

Исследуются возможности использования безэлектродных индукционных бактерицидных разрядных ламп в облучательных установках широкого спектра применения. Предлагается «нерезонансный» метод инициирования высокочастотного разряда в безэлектродных индукционных лампах, гарантирующий надёжное их зажигание независимое от возможных отклонений рабочей частоты.

**Ключевые слова:** безэлектродная лампа, энергоэкономичность, высокочастотный разряд, бактерицидное воздействие, нерезонансный метод инициирования, контур ударного возбуждения, отклонение частоты, надёжность зажигания разряда.

The article is the exploring the prospects of using electroless bactericidal induction lamps in wide range of lighting equipment. In particular it covers non-resonant method exciting of exciting performed by high frequency electrical potential, which is highly reliable wayto illuminate the lamp, and unaffected by frequency changes in igniting circuits.

**Keywords:** Electroless Lamp, Low energy consumption, high frequency electrical potential, non-resonant method of exciting, circuit of impact excitation, bactericidal lamps, frequency changes, exciting reliability, ignition reliability.

**УДК 621.315.592**

**И. Ф. ЧЕРВОНЫЙ**, д-р техн. наук, проф., ЗГИА, Запорожье;

**Ю. В. РЕКОВ**, аспирант, ген. дирек. ЧАО «Завод полупроводников», Запорожье;

**О. П. ГОЛОВКО**, канд. техн. наук, доц., ЗГИА, Запорожье

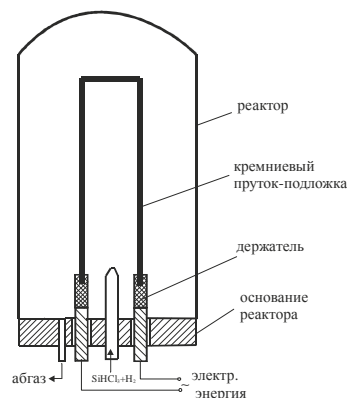
### **ПРОЦЕСС ВОДОРОДНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРИХЛОРСИЛАНА**

Представлены результаты теоретического исследования о предварительном нагреве прутков-подложек в процессе водородного восстановления трихлорсилана – «Siemens-процесса». Обсуждаются применение легированных прутков-подложек для производства поликристаллического кремния с заданным уровнем концентрации легирующей примеси. В режиме генерации собственных носителей заряда, при нагревании кремния полупроводниковой чистоты в кристаллической решетке генерируются собственные носители заряда, которые обеспечивают определенную, в зависимости от температуры, электрическую проводимость. При использовании легированных прутков-подложек осуществляется расчет концентрации заданного типа примеси, с учетом величины наращенного слоя поликристаллического кремния и перераспределения примеси между прутком-подложкой и объемом получаемых стержней поликристаллического кремния.

**Ключевые слова:** кремний; прутки-подложки; носители заряда; легирование; нагрев; примеси.

#### **Введение**

Основным процессом водородного восстановления трихлорсилана в настоящее время является «Siemens-процесс». Сущность этого процесса заключается в монтаже в реактор кремниевых прутков-подложек, их разогреве до температуры ~1500 К и последующее водородное восстановление трихлорсилана на поверхности прутков-подложек (рис. 1). Разогрев прутков-подложек производится постоянным током [1, 2]. Учитывая, что для водородного восстановления трихлорсилана используют прутки-подложки из чистого кремния полупроводникового качества, для обеспечения первичного прохождения по ним тока необходимо создать достаточно высокую



**Рис. 1 - Схема монтажа прутков-подложек в реакторе**

© И. Ф. ЧЕРВОНЫЙ, Ю. В. РЕКОВ, О. П. ГОЛОВКО, 2013

проводимость. Это достигается введением определенного количества примеси или нагревом прутков-подложек до температуры, которая обеспечит требуемую проводимость тока [1, 3, 4, 5].

