

## КЛАССИФИКАЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРИМЕСНЫХ СКОПЛЕНИЙ В КРЕМНИИ, ВЫРАЩЕННОМ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО И ЛЕГИРОВАННОМ БОРОМ

О. В. Астафьев, А. Н. Бузыкин, А. И. Бувальцев, Д. И. Мурин,  
В. П. Калинушкин, М. Г. Плоппа

Институт общей физики Российской академии наук, 117942, Москва, Россия  
(Получена 10 июня 1993 г. Принята к печати 8 июля 1993 г.)

Методами малоуглового рассеяния света (МУРС) и EBIG (в режиме наведенного тока) исследованы монокристаллы кремния, выращенные методом Чохральского. Обнаруженные крупномасштабные электрически активные примесные скопления в этом материале имеют отличные от хорошо известных примесных облаков в БЗП-кремнии природу и механизм образования. Проведена классификация скоплений в кремнии, выращенном методом Чохральского, проанализированы точечные центры, их образующие. Предлагается модель образования скоплений.

### 1. Введение

В [1] сообщалось об обнаружении с помощью метода малоуглового рассеяния света (МУРС) в Si, выращенном методом Чохральского, крупномасштабных примесных скоплений (КПС) с размерами от нескольких мкм до нескольких десятков мкм. Предполагалось, что эти скопления по своей природе аналогичны кислородным и углеродным облакам, наблюдаемым в кремнии, выращенном методом бестигельной зонной плавки [2]. Однако в результате исследования кристаллов кремния, выращенных с переменной скоростью роста, методами МУРС и сканирующей электронной микроскопии в режиме наведенного тока было показано, что большая часть КПС в кремнии, выращенном методом Чохральского, имеет форму, близкую к цилиндрической [3], что противоречит модели примесных облаков. В данной работе делается попытка выделения различных по своей природе типов КПС в кремнии, выращенном методом Чохральского, дается информация о их параметрах и влиянии на них различных термообработок.

### 2. Методика эксперимента

В работе исследовалась группа стандартных промышленных подложек бездислокационного кремния, выращенного методом Чохральского в направлении  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ , легированных бором ( $\rho$  порядка нескольких Ом · см). Подложки имели диаметр 76 и 100 мм, концентрация кислорода варьировалась от  $6 \cdot 10^{17}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, концентрация углерода не превышала  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Поверхности пластин полировались с оптической точностью. Толщина подложек диаметром 76 мм составляла 380 мкм, диаметром 100 мм—500 мкм. Подложки

были выращены на одном предприятии и результаты, полученные для этой группы материалов, были достаточно типичны для всех исследованных кристаллов промышленного кремния, выращенного методом Чохральского.

Исследование крупномасштабных примесных скоплений велось методами малоуглового рассеяния света и растровой электронной микроскопии в режиме наведенного тока (НП). В качестве источников зондирующего излучения использовались непрерывные СО- и СО<sub>2</sub>-лазеры, работающие на длинах волн 5.4 и 10.6 мкм соответственно. Использование двух длин волн зондирующего излучения позволяет экспрессно выделять рассеяние на скоплениях носителей тока [4]. Для определения энергий термической ионизации точечных центров, образующих скопления, исследовались зависимости рассеяния света от температуры образца (в интервале температур 300—85 К) [5]. Для определения формы и ориентации дефектов исследовалось влияние ориентации образца относительно плоскости регистрации рассеянного света на диаграммы рассеяния. Подробно схемы экспериментальных установок, подготовка образцов и методика обработки результатов описаны в [4—7]. Отметим также, что в данной работе использовалось плазменное травление (в специально подобранном режиме) поверхности образца перед нанесением барьера Шоттки, что позволило резко повысить чувствительность метода наведенного тока к наличию электрически активных дефектов в образце [8].

