

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБРАБОТКАХ

Н. А. КАЛЬНЕВ, И. Н. МАГДЕН

Приводятся результаты исследования термостабильности электрофизических параметров высокоомного ( $\rho = 125\text{--}400$  ом см) монокристаллического кремния большого диаметра (60 мм), выращенного методом бестигельной зонной плавки. Проведенные исследования показывают, что монокристаллический кремний большого диаметра имеет высокую неоднородность в распределении удельного сопротивления и низкую термостабильность при воздействии высоких температур.

Высокотемпературная обработка монокристаллического кремния приводит к существенному изменению его электрофизических параметров. При этом, как отмечается в работах [1—3], посвященных исследованию кремния малого диаметра (до 30 мм), наиболее значительно, по сравнению с другими параметрами, изменяется величина исходного удельного сопротивления. Объяснение этого явления распадом кислородосодержащих комплексов [4, 5] в большей мере относится к кремнию, выращенному по методу Чохральского. Но для кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки, это объяснение не совсем правомерно, поскольку такой кремний содержит на 3—4 порядка меньше атомов кислорода, чем материал, полученный по методу Чохральского, но при этом изменение его удельного сопротивления, и особенно для высокоомного, происходит более резко.

Ранее [6] были опубликованы результаты исследования электрофизических параметров монокристаллического кремния малого диаметра, где посредством разделения удельного сопротивления на его составляющие—подвижность и концентрацию основных носителей заряда—предложен возможный механизм, объясняющий нестабильность кремния при термообработках. Несколько иная картина наблюдается в поведении нашедшего в последнее время широкое применение, особенно в силовой полупроводниковой технике, монокристаллического кремния большого диаметра (50 мм и выше). Это, по-видимому, вызвано рядом специфических особенностей технологического процесса его выращивания. И, естественно, исследование характера распределения исходных электрофизических параметров, а также поведения кремния большого диаметра при высоких температурах, представляет значительный интерес.

### Предмет и методика исследования

Исследовался монокристаллический кремний диаметром 60 мм, выращенный бестигельной зонной плавкой, с ориентацией (111) и удельным сопротивлением 125—400 ом см. Из слитка вырезались кремниевые плас-

тины толщиной 1,5—0,5 мм, на которых измерялись распределения удельного сопротивления и микротвердости. Распределение микротвердости определялось на приборе типа ПМТ-3 по отпечатку алмазной пирамидки с нагрузкой 50 г. Помимо этого из кремниевых пластин вырезались квадратные пластинки с размерами  $10 \times 10 \times 0,5$  мм<sup>3</sup> и на них определялась концентрация и подвижность основных носителей заряда. Для выявления присутствия электрически неактивных примесей дополнительно снимались спектры поглощения на спектрофотометре UR—20.

При термообработке образцы в кварцевых стаканчиках помещались в печь, предварительно нагретую до заданной температуры, а охлаждались вместе с печью со скоростью 2—3 град/мин. Отжиг производился в течение 5 часов в интервале температур 900—1300°C.

### Результаты эксперимента

Как видно из рис. 1, исходное распределение удельного сопротивления по площади кремниевой пластины характеризуется резкой неоднородностью у края пластины и незначительными флуктуациями  $\rho$  в центральной

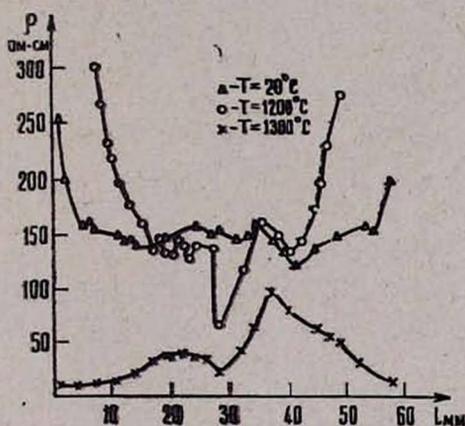


Рис. 1. Распределение удельного сопротивления по диаметру кремниевой пластины в зависимости от температуры обработки.

ной части. При этом средние значения концентрации примеси и холловской подвижности носителей заряда в исходном образце составили соответственно  $N=2,5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и  $\mu=1290$  см<sup>2</sup>/в сек (рис. 2).

