

И. Ф. ЧЕРВОНЫЙ, докт. техн. наук, проф, зав. каф., ЗГИА, Запорожье
Н. И. СТРОИТЕЛЕВА, канд.техн.наук, доц., ЗГИА, Запорожье
С. Г. ЕГОРОВ, канд.техн.наук, доц., ЗГИА, Запорожье
Р. М. ВОЛЯР, ст.викл., ЗГИА, Запорожье

МЕХАНИЗМ УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Розглянуто механізм підвищення часу життя нерівноважних носіїв заряду в монокристалах кремнію при використанні початкової сировини з підвищеним вмістом домішок.

Ключові слова: кристал, вирощування, метод Чохральського, домішка, час життя нерівноважних носіїв заряду.

Рассмотрен механизм повышения времени жизни неравновесных носителей заряды в монокристаллах кремния при использовании исходного сырья с повышенным содержанием примесей.

Ключевые слова: кристалл, выращивание, метод Чохральского, примесь, время жизни неравновесных носителей заряды.

The mechanism of increase of the non-equilibrium charge carrier lifetime in silicon monocrystals at use of initial raw materials with the increased content of impurity is considered.

Key words: crystal, growth, method Chohralsky, impurity, non-equilibrium charge carrier lifetime.

В настоящее время основное количество фотоэлектрических преобразователей изготавливается на основе монокристаллического кремния. Примерно 90 % себестоимости кремниевого фотоэлектрического преобразователя составляет стоимость кремниевой пластины [1]. Именно поэтому в мире ведутся интенсивные изыскания способов снижения себестоимости кремния, пригодного для изготовления солнечных элементов. Основным современным методом выращивания монокристаллов кремния для солнечной энергетики является метод Чохральского, а сырьем – поликристаллический кремний, полученный методом водородного восстановления трихлорсилана. Поликристаллический кремний для фотоэлектрических преобразователей получают различными методами из высокочистого рафинированного технического кремния. Обычно технический кремний после очистки по хлоридной или моносилановой технологии используется как сырьё для производства поликристаллического кремния, из которого затем выращивают монокристаллы кремния. Содержание кремния в таком техническом кремнии, произведенном восстановлением кремнезёма в электрических печах, не превышает 96...99 % [2].

В связи с дефицитом поликристаллического кремния на мировом рынке реализуются различные марки поликристаллического кремния, сильно отличающиеся по технологии изготовления, концентрации примесей, а также цене. Монокристаллы кремния для солнечной энергетики выращивают из наиболее дешёвого, зачастую менее чистого сырья, включая некондиционные части кристаллов различных марок, выращенных другими способами.

Для исследования влияния примесного состава исходного кремниевого сырья на величину времени жизни неравновесных носителей заряда выращивались монокристаллы кремния с кристаллографической ориентацией [100], р-типа электропроводности, легированные бором с удельным электрическим сопротивлением (0,5...1,7) Ом·см (концентрация бора от $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), диаметром 150 мм и длиной до 800 мм. Выращивание кристаллов производилось в промышленных условиях по методу Чохральского в установках типа «Редмет-30» в вакууме при протоке инертного газа аргона. Выращивание кристаллов осуществлялось при следующих технологических режимах: скорость выращивания составляла 1,8 мм/мин в начале процесса и 0,7 мм/мин в конце процесса выращивания, скорость вращения тигля - 5 об/мин, скорость вращения кристалла - 15 об/мин, расход инертного газа аргона составлял 30 л/мин, масса загруженного сырья - 40 кг, диаметр кварцевого тигля - 356 мм.

При выращивании кристаллов кремния солнечных марок, используемых для изготовления фотоэлектрических преобразователей, применяют исходное сырье с повышенным содержанием примесей (общая концентрация примесей около $5 \cdot 10^{17} \text{ ат/см}^3$). В процессе проведения исследований было установлено, что снижение скорости охлаждения монокристалла кремния от 10 до 0,5 град/мин обеспечивает увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда.