### **Цель работы**

Целью работы являлось исследование разогрева кремниевых прутков-подложек в период начала процесса водородного восстановления хлорсиланов.

### **Состояние вопроса и анализ проведенных исследований**

Введение примеси в прутки-подложки приводит к легированию этими примесями выращиваемых на них поликристаллического кремния, что не обеспечивает требуемый уровень чистоты поликристаллического кремния. Дополнительным вариантом обеспечения высокой проводимости прутков-подложек может служить генерация собственных носителей заряда за счет нагрева прутков-подложек. Генерация собственных носителей заряда, с учетом определенного количества легирующей примеси, обеспечивает суммарное количество носителей, которое создает необходимую проводимость прутков-подложек и их нагрев при пропускании электрического тока.

### **Расчет необходимых условий создания заданной проводимости прутков-подложек.**

Расчет проводится для одного прутка-подложки.

Исходные данные:

$d$  - диаметр прутка-подложки, м –  $d=8 \cdot 10^{-3}$  м;

$T_n$  - температура начальная, К –  $T_n=300$  К;

$T_k$  - температура конечная, К –  $T_k=1500$  К;

$L$  - длина прутка-подложки, м –  $L=4,6$  м.

Для нагрева прутка-подложки необходимо затратить тепла

$$Q = c \cdot m \cdot (T_k - T_n), \quad (1)$$

где  $c$  - теплоемкость кремния, Дж/(кг·К) –  $c=800$  Дж/(кг·К) ;

$m$  – масса прутка-подложки, кг.

$$m = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L \cdot \gamma, \quad (2)$$

где  $\gamma$  - плотность кремния, кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma=2330$  кг/м<sup>3</sup>.

$$m = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L \cdot \gamma = \frac{3,14 \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 4,6 \cdot 2330 = 0,538 \text{ кг},$$

$$Q = c \cdot m \cdot (T_k - T_n) = 800 \cdot 0,538 \cdot 1200 = 516933,43 \text{ Дж} = 516,93 \text{ кДж}.$$

Рассчитанное количество тепла можно обеспечить электрическим нагревом. Применяя закон Джоуля-Ленца, количество тепла обеспечивается

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока, А;

$R$  – величина электрического сопротивления прутка-подложки, Ом;

$t$  – время нагрева, с.

Для установления электрической мощности для нагрева прутка-подложки воспользуемся преобразованием закона Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{IU}{R} \cdot R \cdot t = I \cdot U \cdot t.$$

Для расчета принимаем время нагрева  $t=100$  с. В этом случае

$$Q = I \cdot U \cdot t = 516933,43 = I \cdot U \cdot 100,$$

откуда

$$I \cdot U = \frac{516933,43}{100} = 5169,33 \text{ Вт} = 5,17 \text{ кВт}.$$

Таким образом, для нагрева прутка-подложки с заданными исходными характеристиками необходимо затратить 5169,33 Вт электроэнергии. Выбор величин тока и напряжения определяется энергоснабжением пердела водородного восстановления, см. рис. 2.

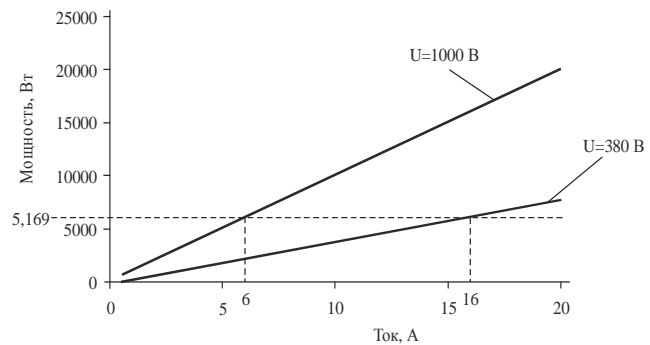


Рис. 2 - Зависимость мощности от выбранных величин силы ток и напряжения

Выбрав величины тока и напряжения, производится

определение величины электрического сопротивления прутка-подложки.