После термообработки при  $T=900^\circ\text{C}$  и  $T=1000^\circ\text{C}$  отмечалось значительное увеличение удельного сопротивления у края пластины, в то время, как в центральной части образца изменения  $\rho$  почти не наблюдалось (рис. 3). При этом концентрация основных носителей заряда при  $T=900^\circ\text{C}$  не изменялась по сравнению с исходной, а при  $T=1000^\circ\text{C}$  — возрастала до  $N=3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Величина подвижности носителей заряда при этих температурах снижалась соответственно до 1060 см<sup>2</sup>/в сек и 850 см<sup>2</sup>/в сек. При  $T=1100^\circ\text{C}$  распределение удельного сопротивления напоминает двугор-

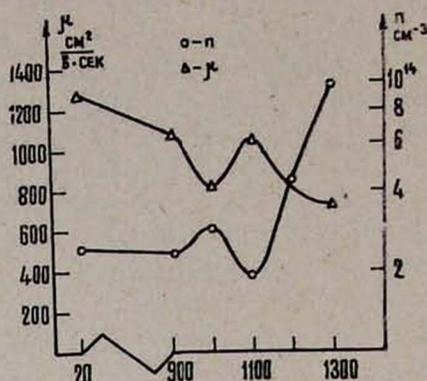


Рис. 2. Зависимость концентрации примеси и подвижности носителей заряда от температуры отжига.

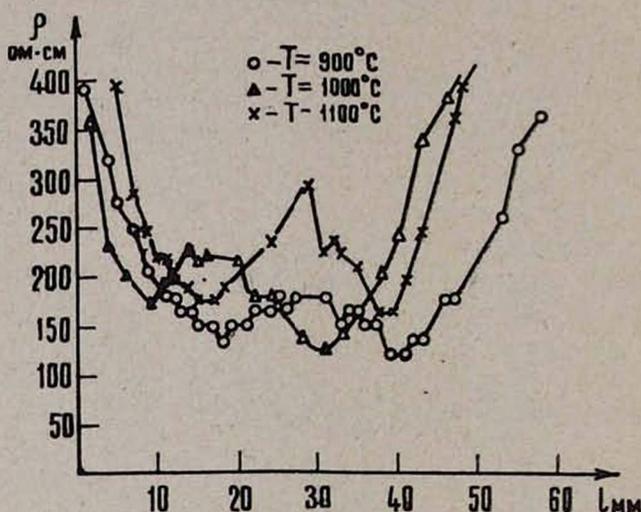


Рис. 3. Распределение удельного сопротивления по диаметру кремниевой пластины в зависимости от температуры обработки ( $T=900, 1000$  и  $1100^\circ\text{C}$ ).

бую кривую с  $N=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu=1050 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ . При  $T=1200^\circ\text{C}$  начинают появляться локальные участки заниженного удельного сопротивления, площадь и количество которых с возрастанием температуры увеличиваются, и уже при  $T=1300^\circ\text{C}$  оно падает до нескольких десятков ом см. Изменение механических свойств можно охарактеризовать при помощи измерения микротвердости. Так, микротвердость до термообработки равнялась  $960 \text{ кг/мм}^2$ , а после воздействия температуры при  $T=1000$  и  $1300^\circ\text{C}$  составила соответственно  $1050 \text{ кг/мм}^2$  и  $1220 \text{ кг/мм}^2$ .

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования показывают, что монокристаллический кремний большого диаметра имеет высокую неоднородность в распределении удельного сопротивления и низкую термостабильность при воздей-

ствии высоких температур. Это в какой-то мере затрудняет получение из него качественных диффузионных электронно-дырочных переходов, снижает напряжение пробоя и увеличивает вероятность локализации микроплазм в участках с минимальным  $\rho$ .

Причина такой низкой термостабильности определяется внутренними процессами, происходящими в монокристалле кремния. Такое предположение подтверждается наличием нескольких экстремальных точек на кривых зависимости концентрации примеси и подвижности носителей заряда от температуры отжига. Если оценить общую закономерность изменения величины подвижности носителей заряда, то можно отметить, что после термообработки она уменьшается почти вдвое, при этом имеются два участка, различных по механизму изменения подвижности. Первый участок охватывает интервал температур от исходной до  $950^\circ\text{C}$  и характеризуется постоянством концентрации примеси в кремниевом образце с изменением подвижности. При этом наблюдаемое уменьшение подвижности, по-видимому, связано с механическими напряжениями, возникшими в материале, и образованием центров рассеяния в виде нуль-мерных дефектов, не вносящих вклад в величину электропроводности. В пользу этого предположения также свидетельствует увеличение микротвердости образцов при данной температуре (рис. 4). Следует отметить, что увеличение микротвер-

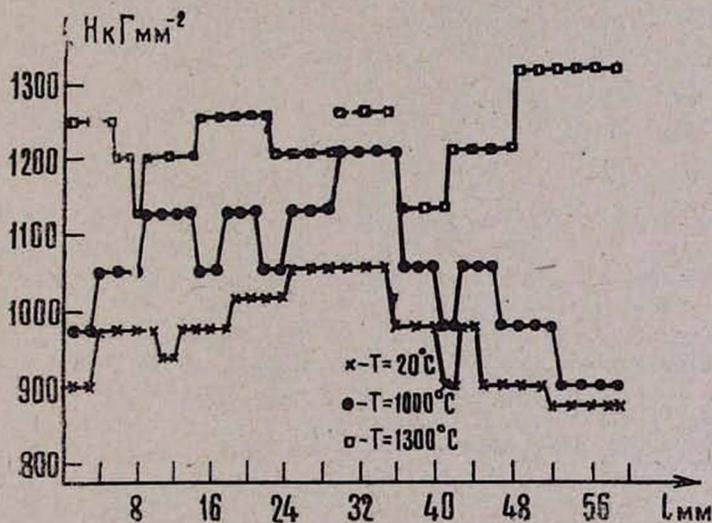


Рис. 4. Распределение микротвердости по диаметру кремниевой пластины в зависимости от температуры обработки.