Для проведения экспериментов по влиянию термообработок на КПС исследуемая пластина разрезалась на 4 части, одна из которых не термообработывалась, а другие проходили либо изотермические термообработки при 600 и 800 °С, либо более высокотемпературные термообработки (до 1250 °С). В случае изотермических термообработок при 600 °С (или 800 °С) три части пластины термообработывались в течение 24, 48 и 120 ч соответственно. Высокотемпературные термообработки проводились при 965, 1100, 1150, 1200 и 1250 °С в течение нескольких десятков минут. Термообработки при  $T > 1200$  °С приводят к образованию большого количества дефектов структуры, которые выявляются с помощью избирательного травления. Подложки, выращенные в направлении  $\langle 100 \rangle$ , проходили как первые, так и вторые термообработки, а выращенные в направлении  $\langle 111 \rangle$  — только высокотемпературные. Обычно с помощью МУРС исследовались 3—5 областей каждого образца. Размер исследуемой области определялся диаметром зондирующего луча, который составлял несколько мм. Поскольку эксперименты по влиянию температуры образца на рассеяние света более сложны, чем стандартные измерения МУРС, то при их проведении исследовались не все образцы, причем обычно изучалось не более 1—2 областей каждого образца. При исследовании с помощью наведенного тока из пластин кремния вырезались прямоугольники размером 10 × 15 мм<sup>2</sup>. Наиболее детально с помощью этого метода были изучены исходные материалы — исследовано примерно 10—12 образцов, вырезанных из разных областей пластин. В случае термообработанных материалов исследовались обычно 1—2 прямоугольника для каждой температуры и времени термообработки.

### 3. Результаты экспериментов

*3.1. Исходные образцы.* На рис. 1 приведены изображения дефектов, полученные с помощью метода НП. Из приведенной микрофотографии видно, что исследуемый кремний содержит большое количество неоднородностей с размерами от нескольких мкм до нескольких десятков мкм — в основном имеющих цилиндрическую форму (дефекты 1). Кроме того, выявляются дефекты, имеющие форму, близкую к сферической (дефекты 2).

Рассмотрим первоначально цилиндрические дефекты (ЦД). В диаграммах рассеяния обычно есть участки, вид которых сильно зависит от ориентации

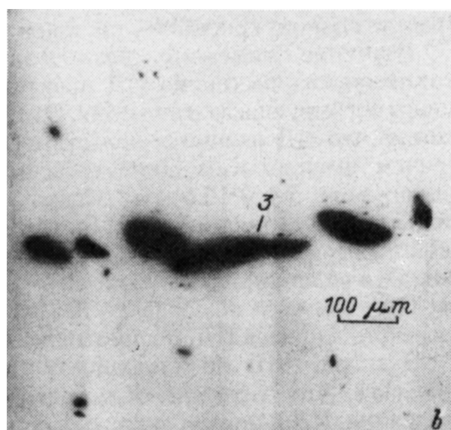
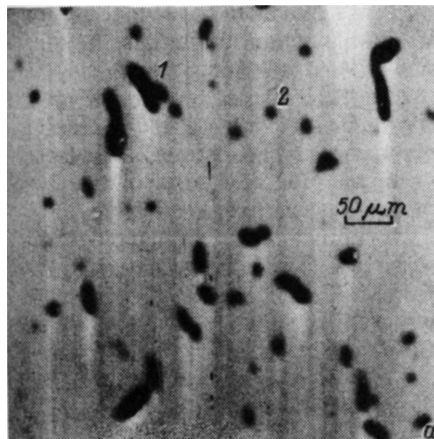


Рис. 1. а. Микрофотография дефектов в исходном кремнии, выращенном методом Чохральского (масштаб 1 см — 50 мкм); 1 — цилиндрические дефекты, 2 — сферические дефекты. б. Микрофотография дефектов в исходном кремнии, выращенном методом Чохральского (масштаб 1 см — 100 мкм); 3 — сверхкрупные дефекты.