При выборе силы тока 6 А и напряжения 1000 В, из уравнения (3) следует

$$R = \frac{Q}{I^2 \cdot t} = \frac{5169,33}{6^2 \cdot 100} = 1,44 \text{ Ом},$$

что соответствует величине удельного электрического сопротивления  $1,57 \cdot 10^{-3}$  Ом·см или концентрации носителей заряда n-типа электропроводности  $2,75 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Рассчитанную величину электрического сопротивления прутка-подложки можно создать двумя вариантами – генерацией собственных носителей заряда или введением в прутки-подложку необходимого количества легирующего элемента. Рассмотрим каждый вариант отдельно.

**Генерация собственных носителей заряда [6].** При нагревании кремния полупроводниковой чистоты в кристаллической решетке генерируются собственные носители заряда, которые обеспечивают определенную, в зависимости от температуры, электрическую проводимость. Зависимость концентрации собственных носителей заряда от температуры выражается следующим соотношением

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (4)$$

где  $N_c$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости,  $\text{см}^{-3}$ ,

$N_v$  – эффективная плотность состояний в валентной зоне,  $\text{см}^{-3}$ ,

$\Delta E$  – ширина запрещенной зоны, эВ,  $\Delta E = 1,1$  эВ,

$k$  – постоянная Больцмана,  $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К,

$T$  – температура, К.

$$N_c = \left(\frac{2\pi \cdot m_n^* \cdot k \cdot T}{h^2}\right) = 5,42 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2},$$

$$N_v = \left(\frac{2\pi \cdot m_p^* \cdot k \cdot T}{h^2}\right) = 2,02 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2},$$

где  $m_n^*$  – эффективная масса электрона,  $m_n^* = 1,08m_e$ , кг,

$m_p^*$  – эффективная масса электрона,  $m_p^* = 0,56m_e$ , кг,

$m_e$  – масса покоя электрона, кг,  $m_e = 9,10938291 \cdot 10^{-31}$  кг,

$h$  – постоянная Планка, Дж/с,  $h = 1,38 \cdot 10^{-34}$  Дж/с.

Подставляя приведенные данные в уравнение (4), получим величину концентрации собственных носителей заряда в зависимости от температуры

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) = 3,31 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{1,1}{2 \cdot 8,62 \cdot 10^{-5} T}\right), \text{ см}^{-3}.$$

Результаты расчета концентрация собственных носителей заряда приведены в табл. и на рис. 3.

Таблица - Результаты расчета концентрация собственных носителей заряда

Температура, К	Концентрация собственных носителей заряда, см <sup>-3</sup>
300	9,97·10 <sup>9</sup>
400	3,13·10 <sup>12</sup>
500	1,06·10 <sup>9</sup>
600	1,17·10 <sup>15</sup>
700	6,74·10 <sup>15</sup>
800	2,57·10 <sup>16</sup>
900	7,45·10 <sup>16</sup>
1000	1,77·10 <sup>17</sup>
1100	3,65·10 <sup>17</sup>
1200	6,75·10 <sup>17</sup>
1300	1,15·10 <sup>18</sup>
1400	1,82·10 <sup>18</sup>
1500	2,73·10 <sup>18</sup>

Как видно из таблицы и рис. 3, начиная с температуры 800 К, происходит генерация собственных носителей заряда, которая возрастает по экспоненциальному закону. При температуре 1500 К концентрация носителей заряда достигает выбранной силы тока 6А и напряжению 1000 В. Предварительный нагрев прутков-подложек обеспечивается дополнительным нагревателем, например, плазменным или инфракрасным.

