

*Шукуров, У.Ш., Акчалов Ш.А., Медетбеков М.Т.*

## КРЕМНИЙ МОНОКРИСТАЛЛЫНДАГЫ ЗАРЯД АЛЫП ЖҮРҮҮЧҮЛӨРДҮН КЫЙМЫЛДУУЛУГУН ИЗИЛДӨӨ

*Шукуров У.Ш., Акчалов Ш.А., Медетбеков М.Т.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

*U.Sh. Shukurov, Sh.A. Akchalov, M.T. Medetbekov*

## RESEARCH OF THE MOBILITY OF CHARGE CARRIERS IN MONOCRYSTALLINE SILICON

УДК: 621.315:592.201

Макалада кремний монокристаллындагы эркин заряд алып жүрүүчүлөрдүн кыймылдуулугуна таасир этүүчү факторлор каралды. Жылуулуктан термелүүлөрдүн, чекиттик жана сызыктуу дефектилердин, кошулмалардын жана башкалары менен байланышкан торчонун мезгилдүүлүгүнүн бузулуулары реалдык кристаллдар үчүн мүнөздүү болоору жана кошулмалар тыюу салуу зонада энергетикалык денгээлдерди түзөрү көрсөтүлдү. Жарым өткөргүч структурасында көп сандаган эркин заряд алып жүрүүчүлөрдү камтыйт. Эгер ушул жарым өткөргүчкө сырттан электр талаасы менен таасир этсек же болбосо температура менен эркин заряд алып жүрүүчүлөрдүн концентрациясынын градиентин түзсөк, же жарык менен таасир этсек, эркин заряд алып жүрүүчүлөрдүн багытталган кыймылы, б.а. алардын дрейфи ишке ашып, электр тогу пайда болот. Кристалл аркылуу кыймылдаган эркин заряд алып жүрүүчүлөр, структуранын дефектери, фонондору жана башкалары менен кагылышып энергияларын жана ылдамдыктарын азайтышат. Бул кубулуш электрдик каршылык түрүндө өзүн көрсөтөт. Заряд алып жүрүүчүлөрдүн кыймылдуулугу изилденип, анын кошулмалардан, температурадан жана структуранын дефектилеринин концентрациясынан көз карандылыгы көрсөтүлдү.

**Негизги сөздөр:** жарым өткөргүчтөр, кошулмалар, заряд алып жүрүүчүлөр, кристалдык торчо, чекиттик дефекттер, сызыктуу дефектер, энергиянын чачырашы, кагылышуу, заряддын кыймылдуулугу.

В статье рассматриваются факторы, влияющие на подвижность носителей заряда в монокристаллах кремния. Показано, что для реального кристалла характерны отклонения от периодичности решётки, связанные с тепловыми колебаниями структурных элементов, точечными и линейными дефектами, примесями, которые присутствуют в веществе любой степени очистки и создают в запрещённой зоне уровни, глубина которых определяется энергией отрыва электрона из наружного слоя примесного атома. Такое полупроводниковое вещество содержит огромное количество свободных носителей заряда и, если приложить электрическое поле или воздействовать светом, или

создать градиент температуры или концентрации носителей заряда, происходит направленное движение носителей заряда, т.е. дрейф, и возникает электрический ток. Показано также, что свободные носители заряда, движущиеся по кристаллу соударяясь с фононами, дефектами кристаллической решётки и другими рассеиваются и последнее проявляется как электрическое сопротивление материала. Исследована подвижность носителей заряда, которая зависит от температуры, концентрации структурных дефектов и примесей.

**Ключевые слова:** полупроводники, примеси, носители заряда, кристаллическая решётка, точечные дефекты, линейные дефекты, рассеяние энергии, столкновения, подвижность заряда.

The article discusses the factors influencing the mobility of charge carriers in silicon single crystals. It is shown that a real crystal is characterized by deviations from the lattice periodicity associated with thermal vibrations of structural elements, point and linear defects, impurities that are present in a substance of any degree of purification and create levels in the forbidden zone, the depth of which is determined by the energy of electron detachment from the outer layer of an impurity atom. Such a semiconductor substance contains a huge amount of free charge carriers, and if an electric field is applied or exposed to light, or a temperature or carrier concentration gradient is created, a directed motion of charge carriers occurs, i.e. drift, and an electric field arises. It is also shown that free charge carriers moving through the crystal colliding with photons, crystal lattice defects and others are scattered and the latter manifests itself as the electrical resistance of the material. The mobility of charge carriers is investigated, which depends on temperature, concentration of structural defects and impurities.

**Key words:** semiconductors, impurities, charge carriers, crystal lattice, point defects, linear defects, energy scattering, collisions, charge mobility.

**Введение.** Любое вещество, в том числе полупроводники любой степени очистки всегда содержат примеси, атомы которых либо занимают регулярный узел в кристаллической решетке основного вещества при выращивании монокристалла (замещение), либо

встраиваются во внеузловое положение (внедрение). Часто примеси вводят для придания полупроводнику необходимых физических свойств.