образца относительно плоскости регистрации рассеянного света (рис. 2, кривая 1  $\theta < 4.5^\circ$ , кривая 2  $\theta < 4.5^\circ$ ). Хотя точность измерения и обработки диаграмм рассеяния не позволяют строго определять форму дефектов, эти участки хорошо аппроксимируются рассеянием на цилиндрах с диаметром от 3—4 до 8—10 мкм и длиной от 15 до 40 мкм в зависимости от образца. Цилиндры преимущественно ориентированы по кристаллографическим направлениям  $\langle 110 \rangle$ . Как отмечено выше, аналогичные дефекты наблюдаются на микрофотографиях НТ, из которых можно видеть, что форма ЦД во многих случаях не строго цилиндрическая, а скорее ближе к эллиптической либо дефекты имеют форму изогнутых цилиндров. Можно предположить, что методами МУРС и НТ регистрируются одни и те же дефекты, причем они аналогичны цилиндрическим дефектам, наблюдаемым в [3].

ЦД — наиболее распространенный тип дефектов в исследуемых кристаллах кремния. Их концентрация (оцененная по микрофотографиям НТ) варьируется в пределах  $10^6$ — $10^7$  см $^{-3}$ . Нам не удалось надежно зафиксировать каких-либо зависимостей концентрации ЦД от концентрации кислорода в образцах, направления роста кристалла, диаметра слитка или положения исследуемой области на подложке. Тем не менее можно считать твердо установленным тот факт, что

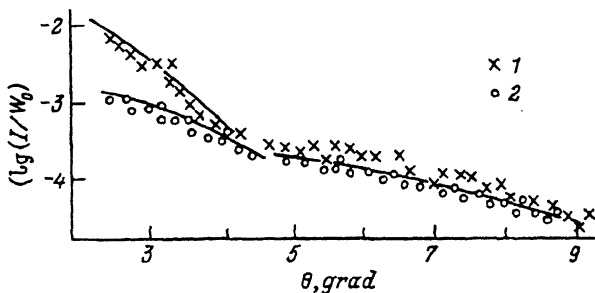


Рис. 2. Диаграммы рассеяния исходными кристаллами кремния в зависимости от ориентации образца относительно плоскости регистрации рассеянного света; 1 — 0 °С, 2 — 90 °С.

концентрация ЦД и интенсивность рассеяния ими существенно меняются как в пределах одного кристалла, так и при исследовании различных подложек.

Изучение рассеяния света в диапазоне 5.4—10.6 мкм показало, что интенсивность рассеяния ЦД практически не меняется при изменении длины волны зондирующего излучения. Это подтверждает высказанное в [3] предположение, что ЦД являются областями с повышенной концентрацией носителей, причем именно этим обстоятельством обусловлено рассеяние ими света на длинах волн 5.4 и 10.6 мкм. Используя величины концентраций ЦД и интенсивность рассеяния ими света, были оценены значения отклонения диэлектрической проницаемости ЦД от средней по объему и концентрации носителей тока в них. Эти величины составляют  $(1-4) \cdot 10^{-4}$  и  $(3-10) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  соответственно. ЦД занимают не более  $3 \cdot 10^{-2}$  объема кристалла, а общее число примесей, сосредоточенных в ЦД, не превышает величины  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Эксперименты по влиянию температуры образца на рассеяние им света показали, что наблюдается небольшое (в 2—3 раза) падение интенсивности рассеяния ЦД при температурах порядка 90 К (рис. 3, кривая 1). Это позволяет утверждать, что рассеяние света ЦД на длине волны 10.6 мкм при 300 К обусловлено ионизированными точечными центрами с энергиями ионизации 40—60 эВ, которые входят в состав ЦД. Разумеется, помимо этих центров, ЦД могут содержать и другие центры, например глубокие, которые прямо не влияют на концентрацию носителей в ЦД, а также компенсирующие центры и такие слаборассеивающие на больших длинах волн неоднородности как примесные преципитаты, включения и дефекты структуры.