В то же время из литературных данных [3] известно, что подобный эффект – увеличения времени жизни неравновесных носителей заряда - достигается при повышенных скоростях охлаждения кристаллов (20...30 град/мин). Однако данный эффект достигается для монокристаллов кремния с малым содержанием примеси (менее $1 \cdot 10^{17} \text{ ат/см}^3$).

Установленные в процессе исследований и по данным работы [3] закономерности представлены на рис. зависимостью времени жизни неравновесных носителей заряда от скорости охлаждения монокристалла. На приведенной зависимости можно выделить два участка. Первый участок (№1), являющийся результатом выполненных исследований и характеризуется увеличением времени жизни неравновесных носителей заряда при снижении скорости охлаждения, несмотря на повышенное содержание примеси в монокристаллах кремния.

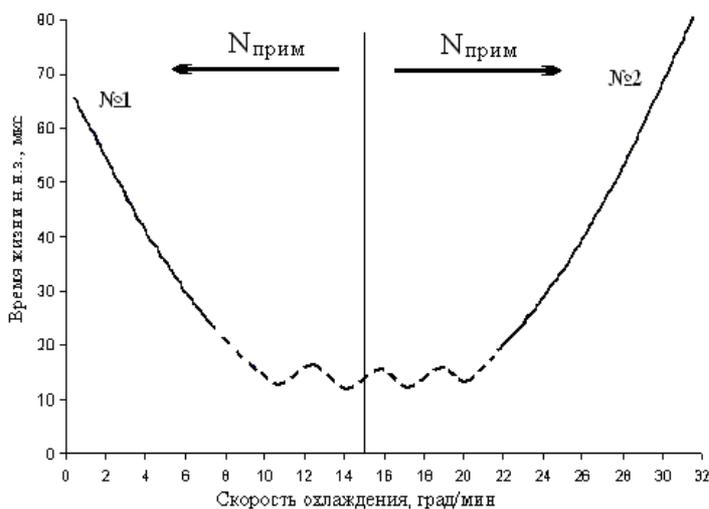


Рис. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда (н.н.з.) от скорости охлаждения (пунктиром обозначена область, которая требует дополнительных исследований)

Второй участок (№2) является результатом исследований, представленных в работе [3] и показывает, что увеличение скорости охлаждения слитка кремния обеспечивает увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда,

однако это достигается при более низкой общей концентрации примесей. При этом видно, что с увеличением общей концентрации примеси величина времени жизни неравновесных носителей заряда уменьшается, несмотря на снижение скорости охлаждения.

Известно также, что присутствие микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния обуславливает появление дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, влияя тем самым на его электрофизические свойства [4]. Однозначная интерпретация энергетических уровней, связанных с наличием структурных дефектов в кристалле, встречает серьезные затруднения, обусловленные тем, что, как правило, в выращенных и термообработанных кристаллах микродефекты присутствуют в виде различных комплексов с соответствующими примесями. Установлено [5], что такие комплексы являются эффективными центрами рассеяния и рекомбинации в монокристаллическом кремнии, существенно влияющими на подвижность и время жизни носителей заряда. Исследования электрической активности микродефектов в бездислокационном кремнии до и после термообработки [5] показали, что электрически активными являются только декорированные примесями микродефекты. Декорирование происходит как при росте кристалла, так и в процессе его отжига. Возрастание электрической активности микродефектов вследствие осаждения на них различных примесей наблюдается при возрастании температуры отжига, а также при увеличении уровня легирования монокристалла.

Величина времени жизни носителей заряда определяется эффективным сечением σ и концентрацией N_t центров рассеяния, а также скоростью движения носителей заряда v_0 [6]:

$$\tau = \frac{1}{\sigma N_t v_0}, \quad (1)$$

где σ – сечение захвата, м²;

N_t – концентрация центров рассеивания, м⁻³;

v_0 – тепловая скорость движения носителей заряда, м/с.