Для реальных кристаллов характерно различные отклонения от периодичности в построении кристаллических решеток, связанные с тепловыми колебаниями структурных элементов около точки равновесия, точечными и линейными дефектами, примесями, которые оказывают существенное влияние на механические, электрические и другие свойства монокристаллов.

Примеси создают в запрещенной зоне кристалла энергетические уровни, глубина которых определяется энергией отрыва электрона из наружного слоя примесного атома. При этом, неглубоко лежащие уровни выполняют роль ловушек захвата для носителей заряда. Ловушки захвата для электронов располагаются ближе к зоне проводимости, а для дырок - к валентной зоне и могут обмениваться с этими зонами носителями заряда. Поэтому переход электронов в валентную зону, а дырок в зону проводимости маловероятен [1-3].

Необходимо отметить, что в кристалле существуют глубоко лежащие энергетические уровни и для переброса, например, электрона с таких уровней в зону проводимости электрон должен поглотить несколько фононов, вероятность которого незначительна. Более вероятным является переход в валентную зону, где происходит рекомбинация с дыркой. Поэтому глубокие локальные энергетические уровни являются центрами рекомбинации. В полупроводниках с широкой запрещенной зоной (Si) этот вид рекомбинации является преобладающим.

В структуре кристалла свободные носители заряда движутся беспорядочно и при этом они взаимодействуют и рассеиваются с атомами кристаллической решетки, структурными дефектами, примесями. В конечном итоге, это приводит к установлению равновесного их распределения и средняя скорость свободных носителей заряда в любом направлении равна нулю. Поэтому, в веществе, содержащем огромное количество свободных носителей заряда электрический ток отсутствует.

Если к веществу приложить внешнее электрическое поле  $\mathcal{E}$  или воздействовать светом или создать градиент температуры  $T$  или концентрации  $n$ , то происходит направленное движение носителей заряда, т.е. дрейф и возникает электрический ток плотностью  $j$

$$j = \sigma \mathcal{E} \quad (1)$$

где  $\sigma$  - удельная проводимость вещества,  $\frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ .

Поскольку концентрация носителей заряда в полупроводнике  $n$ , их дрейфовая скорость  $V_g$  формулу (1) можно написать

$$j = -enV_g \quad (2)$$

где  $e$ -заряд электрона, Кл

Приравняв правые части формул (1) и (2) находим  $V_g$

$$\sigma \mathcal{E} = -enV_g \quad (3)$$

$$V_g = -\frac{\sigma}{en} \cdot \mathcal{E} \quad (4)$$

В формуле (4) соотношение  $\frac{\sigma}{en}$  дает подвижность носителей заряда  $\mu$ [1]

$$\mu = \frac{\sigma}{en} \quad (5)$$

Свободные носители заряда, двигаясь по кристаллу, испытывают соударение с фононами и дефектами кристаллической решетки, примесями и другими рассеиваются. Если удалить электрическое поле или другие внешние воздействия, то в результате рассеяния энергии будет восстановлено равновесие, т.е. происходит процесс релаксации, который определяется временем, характеризующий скорость установления равновесного состояния в системе, не изменяющееся с течением времени.

В процесс электропроводности кристалла участвуют огромное количество свободных носителей заряда, и при описании их поведения в кристалле удобно пользоваться средними значениями [2]:

- длина свободного пробега  $\lambda_{\text{ср}}$  равная усредненному значению всех отрезков пути между столкновениями;

- скорости дрейфа  $v_{\text{др}}$ ;

- значением времени релаксации  $\tau_{\text{ср}}$ , в течении которого в кристалле существует неравновесное распределение свободных носителей заряда после удаления внешнего воздействия;

- числом столкновений  $\gamma_{\text{ср}}$ .

Движущийся носитель заряда не теряет полностью дрейфовую скорость  $V_g$  в единичном столкновении с центром рассеяния. Для полной потери  $V_g$ , требуется в среднем  $\gamma_{\text{ср}}$  столкновений с центрами рассеяния, на которое затрачивается время  $\tau_{\text{ср}}$ , которое равно

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{ср}} \cdot \gamma_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}} \quad (6)$$

Удельная электропроводность выражается формулой

$$\sigma = \frac{n \cdot e^2 \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \gamma_{\text{ср}}}{m_n^* \cdot V_{g\text{ср}}} \quad (7)$$

где 
$$\mu = \frac{e^2 \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \gamma_{\text{ср}}}{m_n^* \cdot V_{g\text{ср}}} \quad (8)$$

или

$$\mu = \frac{e \cdot \tau_{\text{ср}}}{m_n^*} \quad (9)$$

где  $m_n^*$  – эффективная масса электрона, кг

Свободные носители заряда, двигаясь в идеальном полупроводниковом кристалле, при температуре равной абсолютному нулю не должны встречать сопротивление. Однако, в реальности не существует вещество с идеальной кристаллической структурой. Локальные нарушения кристаллической структуры, связанные с тепловыми колебаниями атомов или ионов кристаллической решетки, примесными атомами или ионами, точечными и линейными дефектами и другие препятствуют направленному движению свободных носителей заряда. Это проявляется электрическим сопротивлением вещества.