Рассмотрим теперь сферические дефекты (СД). Наряду с участками диаграмм, вид которых сильно зависит от ориентации образцов относительно плоскости регистрации рассеянного света, регистрируются участки, где эта зависимость невелика или вообще отсутствует (рис. 2, кривая 1  $\theta > 4.5^\circ$ , кривая 2  $\theta > 4.5^\circ$ ). Эти участки хорошо аппроксимируются рассеянием на сферических дефектах с Гауссовым профилем распределения диэлектрической проницаемости ( $\Delta\epsilon$ ) и размерами от 5—8 до 20 мкм. Такие же дефекты наблюдаются и на микрофотографиях НТ (рис. 1, дефекты 2). Их концентрация существенно ниже концентрации ЦД и составляет обычно  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Нам также не удалось зафиксировать какой-либо четкой зависимости концентрации СД от концентрации кислорода, направления роста кристалла и положения исследуемой области на подложке.

Отклонения диэлектрической проницаемости СД составляет величину  $(1-3) \cdot 10^{-3}$ , концентрация носителей тока в них  $(3-9) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . СД занимают не более  $4 \cdot 10^{-4}$  объема кристалла, а общее число примесей, сосредоточенных в СД, не превышает  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Эксперименты по исследованию температурных зависимостей рассеяния света показали, что СД, так же как и ЦД, представляют собой области с повышенной концентрацией ионизированных при комнатной температуре примесей, причем рассеяние ими света обусловлено наличием в этих областях носителей тока. Обработка температурных зависимостей интенсивности рассеяния СД (рис. 3, кривая 2) дает величину энергий ионизации образующих их центров порядка 120—160 эВ, что существенно больше значений энергии ионизации для центров, образующих ЦД. Отметим, что это является дополнительным фактором, позволяющим отличать СД от ЦД в диаграммах рассеяния света, поскольку уменьшение интенсивности рассеяния СД происходит при более высоких (250 К) температурах, чем «вымораживание» примесей в ЦД (90 К). Вследствие этого снимая диаграммы рассеяния при температурах, меньших 250 К, но больших 90 К, можно подавить рассеяние СД и выделить рассеяние ЦД (рис. 4).

Наконец, перейдем к сверхкрупным (СКД) и малым (МД) дефектам. Иногда в диаграммах рассеяния проявляются участки, аппроксимирующиеся

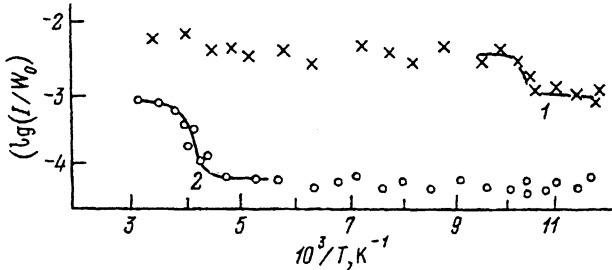


Рис. 3. Температурные зависимости интенсивности рассеяния исходными кристаллами кремния, выращенного методом Чохральского: 1 — для цилиндрических дефектов, 2 — для сферических дефектов.

рассеянием на дефектах с размерами более 50 мкм. Поскольку эти дефекты встречаются достаточно редко, то детально исследовать СКД с помощью ориентационных зависимостей рассеяния света и температурных измерений интенсивности рассеяния не удалось. Однако можно с достаточной долей уверенности утверждать, что СКД имеют резко асимметричную форму, и, вероятно, этим неоднородностям отвечают дефекты типа 3 (рис. 1, б), которые иногда встречаются на микрофотографиях НТ.

