

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СЕТИ И СИСТЕМЫ

УДК:584.4/5:537.226.3

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В
МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ.**

Акчалов Ш.А., Институт автоматки и информационных технологий НАН КР
Калысбеков Ш.К., Институт автоматки и информационных технологий НАН КР
Рыскулов Р.Р., Институт автоматки и информационных технологий НАН КР
Шукуров У.Ш., Институт автоматки и информационных технологий НАН КР
Эсенгелдиев Ч.Э. Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова.

**THE FACTORS AFFECTING THE LIFETIME OF CHARGE CARRIERS IN SILICON
SINGLE CRYSTALS.**

Sh.A.Akchalov, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic.
Sh.K.Kalysbekov, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic.
R.R.Ryskulov¹, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic.
U.Sh.Shukurov, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic.
Ch.E. Esengeldiev. Kyrgyz State Technical University. I. Razzakova.

Рассмотрена время жизни неосновных носителей заряда в кремнии. Показано, что основными факторами, влияющими на его продолжительности является температура и концентрация примеси.

Ключевые слова: Неосновные носители заряда, время жизни, зона проводимости, валентная зона, энергетические уровни, проводимость кремния, электроны, дырки.

The lifetime of minority charge carriers in silicon is considered. It is shown that the main factors affecting its duration are temperature and impurity concentration.

Keywords: Nonbasic carries of a charge, lifetime, conductivity, valence zone, energy levels, silicon conduction, electrons, and holes.

Введение. Исключительно важные электрофизические свойства полупроводниковых материалов обусловили их широкое применение не только в отраслях электронного приборостроения, но и в отраслях энергетики.

Полупроводниковые приборы используются для усиления и генерации сигналов, выпрямления переменного тока, преобразования энергий излучения и теплоты в электрическую и многих других целях. Поэтому исследование электрофизических свойств полупроводниковых материалов представляет большой научный и практический интерес.

Одной из основных параметров, характеризующие физические свойства кремния является время жизни носителей заряда τ , представляющее собой среднее время существования избыточной концентрации неравновесных носителей заряда с момента появления до рекомбинации.

Целью и задачей данной работы являются изучение причин, изменяющих времени жизни носителей заряда.

Любое вещество независимо от степени очистки содержит примеси, создающие свои собственные примесные энергетические уровни. С другой стороны примеси вводятся сознательно для придания веществу необходимых свойств [1].

Кремний кристаллизуется в решетку типа алмаза. При введении в структуру кремния примеси пятивалентного элемента, пятый валентный электрон примесного атома не участвует в образовании ковалентной связи. Он будет двигаться в поле атома примеси, которое ослаблено в числе раз, равной диэлектрической постоянной кремния. Вследствие этого орбита электрона сильно увеличивается. Энергия ионизации примесных атомов пятивалентных элементов в кремнии равна 0,04-0,05 эВ и при сообщении электрону энергии такой величины, он отрывается от атома и перемещается в кристалле, превращаясь в электрон проводимости [2,3].

С точки зрения зонной теории, между валентной зоной и зоной проводимости расположены энергетические уровни электрона, которые размещены у дна зоны проводимости на расстоянии от нее $\sim 0,05$ эВ. Сообщение электронам примесных уровней энергии такой величины переводит их в зону проводимости, а оставшиеся на месте электронов положительные дырки локализуются на примесных атомах и в электропроводности не участвуют. Поскольку энергия возбуждения примесных электронов (0,05эВ) намного меньше чем таковой собственных электронов атомов кремния, при воздействии извне в первую очередь возбуждаются электроны примесных атомов и вследствие чего их концентрация во много раз превышает концентрацию собственных электронов. В таких условиях кремний будет обладать преимущественно примесной электронной проводимостью [4,5].

Примеси, имеющие меньшую валентность, чем атом кремния, для образования связей с четырьмя ближайшими атомами кремния, недостающего электрона берет у атома кремния. На месте оторванного электрона остается дырка, отвечающая образованию в валентной зоне кремния вакантного места, которые образуют энергетические уровни в потолке валентной зоны. На эти уровни переходят электроны из валентной зоны и не участвуют в проводимости. Поэтому проводимость кремния, содержащая акцепторные примеси является в основном дырочной [4,5].