При направленном движении под действием внешних факторов (электрического поля, света или градиента температуры, или градиента концентрации) свободные носители заряда испытывают многочисленные соударения с дефектами кристаллической структуры, в результате которых их скорость изменяется и по величине, и по направлению, т.е. происходит рассеяние.

Примеси искажают упорядоченное строение структуры кристалла. С ростом концентрации примеси растет количество локальных искажений структуры, что приводит к росту рассеяния и уменьшению подвижности свободных носителей заряда.

Таким образом, рассеяние носителей заряда происходит:

- на тепловых колебаниях (фононах) атомов или ионов кристаллической решетки;
- на примесных атомах и ионах;
- на структурных дефектах (точечных, линейных);
- на свободных носителях заряда.

С ростом температуры растет интенсивность колебательного движения структурных элементов на регулярных узлах кристаллической решетки, растет и число столкновений  $\gamma$  свободных носителей заряда с фононами. Это приводит к уменьшению длины свободного пробега т.е.

$$\lambda_{\text{ср}} \approx \frac{1}{T} \quad (10)$$

А температурная зависимость носителей заряда определяется выражением

$$\mu = T^{-\frac{3}{2}} \quad (11)$$

С понижением температуры кристалла концентрация фононов уменьшается, соответственно уменьшается рассеяние носителей заряда на них и доминирующим становится рассеяние на примесях и дефектах структуры.

Ионизированные примеси оказывают сильное влияние на движение носителей заряда из-за электрического поля, созданного примесным ионом. Это поле действует на большом расстоянии и вызывает отклонение носителей заряда, движущегося даже сравнительно далеко от ионизированной примеси.

С повышением температуры кристалла возрастает скорость свободных носителей заряда и отклонение направления движения под действием ионизированной примеси уменьшается, подвижность носителей заряда становится прямо пропорциональным на  $T$ , то есть

$$\mu \sim T^{\frac{3}{2}}$$

Рассеяние носителей заряда на атомах примеси незначительно. Потому что рассеяние происходит только при непосредственном столкновении носителей заряда с атомными примесями. При этом соударение будет упругим и направление, и скорость движения носителя заряда претерпевают незначительные изменения.

Движущиеся носители заряда взаимодействуют не только с фононами и дефектами кристаллической структуры, но и с частицами, образующими кристаллическую решетку полупроводникового вещества, т.е. подвижность носителей заряда зависит от вида кристаллической решетки.

В атомных полупроводниках (Si) рассеяние носителей заряда меньше, чем в ионных полупроводниках (CuO), так как колеблющиеся ионы кристаллической решетки создают переменное электромагнитное поле, сильно действующие на носителей заряда. Поэтому подвижность электронов в кремнии больше ( $\mu = 1200 \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$ ) чем в окиси меди ( $\mu = 0,26 \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$ ) [3]

Свободные носители заряда рассеиваются на линейных дефектах кристаллической структуры, т.е. на дислокациях. Дислокации в растущем монокристалле образуются в результате термоудара, когда вводят в

расплав охлаждаемую проточной водой затравку. Поэтому, для того чтобы уменьшить концентрацию дислокации, диаметр выращиваемого монокристалла сначала увеличивают, затем изменяя скорость вытягивания уменьшают, образовав шейку. При этом почти вся дислокация выходит к наружной стенке монокристалла. В дальнейшем, уменьшив скорость вытягивания, доводят диаметр выращиваемого монокристалла до необходимого диаметра и продолжают выращивание. Таким способом получают почти бездислокационные монокристаллы [4,5].

Кристаллическая структура вокруг дислокации деформирована, на которую рассеиваются свободные носители заряда. Чем больше концентрация дислокаций, тем больше рассеяние и тем меньше подвижность свободных носителей заряда.

Как было отмечено выше, свободные носители заряда, движущиеся в идеальном кристалле в отсутствии внешнего воздействия, перемещаются с постоянной средней скоростью.

Точечные и линейные дефекты, примеси искажают упорядоченные строения кристалла, на которых

рассеиваются свободные носители заряда и уменьшается их подвижность. С ростом температуры растёт интенсивность колебательного движения структурных элементов на регулярных узлах решётки, растёт и число столкновений свободных носителей заряда с фононами. Это приводит к уменьшению длины свободного пробега и подвижность носителей заряда. При понижении температуры доминирующим становится рассеяние на примесях и дефектах структуры.

#### Литература:

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: Энергия, 1976. - 416 с.
2. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Советское радио, 1971. - 376 с.
3. Соминский М.С. Полупроводники. - Ленинград: Наука, 1967. - 440 с.
4. Алыбаков А.А., Добржанский Г.Ф., Губанова В.А. Выращивание ионных кристаллов с малой плотностью дислокаций. // Кристаллография. - 1964. - №9. - С. 940-942.
5. Шукуров У.Ш., Акчалов Ш.А., Медетбеков М.Т., Рыскулов Р.Р. Влияние условий выращивания и примесей на качество монокристаллического кремния. // Известия вузов Кыргызстана. - 2019. - №8. - С. 36-40.