

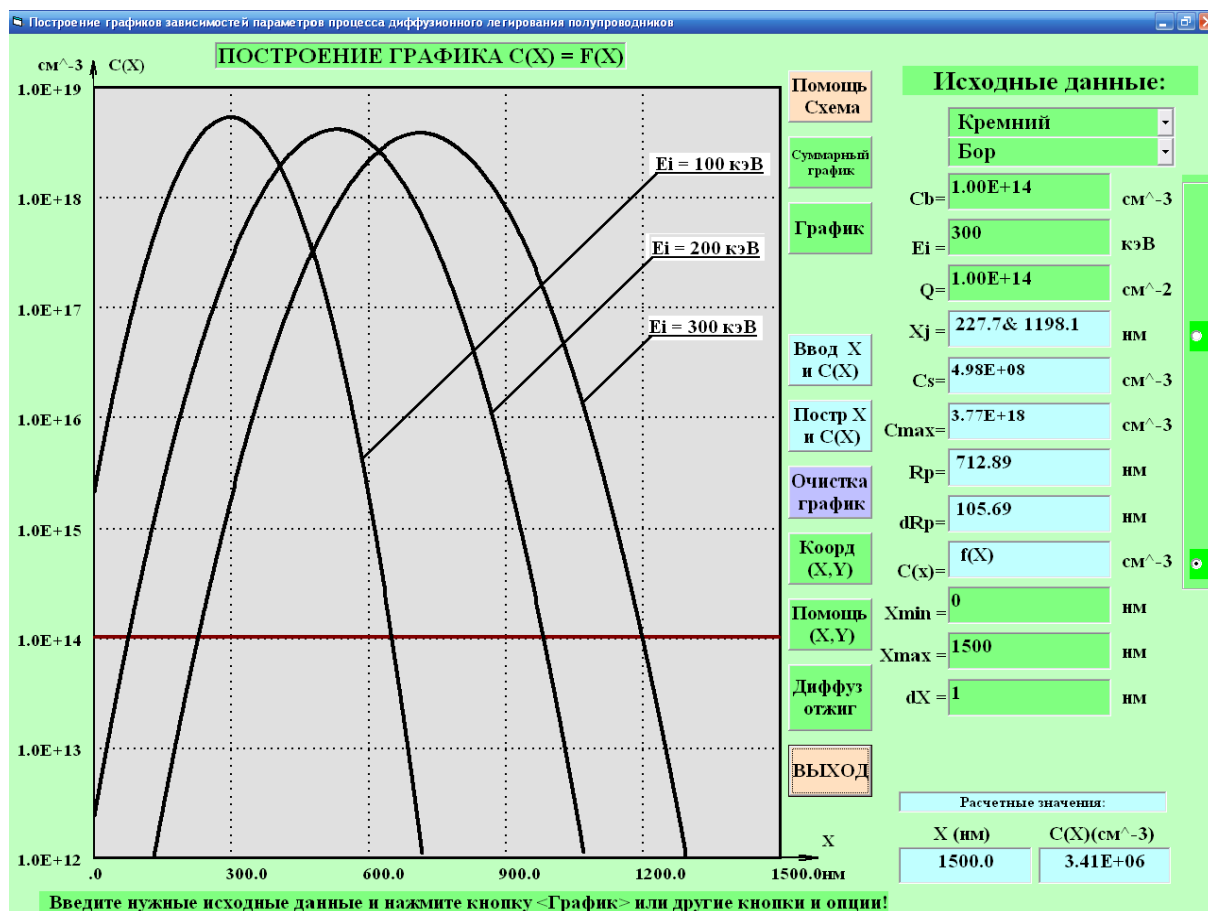
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ и НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство по образованию  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ  
(Технический университет)**

**Кафедра физических основ электронной техники**

**Методические указания к лабораторной работе по  
дисциплине «Физические основы ионно-плазменной  
технологии»**

**Конструирование заданных профилей  
распределения примеси в полупроводниках  
методом ионной имплантации**



**Москва – 2009**

*Составители канд. хим. наук, проф. Ф.И.Григорьев;  
канд. техн. наук, доцент А.А.Чернов*

*Кратко изложены возможности конструирования различных профилей распределения примеси методом имплантационного полиэнергетического легирования. Представлено описание программного обеспечения для расчета параметров процесса ионной имплантации в полупроводники различных примесей. Описана методика выполнения лабораторной работы.*

