию диффундировать к поверхности кристалла и покидать его. В связи с этим в кристалле уменьшается интегральная концентрация Cl , что в свою очередь также может сказываться на процессах образования и трансформации хлоросодержащих комплексов.

Из результатов работы следует, что при формировании p — n -переходов имплантацией молекулярных ионов BCl^+ , PCl^+ и т. п. необходимо учитывать, что профиль носителей заряда и соответственно глубина p — n -перехода определяются не только распределением легирующей примеси, но и распределением электрически активных хлоросодержащих комплексов в имплантированной области, которое определяется режимами термообработки.

Авторы выражают признательность В. Н. Мордковичу за проявленный интерес к работе и обсуждение ее результатов, В. А. Данилову и Д. К. Старостину за содействие в осуществлении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Meyer O. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1968. V. 15. P. 232—238.
- [2] David G. Beanland // Sol. St. Electron. 1978. V. 21. P. 537—547.
- [3] Fuse G., Hirao T., Inoue K., Takayanagi S., Yaegashi Y. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 5. P. 3650—3653.
- [4] Delfino M., Lunnon M. E. // J. Electrochem. Soc. 1985. V. 132. N 2. P. 435—440.

Институт проблем технологии микроэлектроники
особочистых материалов
РАН
Черноголовка

Получена 12.11.1991.
Принята к печати 13.02.1992