Центром рассеяния в полупроводнике является любая неоднородность кристалла, искажающая периодичность поля решетки. Из-за малой энергии ионизации большая часть примесных атомов, присутствующих в выращенном кристалле кремния, находится в ионизированном состоянии даже при комнатных температурах. Каждый ион примеси создает вокруг себя электрическое поле и представляет собой центр рассеяния для движущихся носителей заряда. Время жизни носителей заряда при рассеянии на ионах примеси в полупроводниках описывается формулой Конвелл-Вайскопфа [7]:

$$\tau = \frac{\epsilon^2 \sqrt{2m^*} (kT)^{3/2} E^{3/2}}{\pi e^4 N_t \lg \left(1 + \frac{\epsilon E}{e^2 N_t^{1/3}} \right)}, \quad (2)$$

где ϵ - диэлектрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

E – приведенная энергия носителей заряда, эВ;

m^* - эффективная масса, кг;

k – постоянная Больцмана ($8,65 \cdot 10^{-5}$ эВ/К);

e – заряд электрона, ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

T – температура, К.

Учитывая зависимость (1) и (2), увеличение времени жизни носителей заряда при уменьшении скорости охлаждения выращенного монокристалла с повышенным содержанием примеси (участок №1 на рис. 1) можно объяснить следующим образом. Низкая скорость охлаждения кристалла способствует ускоренному комплексообразованию примесных дефектов в кремнии. Такой процесс кластеризации приводит одновременно к снижению концентрации рассеивающих центров N_t и к росту величины эффективного сечения рассеяния σ . Очевидно, снижение концентрации рассеивающих центров вносит значительный вклад в увеличение величины времени жизни носителей заряда.

В работе [8] установлено, что длительная термообработка выращенного слитка кремния приводит к уменьшению концентрации образовавшихся вначале более глубоких уровней вплоть до полного их исчезновения, а также к одновременному возникновению более мелких уровней. Сечение захвата таких мелких центров на 6 порядков меньше, чем у глубоких центров [7]. Таким образом, медленное охлаждение выращенного кристалла так же, как и длительная термообработка, может способствовать возникновению мелких центров рассеяния в запрещенной зоне, имеющих крайне малые величины сечений захвата σ .

Известно также [3], что резкое охлаждение фиксирует некоторую часть избыточных вакансий в кристалле с небольшим количеством примеси. В этом случае рост величины времени жизни носителей заряда (участок № 2 на рис.1) можно объяснить малой величиной эффективного сечения захвата σ при невысокой концентрации рассеивающих центров (точечных дефектов).

Таким образом при выращивании монокристаллов кремния для солнечной энергетики при использовании исходного сырья с повышенным содержанием примесей, с целью повышения величины времени жизни неравновесных носителей заряда целесообразно во время процесса выращивания снижать скорость охлаждения кристалла кремния до 0,5...1,0 град/мин, в зависимости от качества исходного сырья.

Список литературы: 1.Червоний, І. Ф. Напівпровідниковий кремній: теорія і технологія виробництва [Текст] : монографія / І. Ф. Червоний, В. З. Куцова, В. І. Пожуєв, Є. Я. Швець, О. А. Носко, С. Г. Єгоров, Р. М. Воляр ; під заг. ред. І. Ф. Червоного. – Вид. 2-е, допр. і перер. – Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2009. – 488 с. – Бібліогр. : 446-484. – 300 прим. – ISBN 978-966-8462-24-5. 2.Таран, Ю. Н. Полупроводниковый кремний: теория и технология производства [Текст] : монография / Ю. Н. Таран , В. З. Куцова, И. Ф. Червоний, Е. Я. Швец, Э. С. Фалькевич – Запорожье : ЗГИА, 2004. – 343 с. : рис., табл. – Библиогр.: с. 317-342. – 300 экз. – ISBN 966-7101-61-4. 3.Фалькевич, Э. С. Технология полупроводникового кремния [Текст] : монография / [Э. С. Фалькевич, Э. О. Пульнер, И. Ф. Червонный, Л. Я. Шварцман, В. Н. Яркин, И. В. Салли ; под ред. Э. С. Фалькевича. – М. : Металлургия, 1992. – 407 с. – Библиогр.: с. 399-407. – ISBN 5-229-00740-0. 4.Матаре, Г. Электроника дефектов в полупроводниках [Текст] / Г. Матаре ; пер. с англ. Г. М. Гуро ; под ред. проф. С. А. Медведева. – М. : Мир, 1974. – 463 с. : ил. ; 22 см. – Списки лит. в конце глав. – Доп. тит. л.: Defect electronics in semiconductors. Herbert F. Matare 5.Шейхет, Э. Г. Электрическая активность микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния [Текст] / Э. Г. Шейхет, В. Ф. Латышенко, В. Н.