дости кремния при термообработке, довольно характерное для материала большого диаметра, является одним из существенных его недостатков.

Второй участок— $950^\circ\text{—}1300^\circ\text{C}$ —характеризуется очень четкой обратной связью между концентрацией примеси и подвижностью носителей заряда, т. е. при данной температуре обработки рассеяние носителей заряда происходит, в основном, на примесных центрах—как термодонорах, возникающих в кремнии при температурах  $950\text{—}1000^\circ\text{C}$  и  $1100\text{—}1300^\circ\text{C}$ , так и

термоакцепторах, образовавшихся при температуре 1000—1100°C. Такие превращения в материале при воздействии определенной температуры подтверждаются характером изменения концентрации примеси (при этом для кремния как большого, так и малого диаметра наблюдается общая тенденция к возрастанию концентрации примеси при температурах выше 1200—1250°C) и характером микротвердости образцов. При этом наблюдаемое увеличение микротвердости при возрастании температуры отжига можно объяснить разупрочняющим действием электронов проводимости, поскольку при увеличении концентрации свободных носителей увеличиваются упругие напряжения кристаллической решетки за счет внедрения в нее примесных атомов. Такими примесями могут быть атомы кислорода, углерода или их комплексы. Именно на них, в основном, и ссылаются многие авторы, но утверждать определенно о влиянии этих примесей на термостабильность данного бестигельного кремния нельзя, поскольку их концентрация ниже предела чувствительности спектрофотометра.

Тем не менее, проведенные комплексные исследования позволяют сделать определенный вывод, что высокая неоднородность в распределении электрофизических параметров и их низкая термостабильность затрудняют изготовление из монокристаллического кремния большого диаметра качественных диффузионных электронно-дырочных переходов.

В заключение авторы пользуются случаем поблагодарить проф. А. Е. Глаубермана за внимание к работе.

Одесский государственный  
университет

Поступила 30.IX.1973

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С. Fuller, R. Logan. J. Appl. Phys., 28, 1427 (1957).
2. Ю. А. Евсеев, В. Л. Зелинский, И. Н. Магден, В. Е. Челноков. Материалы IV Всесоюзного совещания по физическим явлениям в *n-p*-переходах в полупроводниках, Одесса, 1970, стр. 18.
3. Л. Г. Гускина, Ю. В. Данковский, Г. А. Доброхотов, Л. П. Степанова, Э. С. Фальевич. Сб. Кремний и германий, Металлургия, 1969, вып. 2, стр. 38.
4. Ю. П. Коваль, В. Н. Мордкович, Э. М. Темпер. ФТП, 5, 1227 (1971).
5. В. Н. Мордкович. ФТТ, 6, 847 (1964).
6. И. Н. Магден, Н. А. Кальнев. Сб. Преобразовательная техника, 1973.

ՄՈՆՈՔՅՈՒՐԵՂԱՅԻՆ ԿՐԵՄՆԻՒՄԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ԲԱՐՁՐԱՍՏԻՃԱՆ ՄՇԱԿՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ն. Ա. ԿԱԼՆԵՎ, Ի. Ն. ՄԱԳԴԵՆ

Բերվում են ոչ-տիգելային զոնային հալեցման մեթոդով անցրած մեծ տրամագիծ ունեցող (60 մմ) բարձրորակ (ρ = 125—400 օմ սմ) մոնոքրյուրեղային կրեմնիումի էլեկտրաֆիզիկական պարամետրերի չերմաստարիլության հետազոտման արդյունքները: Ցույց է տրված, որ մեծ տրամագիծի մոնոքրյուրեղային կրեմնիումը բարձր չերմությունների ազդեցության տակ ցուցաբերում է ցածր չերմաստարիլություն և միավոր դիմադրության բաշխման բարձր անհամասեռություն:

## INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF MONOCRYSTAL SILICON OF HIGH-TEMPERATURE WORKING

N. A. KALNEV, I. N. MAGDEN

The thermal stability of electrophysical parameters of high resistance monocrystal silicon of 60 mm in diameter was investigated. It was shown that the zone melted large diameter monocrystal silicon exhibited under high temperature both the heterogeneity in the resistivity distribution and the ion thermal stability.