В диаграммах рассеяния наблюдаются участки, где интенсивность рассеяния практически не зависит от угла рассеяния (так называемое «плато»). Это соответствует рассеянию света на дефектах с размерами менее 4—5 мкм. Обычно эти дефекты доминируют в диаграммах рассеяния на длине волны 5.4 мкм, реже проявляются на длине волны 10.6 мкм, причем интенсивность рассеяния ими тоже не зависит от длины волны. Можно утверждать поэтому, что эти дефекты также представляют собой области с повышенной концентрацией носителей тока. В картинах НТ также наблюдаются дефекты с малыми размерами. Установить их форму не удается, однако не исключено, что МД, наблюдаемые по рассеянию света, не являются отдельным типом дефектов, характерным для кремния, выращенного методом Чохральского, а представляют собой ЦД и СД малых размеров. В пользу этого говорят и результаты экспериментов по исследованию температурных зависимостей интенсивности рассеяния — обычно в тех случаях, когда в диаграммах рассеяния доминируют ЦД, МД «вымораживаются» при температурах 90 К, а в случаях, когда основным дефектом являются СД, «вымораживание» происходит при 250 К.

3.2. Термообработанные кристаллы. Диаграммы рассеяния термообработанных подложек и микрофотографии НТ качественно не отличаются от

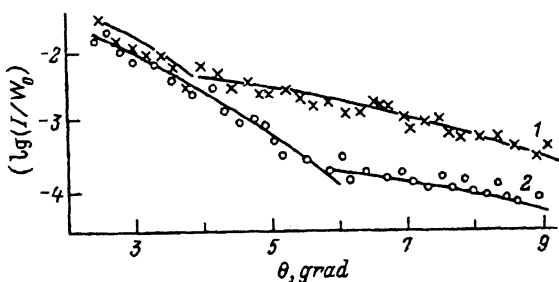


Рис. 4. Диаграммы рассеяния кристаллами исходного кремния при различных температурах, К: 1 — 300, 2 — 110.

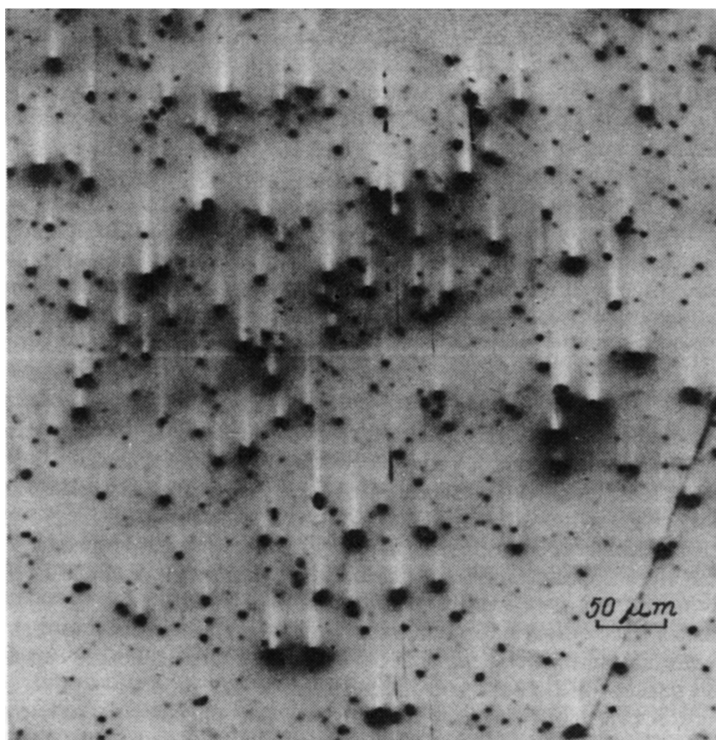


Рис. 5. Микрофотография дефектов в кристаллах кремния, выращенных методом Чохральского, термообработанных при температурах, больших  $1100^{\circ}\text{C}$  (масштаб 1 см — 500 мкм).