*Предназначены для студентов V-го курса специальности 210104  
“Микроэлектроника и твердотельная электроника”.*

*Конструирование заданных профилей распределения примеси в полупроводниках методом ионной имплантации: Метод. указания к лаб. работе / Московский государственный ин-т электроники и математики; Сост. Ф.И.Григорьев, А.А.Чернов. М., 2009. 24 с.*

*Ил. 11. Библиогр.: 2 назв.*

*ISBN 978-5-94506-219-1*

## Лабораторная работа

# Конструирование заданных профилей распределения примеси в полупроводниках методом ионной имплантации

### 1. Цель лабораторной работы

Целью работы является изучение возможности получения разнообразных профилей распределения примеси в полупроводниках методом полиэнергетической ионной имплантации.

### 2. Имплантационное легирование полупроводников

Развитие микро- и нано-электроники часто ставит перед разработчиками вопрос о создании тонких полупроводниковых слоев с заданным профилем распределения примеси по глубине легированного слоя. В общем случае пути решения этой задачи зависят от способа введения примеси. При диффузионном легировании единственной примесью класс профилей, доступных для конструирования, сравнительно узок, поскольку он ограничен жестким условием отрицательного градиента концентрации на любых глубинах.

Имплантационное легирование полупроводников по сравнению с диффузионным способом введения примеси представляет уникальные возможности для создания слоев с заданным профилем распределения примеси. При имплантационном легировании с фиксированной энергией ионов профиль распределения примеси, в соответствии с классической теорией ЛШШ (Линдхарда-Шарффа-Шиотта) описывается распределением Гаусса

$$C(x) = \frac{Q}{\Delta R_p \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right], \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние от поверхности в глубь мишени;

$Q$  – доза имплантации (ион/см<sup>2</sup>).

Гауссовы распределения очень удобны для быстрой оценки профилей распределения внедренной примеси. Однако во многих случаях гауссова аппроксимация экспериментальных профилей из-за их заметной асимметрии оказывается неудовлетворительной.

Одним из самых удачных вариантов построения профилей распределения с резко выраженной асимметрией является распределение

Пирсона IV. Профиль концентрации имплантированной примеси рассчитывают по формуле:

$$C(x) = 10^7 \cdot \frac{Q}{\Delta R_p \sqrt{2\pi}} \cdot F^{\text{II}}(X), \quad (2)$$

где  $F^{\text{II}}(X)$  - значение табулированной функции Пирсона с рассматриваемой асимметрией;

$$X = (x - R_p) / \Delta R_p - \text{глубина в безразмерных единицах.}$$

Поскольку при имплантационном легировании с фиксированной энергией ионов максимум концентрации примеси оторван от поверхности и глубина его однозначно определяется энергией иона, то нетрудно сделать вывод, что имплантационным методом можно конструировать профили как с отрицательным, так и с положительным градиентом концентрации.

Различные профили распределения примеси – плоский, ступенчатый, экспоненциальный с положительным градиентом, экспоненциальный с отрицательным градиентом, линейно спадающий профиль, линейно возрастающий профиль могут быть созданы методом полиэнергетической ионной имплантации, при которой используется не одно, а ряд значений энергии ионов.

Если требуется сконструировать заданный профиль  $C(x)$  путем непрерывной вариации энергии ионов и дозы, не учитывая асимметрию кривой распределения пробегов, поскольку принципиального изменения задачи этот эффект не дает, то задача записывается в виде уравнения

$$C(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{1}{\Delta R_p(E)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - R_p(E)}{\Delta R_p(E)} \right)^2 \right] Q(E) dE, \quad (3)$$

в общем виде такое уравнение не решается. Однако для практики нет нужды точно решать это уравнение, тем более что аппаратная специфика имплантационного легирования делает предпочтительным решение не в виде непрерывной функции  $Q(E)$ , а в виде дискретного набора энергий и доз, поскольку непрерывная вариация энергии и дозы может быть осуществлена только при условии автоматизации процесса ионной имплантации.

Самым простым способом реализации метода полиэнергетической ионной имплантации является многократная имплантация с дискретным изменением энергии ионов. Выбор энергии ионов определяется из тех соображений, чтобы относительное перекрытие соседних профилей было

достаточно сильным. В первом приближении это соответствует постоянному шагу по энергии в логарифмическом масштабе.