Назаренко // УФЖ. – 1982. – Т. 27, №11. – С. 1679-1684. – Библиогр.: с. 1684. **6. Фистуль, В. И.** Введение в физику полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. И. Фистуль – М. : Высшая школа, 1975. – 296 с. – Списки лит. в конце глав. – 19000 экз. **7. Бонч-Бруевич, В. Л.** Физика полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 672 с. : ил. ; 22 см. – Библиогр.: с. 666-669. **8. Неймаш, В. Б.** Электрические свойства кремния, термообработанного при 530 °С и облученного электронами [Текст] / В. Б. Неймаш, В. М. Сирацкий, А. Н. Крайчинский, Е. А. Пузенко // ФТП, 1998, Т. 32, № 9 - С. 1049-1053. – Библиогр.: с. 1053.

Поступила в редколлегию 16.11.2011

УДК 577.43:539.163

Л.И. ЛУКИНА, асп. СНУЯдерной Энергии и Промышленности,
Севастополь

Н.П. ЧЕРНИКОВА, канд.техн.наук, доц., СНУЯдерной Энергии и
Промышленности, Севастополь

Ю.Ю. СТОЛЯРЧУК асп. СНУЯдерной Энергии и Промышленности,
Севастополь

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО ИНГАЛЯЦИОННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ С РАСЧЕТОМ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ПОСТУПЛЕНИЯ

На основе данных персонального мониторинга воздушной среды (МВС) проведена оценка возможного ингаляционного поступления с расчетом эффективной дозы внутреннего поступления радионуклидов в помещениях постоянного пребывания персонала на объекте «Укрытие» (ОУ) и при производстве радиационно-опасных работ на ОУ.

Ключевые слова: объект «Укрытие», радионуклиды, респиратора 3М, эффективная доза внутреннего облучения.

На основі даних персонального моніторингу повітряного середовища (МВС) проведена оцінка можливого інгаляційного надходження з розрахунком ефективної дози внутрішнього надходження радіонуклідів в приміщеннях постійного перебування персоналу на об'єкті «Укриття» (ОУ) і при виробництві радіаційно-небезпечних робіт на ОУ.

Ключові слова: об'єкт «Укриття», радіонукліди, респіратор 3М, ефективна доза внутрішнього опромінення.

On the basis of personal air monitoring (AIM) evaluated possible inhalation of the calculation of effective dose of internal radionuclides in the premises of the permanent staff on the object “Shelter” and during making radiation-hazardous work at the object “Shelter”.

Key words: object “Shelter”, radionuclides, 3M respirator, the effective dose of internal radiation.

Введение

Персонал ОУ работает в условиях повышенной опасности, обусловленной высоким фоном радиоактивности пыли, мелкодисперсных веществ и оборудования, находящего внутри ОУ в виде топливо-содержащих материалов (ТСМ). Однако индивидуальный дозиметрический контроль не учитывает наличия в рабочей зоны трансурановых элементов (ТУЭ) - альфа-излучателей, которые являются наиболее опасными при внутреннем облучении. Поэтому