диаграмм и картин НТ для исходных образцов. Можно лишь выделить следующие особенности:

3.2.1. В кристаллах, термообработанных в интервале температур  $600\text{—}1100^{\circ}\text{C}$  существенно (хотя и не полностью) подавлено рассеяние СД, так что доминирующими дефектами в этих подложках являются ЦД и МД. Это подтверждается микрофотографиями НТ, на которых наблюдаются в основном ЦД и МД.

3.2.2. Термообработка при температурах, больших  $1100^{\circ}\text{C}$ , приводит к тому, что в диаграммах рассеяния начинают доминировать СД и в этих кристаллах происходит общий рост интенсивности рассеяния. Соответственно в картинах НТ появляется большое количество дефектов с формой, близкой к сферической (рис. 5).

3.2.3. Термообработки при  $800^{\circ}\text{C}$  и кратковременные (до 48 ч) термообработки при  $600^{\circ}\text{C}$  не меняют (в пределах ошибки) значений энергий ионизации центров, образующих ЦД и СД. Более длительные термообработки при  $600^{\circ}\text{C}$  приводят к доминированию в ЦД и СД центров с энергией ионизации  $70\text{—}90$  мэВ. В кристаллах, термообработанных при  $1200^{\circ}\text{C}$  и выше, значения энергий ионизации совпадают со значением энергии ионизации в исходных материалах.

3.2.4. В кристаллах, прошедших длительные (120 ч) термообработки при  $600$  и  $800^{\circ}\text{C}$ , чаще, чем в исходных материалах, наблюдаются СКД. Эксперименты по влиянию температуры образца показали, что в СКД входят центры, имеющие энергию ионизации  $130\text{—}170$  мэВ.

#### 4. Обсуждение результатов

В настоящее время однозначно определить природу примесных скоплений, наблюдаемых в кремнии, выращенном методом Чохральского, не представляется возможным. Очевидно лишь, что, например, ЦД представляют собой области с повышенной концентрацией носителей тока, обусловленной наличием в них точечных примесных центров с энергией ионизации 40—60 мэВ. По своей форме и ориентации относительно кристаллографических осей ЦД напоминают дефекты, выявляемые на микрофотографиях НТ, которые возникают в результате окислительных термообработок [9]. Однако наши исследования показали наличие таких дефектов в исходных кристаллах. Более того, в результате высокотемпературных термообработок чаще всего не происходит заметных изменений участков диаграмм, соответствующих ЦД. Тем не менее не исключено, что ЦД являются примесными атмосферами вокруг дефектов-предшественников, например дефектов упаковки (ДУ). Отметим в этой связи, что ряд авторов [9, 10] связывают наблюдаемый контраст на картинах НТ с образованием вокруг ДУ колоний преципитатов. Так как наличие колоний преципитатов может прямо не влиять на концентрацию носителей в примесных атмосферах (более того, образование колоний может даже уменьшать концентрацию растворенной примеси и соответственно концентрацию носителей тока), то может быть рассмотрена следующая ситуация: в исходных образцах концентрация преципитатов в примесных атмосферах небольшая и соответственно слаб рекомбинационный контраст на микрофотографиях НТ. В то же время концентрация растворенной примеси достаточно велика (хотя и недостаточна для образования колоний преципитатов), а следовательно, интенсивности рассеяния на длине волны 10.6 мкм достаточно большие, а рекомбинационная активность мала. В процессе высокотемпературных термообработок в ЦД образуются колонии преципитатов, однако количество растворенной примеси и число носителей меняется слабо (например, вследствие того что уже в исходном кристалле концентрация примеси в ЦД была близка к пределу растворимости либо за счет увеличения степени компенсации). При этом рекомбинационный контраст усиливается, а интенсивность рассеяния меняется слабо и бессистемно.

С другой стороны, наблюдаемый контраст на картинах НТ может быть связан со спецификой применяемой в наших исследованиях методики подготовки поверхности образца. Здесь возможны два варианта. Во-первых, во время плазменного травления образуются центры, которые усиливают рекомбинационный контраст ЦД. Альтернативно в процессе обычно применяемого при подготовке образцов химического травления может происходить «высасывание» растворенной примеси из ЦД, что снижает контраст на картинах НТ.