Донорные и акцепторные энергетические уровни расположены вблизи своих зон и являются мелкими энергетическими уровнями. К этим уровням относятся и ловушки захвата, которые обмениваются со своими зонами носителями заряда. Однако носитель заряда не остается на ловушке длительное время, т.е. в результате теплового возбуждения вновь возвращается в свою зону. Такой процесс может повторяться много раз. Поэтому наличие ловушек захвата может значительно увеличить время жизни носителей заряда.

В полупроводниках под действием падающего света создаются избыточная концентрация электронов (Δn) и дырок (Δp) в результате разрыва валентных связей между атомами. В беспримесных полупроводниках количество генерируемых избыточных электронов и дырок одинаково, т.е:

$$\Delta n = \Delta p \quad (1)$$

Одновременно с генерацией идет и процесс рекомбинации, и число генерированных электронов и дырок (G_0) равно числу электронов и дырок (R_0), рекомбинирующих за это же время

$$G_0 = R_0 \quad (2)$$

Возникшие в результате тепловой генерации и находящиеся с кристаллической решеткой в тепловом равновесии носители заряда являются равновесными носителями заряда (n_0, p_0) . Под действием света, электрического поля и других факторов также образуются носители заряда (n, p) , которые отличаются от равновесных тем, что они не находятся в термодинамическом равновесии по концентрации и энергетическому распределению. Поэтому они являются неравновесными и их количества определяется формулой

$$\left. \begin{aligned} n &= n_0 + p_0 \\ p &= p_0 + n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В полупроводниках с донорной примесью при нормальных условиях атомы примеси полностью не ионизованы и при облучении светом электроны с донорных уровней переходят в зону проводимости. Это приводит к образованию избыточной концентрации электронов. Поскольку на месте освобожденного светом электрона остается положительный ион примеси, электронейтральность полупроводникового кристалла не нарушается.

В области, где генерируется светом неравновесные электроны, их концентрация повышена. Это приводит к перемещению их в область, где генерация отсутствует. В результате этого возникает объемный заряд, имеющий отрицательный знак, а область генерации будет иметь положительный заряд, обусловленный дырками ионов примеси. Если каким-то образом генерация прекратится, то порожденное объемным зарядом электрическое поле вызывает ток и происходит изменение плотности объемного заряда ρ . В данном случае плотность протекающего тока j подчиняется уравнению непрерывности неравновесных носителей заряда

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} j \quad (4)$$

Для электронов формула (4) имеет вид

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \operatorname{div} j_{ni} \quad (5)$$

для дырок

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \operatorname{div} j_{pi} \quad (6)$$

где $\frac{\partial n}{\partial t}$ и $\frac{\partial p}{\partial t}$ изменение концентрации носителей заряда. В общем случае изменение концентрации носителей заряда можно записать

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + \frac{1}{e} \operatorname{div} j_p \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где τ_n и τ_p – время жизни неравновесных электронов и дырок, с.

При падении света на полупроводник, создаются неравновесные носители заряда и их количества характеризуются уровнем инжекции.

Уровень инжекции в полупроводнике р-типа низкий, если справедливо неравенство

$$\Delta n \ll p_0 \quad (8)$$

или же

$$p_0 \gg n_0$$

и в качестве критерия низкого уровня инжекции можно записать

$$\Delta n \ll p_0 + n_0 \quad (9)$$

а для высокого уровня инжекции

$$\Delta n \gg p_0 + n_0 \quad (10)$$

При низком уровне инжекции наблюдается линейная, а при высоком-квадратичная рекомбинации.

Критерии вида (9) и (10) можно применять для полупроводников р-типа и n-типа, потому что

$$\Delta n = \Delta p \quad (11)$$

Время жизни неравновесных носителей заряда при их низком уровне инжекции (линейной рекомбинации) постоянно на протяжении всего процесса рекомбинации, а при квадратичной - является переменной величиной и зависит от избыточной концентрации [3].