Существенным преимуществом имплантационного способа является аддитивность легирования. Это значит, что результирующий профиль при полиэнергетической ионной имплантации будет просто суперпозицией элементарных профилей моноэнергетического легирования. Осцилляции, наблюдаемые при малом перекрытии соседних профилей, могут быть сняты последующим отжигом.

Почти все практические потребности конструирования профилей легирующей примеси на глубинах меньше микрометра можно удовлетворить рассмотренным простейшим способом полиэнергетического имплантационного легирования. Ограничение этого способа заметно лишь для профилей с резким изменением градиента (ступенькой).

### **3. Описание программного обеспечения для расчета параметров процесса ионной имплантации в полупроводники**

Программное обеспечение для расчета параметров процесса ионной имплантации в полупроводники различных легирующих примесей разработано доцентом кафедры ФОЭТ Черновым А.А. для компьютеров типа IBM PC и написано на алгоритмическом языке "Visual Basic".

Программа позволяет производить расчеты основных параметров процесса ионной имплантации в полупроводники - кремний, германий и арсенид галлия различных легирующих примесей, таких как бор, фосфор, мышьяк и сурьма, для двух моделей процесса ионной имплантации, отличающихся диапазоном энергий имплантируемых ионов примеси до и более 400 кэВ соответственно. Программа позволяет рассчитать основные параметры процесса ионной имплантации, такие как:

- глубина залегания  $p_n$ -перехода –  $X_j$ ,
- концентрация легирующей примеси у поверхности полупроводника -  $C_s$ ,
- максимальная концентрация легирующей примеси в объеме полупроводника -  $C_{max}$ ,
- значение среднего нормального пробега ионов данной примеси в полупроводнике –  $R_p$ ,
- дисперсия нормального пробега -  $dR_p$ ,
- распределение концентрации имплантированной легирующей примеси в полупроводнике  $C(x)$ ,

в зависимости от заданных исходных данных. При этом исходными данными для проведения расчета являются:

- материал подложки,
- вещество легирующей примеси,

- уровень легирования подложки,
- энергия имплантируемых ионов,
- доза имплантации легирующей примеси.

Кроме того, программа позволяет рассчитать распределение концентрации имплантированной легирующей примеси в объеме полупроводника после проведения термического отжига полученной структуры, при этом исходными данными являются температура -  $T$  и время проведения процесса термического отжига имплантированной структуры.

При запуске программы пользователю предоставляется интерфейс программы, представленный на рис. 3.1.