Таким образом, в настоящее время гипотеза о том, что ЦД являются примесными атмосферами вокруг дефектов-предшественников (дефектов упаковки) не сталкивается с необъяснимыми противоречиями, однако и серьезных доказательств ее также нет. Однозначно ответить на этот вопрос, возможно, удастся после проведения экспериментов по детальному исследованию ЦД с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Остановимся теперь на центрах, образующих ЦД. К сожалению, невысокая точность определения значений энергии ионизации ( $\Delta E$ ) не позволяет провести их идентификацию. Близкие значения  $\Delta E$  имеет целый ряд комплексов распространенных в кремнии, полученном методом Чохральского, например, основная легирующая примесь — бор [11], комплекс  $\text{Cu—O}$  [12], «новые» термодоноры [13] и так далее. Тот факт, что термообработки при 600 °С влияют на значения  $\Delta E$  комплексов, образующих ЦД, косвенно свидетельствует о том, что одним из основных точечных центров в ЦД являются именно

термодоноры. Отметим, что увеличение энергии ионизации новых термодоноров в процессе длительных термообработок при 650 °С наблюдалось в [14]. В настоящее время планируются эксперименты по влиянию условий роста кристалла, термообработок и легирования различными примесями на ЦД, что позволит дать более определенный ответ на природу точечных центров в ЦД.

СД также представляют собой сходные с ЦД неоднородности области с повышенной концентрацией растворенной примеси и носителей тока. Однако очевидно, что и природа, и центры, образующие СД, резко отличаются от ЦД. Возможно, что природа аналогична природе кислородных и углеродных облаков. Однако некоторые экспериментальные факты с трудом могут быть объяснены в рамках известной модели примесных облаков. Это, во-первых, большой разброс по размерам СД в исходных кристаллах. Действительно, разработанный для случая чистого кремния и германия метод анализа механизма образования облаков предполагает их близкие размеры (по крайней мере для областей кристалла, выращенных в одинаковых условиях [2]). Кроме того, оценка размеров примесных облаков для наиболее распространенных в Si примесей (таких как углерод и кислород) дает существенно большие размеры, чем наблюдаемые размеры СД.

Другой возможной моделью является предположение о том, что СД являются примесными атмосферами вокруг дефектов структуры (например преципитатов), которые имеют форму, близкую к сферической. В пользу этого говорит факт увеличения числа СД после высокотемпературных термообработок и их корреляция с появлением дефектов структуры, выявляемых с помощью травления. Однако и эта гипотеза не имеет в настоящее время серьезных экспериментальных доказательств. Таким образом, как и в случае ЦД, определение механизмов образования СД требует дополнительных экспериментов.

Несколько более определенная ситуация с точечными центрами, образующими СД. Оценка их энергии ионизации составляет 130—170 эВ. В ряде работ было показано, что в состав СД, по-видимому, входят центры с отрицательной корреляционной энергией [15, 16]. Это позволило сузить число рассматриваемых центров, однако оказалось, что сходными параметрами обладает целый ряд центров кислород—вакансия, двойные термодоноры, межузельный бор, комплекс С(межузельный)—С(замещения) [17—19]. Учитывая, что термообработки при 600 °С приводят к тому, что в СД начинают доминировать дефекты с другими значениями  $\Delta E$ , можно предполагать (как в случае ЦД), что в состав СД входят термодоноры.