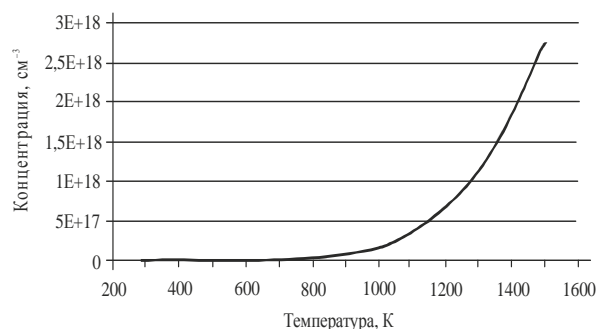


Рис. 3 - Зависимость концентрации собственных носителей заряда от температуры

Следует отметить, что рассмотренный вариант (генерация собственных носителей заряда) не учитывает наличие легирующих примесей в прутке-подложке, и поэтому допускает применение не легированных (с высокой степенью чистоты) исходных прутков-подложек.

**Применение легированных прутков-подложек [1, 3, 4].** Рассмотрим выбор электрофизических характеристик прутка-подложки. Исходя из зависимости

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

получим

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление, Ом·м,

$S$  - площадь поперечного сечения прутка-подложки, м<sup>2</sup>.

Из выполненного для выбранных величин тока и напряжения расчета, сопротивление прутка-подложки составило 1,44 Ом ( $R=1,44$  Ом). Величина удельного электрического сопротивления составит

$$\rho = R \frac{S}{L} = R \frac{\frac{\pi}{4} d^2}{L} = 1,44 \cdot \frac{0,785(8 \cdot 10^{-3})^2}{4,6} = 1,31 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Такая величина удельного электрического сопротивления соответствует глубокому легированию кремния, одновременно обеспечивая стартовый разогрев прутков-подложек без применения дополнительной операции предварительного разогрева прутков-подложек.

Концентрации примеси в рассматриваемом случае соответствует:

для примеси n-типа электропроводности

$$n_n = \frac{1}{e \cdot \rho \cdot \mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1450} = 2,75 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3},$$

для примеси p-типа электропроводности

$$n_p = \frac{1}{e \rho \mu_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot 450} = 8,85 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3},$$

где  $n_n$  – концентрация примеси n-типа (электронной) электропроводности,  $\text{см}^{-3}$ ,

$n_p$  – концентрация примеси p-типа (дырочной) электропроводности,  $\text{см}^{-3}$ ,

$e$  – заряд электрона, К,  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  К,

$\mu_n$  – подвижность электронов,  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\mu_n=1450 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,

$\mu_p$  – подвижность дырок,  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\mu_p=450 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

Такая концентрация примеси является неприемлемой для получения поликристаллического кремния полупроводникового качества, а именно, в соответствии с требованиями полупроводниковой промышленности, поликристаллический кремний должен иметь не более  $4,31 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  атомов примеси для кремния n-типа электропроводности (что соответствует  $\rho_n=1000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) и  $4,63 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  атомов примеси для кремния p-типа электропроводности (что соответствует  $\rho_p=3000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ).

### Выводы

1. Для производства высокочистого поликристаллического кремния целесообразно применять операцию предварительного нагрева прутков-подложек до температуры 1500 К для генерации собственных носителей заряда и обеспечения необходимой проводимости кремния.

2. Применение легированных прутков-подложек целесообразно применять для случаев производства поликристаллического кремния с заданным уровнем концентрации заданного типа легирующей примеси.

**Список литературы:** 1. *Фалькевич, Э. С.* Технология полупроводникового кремния [Текст] / Э. С. Фалькевич, Э. О. Пульнер, И. Ф. Червоний, Л. Я. Шварцман, В. И. Яркий, И. В. Салли ; под ред. проф., докт. техн. наук Э.С. Фалькевича. – М. : Металлургия, 1992. – 408 с. – Библиогр.: с. 399-407. – 1170 экз. – ISBN 5-229-00740-0. 2. *Реньян, В. Р.* Технология полупроводникового кремния [Текст] / В. Р. Реньян ; перевод с англ. Туровского Б. М., Нашельского А. Я., Шушлебиной Н. Я., Баташева В. И. и Королькова А. Г. под ред. Шашкова Ю. М. – М. : Металлургия, 1969. – 336 с. – Библиогр.: с. 322-332. – 2300 экз. 3. *Червоний, І. Ф.* Напівпровідниковий кремній: теорія і технологія виробництва. Монографія [Текст] / І. Ф. Червоний, В. З. Куцова, В. І. Пожуєв, Е. Я. Швець, О. А. Носко, С. Г. Єгоров, Р. М. Воляр ; Під ред. докт. техн. наук, професора Червоного І.Ф. – ЗДІА, Запоріжжя, 2009. – 488 с. – Библиогр.:

с. 446-484. – 300 экз. – ISBN 978-966-8462-24-5. 4. *Нашельский, А. Я.* Технология полупроводниковых материалов [Текст] / *А. Я. Нашельский*. – М. : Металлургия, 1972. – 432 с. – Библиогр.: с. 427-429. – 4700 экз. 5. Пат. 2409518 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 01 В 33/027, С 30 В 29/06, С 30 В 30/02. Способ получения поликристаллического кремния [Текст] / *Лопатин В. В., Иванов Н. А., Солдатов А. И., Павлова М. Л.* ; Заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский политехнический университет. – 2009127216/05 ; заявл. 14.07.09 ; опубл. 20.01.2011 Бюл. № 2. – 7 с. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/images/patents/51/2409518/patent-2409518.pdf> 6. *Шалимова, К. В.* Физика полупроводников [Электронный ресурс] / *К. В. Шалимова*. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 392 с. Режим доступа: <http://physics.sibsutis.ru/docs/Library/TextBooks/Shalimova%20К.%20В.%20Physics%20Of%20Semiconductors.pdf>

*Надійшла до редколегії 20.01.2013*

**УДК 621.315.592**

**Процесс водородного восстановления трихлорсилана/ И. Ф. Червоний, Ю. В. Реков, О. П. Головкин** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 4 (978). – С. 146-151. – Бібліогр.: бнзав.

Представлені результати теоретичного дослідження про попередній нагрів прутків-підкладок в процесі водневого відновлення трихлорсилану - "Siemens-процесу". Обговорюються застосування легованих прутків-підкладок для виробництва полікристалічного кремнію із заданим рівнем концентрації легуючої домішки. У режимі генерації власних носіїв заряду, при нагріванні кремнію напівпровідникової чистоти в кристалічній решітці генеруються власні носії заряду, які забезпечують визначену, залежно від температури, електричну провідність. При використанні легованих прутків-підкладок здійснюється розрахунок концентрації заданого типу домішки, з урахуванням величини отриманого шару полікристалічного кремнію і перерозподілу домішки між прутком-підкладкою і об'ємом отримуваних стержнів полікристалічного кремнію.

**Ключові слова:** кремній; прутки-підкладки; носії заряду; легування; нагрівачи; домішки.

Presented results of theoretical research about the previous heating of slim-rods in the process of hydrogen renewal of trichlorosilane - "Siemens-process".. Applications of the alloyed slim-rods come into question for the production of polycrystalline silicon with the set level of concentration of alloying admixture. Essence of "Siemens-process" consists in editing in the reactor of the silicon slim-rods, their warming-up to the temperature ~1500 K and next hydrogen renewal of trichlorosilane on the surface of slim-rods. The warming-up of slim-rods is produced by a direct current. The size of electric resistance of slim-rods can be created by two variants - generation of own charge carriers or introduction to slim-rods of necessary amount of alloying element. In the mode of generation of own charge carriers, at heating of silicon of semiconductor cleanness own charge carriers which provide certain are generated in a crystalline grate, depending on a temperature, electric conductivity. At the use of the alloyed slim-rods the calculation of concentration of the set type of admixture is carried out, taking into account the size of the got layer of полікристалічного silicon and redistribution of admixture between slim-rods and by volume of the got bars of полікристалічного silicon.

**Keywords:** silicon; slim-rods; charge carriers; alloying; heating; admixtures.