В начальный момент генерации неравновесных носителей заряда, когда токи отсутствуют, можно записать

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{\Delta n}{\tau_n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{\Delta p}{\tau_p} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Приравнивая $\partial(n) = \partial(\Delta n)$ и $\partial(p) = \partial(\Delta p)$ получим

$$\left. \begin{aligned} \tau_n &= -\frac{\Delta n \partial t}{\partial(\Delta n)} \\ \tau_p &= -\frac{\Delta p \partial t}{\partial(\Delta p)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Если рекомбинация происходит при непосредственном соединении неравновесных электрона и дырки, то

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Как видно из последнего уравнения, электроны и дырки имеют одинаковые время жизни, т.е.

$$\tau_n = \tau_p \quad (14)$$

В примесных полупроводниках падающий свет генерирует электроны и дырки за счет ионизации атомов основного вещества и примеси. Вследствие разницы в концентрации неосновных носителей заряда, в данном случае электронов, на поверхности и в объеме, происходит их диффузия в глубь полупроводника, создавая при этом в глубине полупроводника объемного отрицательного заряда. Одновременно будут подтягиваться в глубь и дырки вследствие максвелловской релаксации, и в объеме полупроводника сохраняется условие электронейтральности. При диффузии в глубь полупроводника электроны и дырки будут рекомбинировать. В результате чего их концентрация будет уменьшаться, т.е.

$$\Delta n = (\Delta n_0) e^{-\frac{x}{L_n}} \quad (15)$$

где x – глубина, см;

L_n -диффузионная длина, на которой избыточная концентрация неравновесных носителей заряда (электроны) уменьшится в e раз.

Число рекомбинирующих пар (электронов и дырок) выражается формулой

$$R_0 = \gamma n p \quad (16)$$

где γ – коэффициент рекомбинации, м³/с.

Поскольку n и p содержат также числа равновесных электронов n_0 и дырок p_0 , учитывается и их рекомбинация. Поскольку при малом уровне инжекции $\Delta n = \Delta p$, имеем

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (17)$$

где

$$\tau_n = \frac{1}{\gamma(n_0 + p_0)} \quad (18)$$

Если уровень инжекции высокий, то

$$\tau_n = \frac{1}{\gamma \Delta n} \quad (19)$$

Для полупроводника с пренебрежимо малой примесью (собственный полупроводник) $n_v = p_v = N_i$ и время жизни носителей заряда определяется формулой

$$\tau_{ir} = \frac{1}{2\gamma n_i}$$

Для полупроводника с донорной примесью [$n_0 \gg p_0$]

$$\tau_n = 2 \frac{n_i}{n_0} \tau_{in}, \quad (20)$$

а для полупроводника с акцепторной примесью ($p_0 \gg n_0$)

$$\tau_p = 2 \frac{n_i}{p_0} \tau_{ip} \quad (21)$$

Проведенные теоритические расчеты показывают, что с увеличением степени легирования время жизни неосновных носителей заряда уменьшается. Например, для сильно легированного кремния ($n_0 \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$) она составляет

$$\tau_{n=50\text{мкс}}$$

а когда $n_0 \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$

$$\tau_{n=500\text{мкс}}$$

Наряду с этим, с ростом температуры возрастает тепловая скорость носителей заряда v_0 .

С ростом температуры ширина запрещенной зоны изменяется. Как показывают расчеты, при повышении температуры кристалла кремния от 0 К до 300 К ширина запрещенной зоны уменьшается с 1.16 эВ до 1.08 эВ. Причиной этого является рост амплитуды тепловых колебаний атомов решетки и изменение межатомных расстояний, что приведет к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда.

Преднамеренное добавление примеси создают уровни захвата и рекомбинации в запрещенной зоне и с ростом концентрации примеси время жизни неосновных носителей заряда уменьшаются.

На основании вышеприведенных можно заключить, что время жизни неосновных носителей заряда в полупроводниках зависит от концентрации примеси и температуры.

Список литературы

1. Таиров Ю.М. Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов.-М.: Высшая школа,1990,423 с.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: Энергия,1976,416 с.
3. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков.-м.: Высшая школа,1977,448 с.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники.-М.: Советское радио 1971,976 с.
5. Стилбанс Л.С Физика полупроводников.-М.: Советское радио,1967,365 с.