Малые дефекты, скорее всего, представляют собой ЦД и СД малых размеров и с аналогичными свойствами. О природе СКД в настоящее время сказать что-либо сложно, за исключением того, что они (как и СД, и ЦД) представляют собой области с повышенной концентрацией растворенной примеси и носителей тока.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно утверждать, что в кремнии, полученном методом Чохральского, присутствуют как минимум два типа примесных скоплений, отличающихся природой образования и составом. Их параметры для исследованной в данной работе группы кристаллов достаточно типичны для промышленного кремния, легированного бором, с сопротивлением несколько Ом · см.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. В. Воронков, Г. И. Воронкова, Т. М. Мурина, Т. Назаров, А. М. Прохоров, В. П. Калинушкин, О. А. Ремизов, А. Т. Тешабаев. ФТП, 17, 2137 (1983).
- [2] В. В. Воронков, Г. И. Воронкова, Б. В. Зубов, Е. А. Климанов, Т. М. Мурина, А. М. Прохоров, В. П. Калинушкин. ФТП, 13, 846 (1979).
- [3] А. Н. Бузынин, С. Е. Заболотский, В. П. Калинушкин, А. Е. Лукьянов, Т. М. Мурина, В. В. Осико, М. Г. Плоппа, В. М. Татаринцев, А. М. Эйдензон. ФТП, 24, 264 (1990).



- [4] Т. М. Мурина, М. Г. Плоппа, А. М. Прохоров, В. П. Калинушкин, В. И. Масычев. Письма в ЖТФ, **12**, 129 (1986).
- [5] С. Е. Заболотский, В. П. Калинушкин, Д. И. Мурин, Т. М. Мурина, М. Г. Плоппа. ФТП, **21**, 1364 (1987).
- [6] С. Е. Заболотский, М. Г. Плоппа, В. П. Калинушкин, Т. М. Мурина. ПТЭ, **4**, 206 (1984).
- [7] В. В. Воронков, Г. И. Воронкова, Б. В. Зубов, Б. Б. Крынецкий, Т. М. Мурина, А. М. Прохоров, В. П. Калинушкин. ФТТ, **23**, 117 (1981).
- [8] А. Н. Бузынин, Н. А. Бутылкина, А. Е. Лукьянов, В. В. Осико, В. М. Татаринцев. Изв. АН СССР. Сер. физ., **52**, 1387 (1988).
- [9] K. Schmalc, F.-G. Kirscht, S. Niese, I. Babanskaja et al. Phys. St. Sol. (a), **89**, 389 (1985).
- [10] S. Kawado, Y. Hayafugi, T. Adachi. Japan. J. Appl. Phys., **14**, 407 (1975).
- [11] H. Neubard. Phys. St. Sol. (b), **86**, 269 (1978).
- [12] H. Feichtinger, J. Oswald, R. Czaputa et al. Proc. XIII Int. Conf. Def. Semicond. (1984) (ed. by L. C. Kimerling, Coronado), 851 (1985).
- [13] A. Bourret. Proc. XIII Int. Conf. Def. Semicond. (1984) (ed. by L. C. Kimerling, Coronado), 129 (1985).
- [14] A. Kanamori, M. Manamori. J. Appl. Phys., **50**, 80 (1979).
- [15] Д. Е. Абдурахимов, П. М. Бочикашвили, В. Л. Верещагин, В. П. Калинушкин, А. Л. Обухов, М. Г. Плоппа, М. Д. Райзер. Э. М. Рау. Микроэлектроника, **21**, 82 (1992).
- [16] К. А. Валиев, Л. В. Великов, В. П. Калинушкин, М. Г. Плоппа, Н. А. Сулимов. Микроэлектроника, **12**, 453 (1990).
- [17] Д. Е. Абдурахимов, Ф. Ш. Вахидов, В. Л. Верещагин, В. П. Калинушкин, М. Г. Плоппа, М. Д. Райзер. Микроэлектроника, **22**, 21 (1991).
- [18] T. W. Song, B. M. Benson, G. D. Watkins. Appl. Phys. Lett., **51**, 15 (1987).
- [19] R. D. Harris, J. L. Newton, G. D. Watkins. Phys. Rev., **36**, 1094 (1987).

Редактор В. В. Чалдышев

---