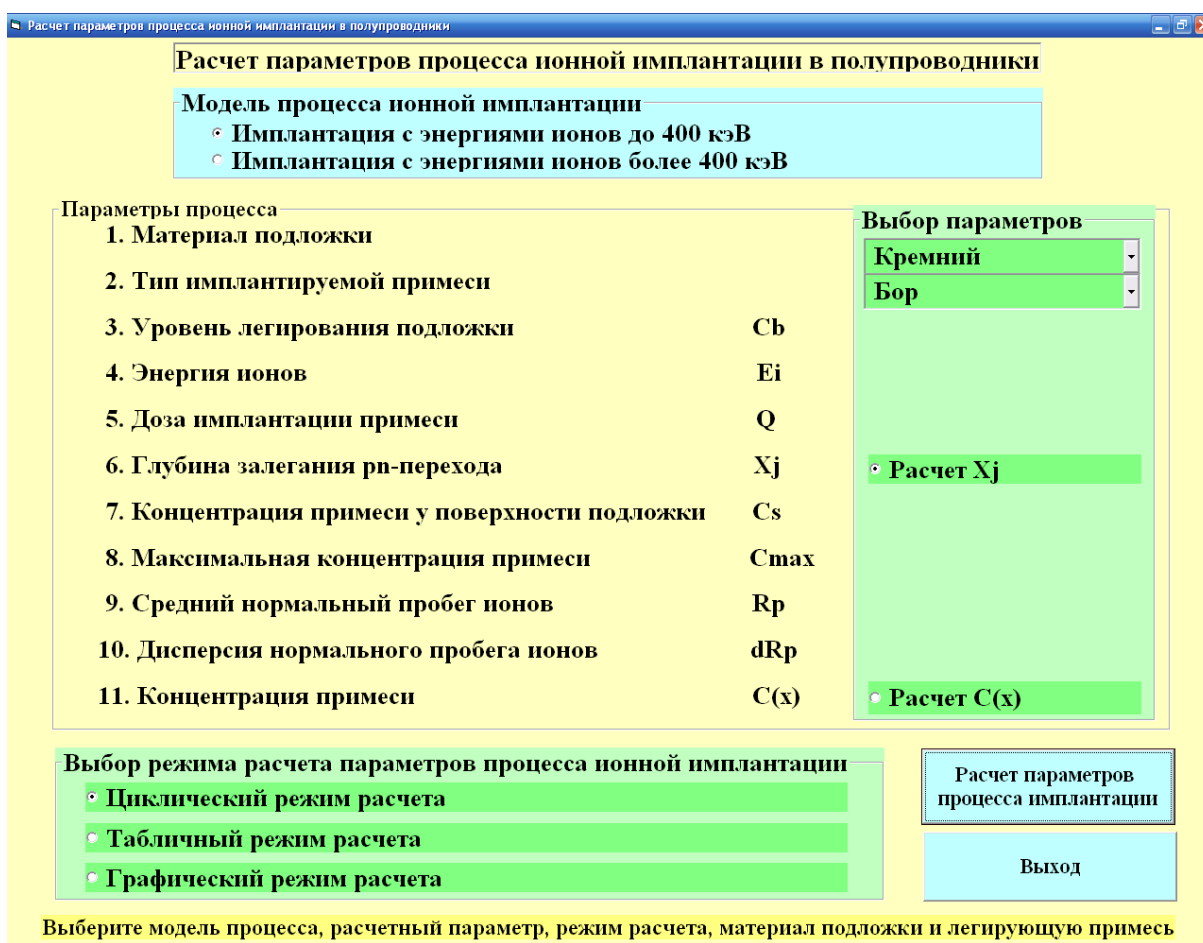


Рис.3.1. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации при запуске программы.

Пользователь имеет возможность выбрать математическую модель для расчета процесса ионной имплантации в зависимости от энергии имплантируемых ионов до или более 400 кэВ, устанавливая соответствующие опции в рамке «Модель процесса ионной имплантации». Затем в рамке «Выбор параметров» пользователь выбирает материал

подложки (кремний, германий, арсенид галлия) и тип легирующей примеси (бор, фосфор, мышьяк, сурьма). После этого выбирается один из двух возможных расчетных параметров процесса ионной имплантации:

- глубина залегания рп-перехода -  $X_j$ ;
- концентрация легирующей примеси -  $C(x)$  на заданной пользователем глубине  $x$  от поверхности подложки.

Далее пользователь может выбрать один из трех возможных режимов работы программы:

1. Циклический режим расчета.
2. Табличный режим расчета.
3. Графический режим расчета.

В циклическом режиме расчета пользователь имеет возможность многократно вычислять значение выбранного расчетного параметра, изменяя значения исходных данных.

В табличном режиме расчета на экран выводится таблица значений выбранного расчетного параметра в заданном пользователем диапазоне значений одного из параметров процесса ионной имплантации. Например, могут быть рассчитаны таблицы зависимостей глубины залегания рп-перехода от энергии ионов  $E_i$ , то есть функция  $X_j = f(E_i)$ , или значения концентрации примеси  $C$  от расстояния до поверхности подложки  $x$ , то есть функция  $C = f(x)$ , в заданном пользователем диапазоне изменения аргумента.

В графическом режиме расчета на экран выводится графики зависимостей выбранного расчетного параметра от одного из параметров процесса диффузии в заданном пользователем диапазоне значений. При этом, на экран дисплея могут быть выведены несколько графиков выбранной зависимости при различных значениях варьируемых пользователем параметрах процесса. После выбора режима расчета пользователю необходимо нажать на кнопку «Расчет параметров процесса имплантации».

Во всех режимах работы программы при вводе пользователем значений параметров за пределами их допустимых значений на экран дисплея выдаются соответствующие комментарии. При этом в случае выхода значения расчетного параметра за предел допустимых значений по физическим или технологическим критериям оно отображается в поле вывода, в таблице или на графике красным цветом. Для сокращения времени ввода значений исходных данных в программе по умолчанию данным присваивается заданные в программе значения, а при изменении их пользователем - сохраняются текущие значения параметров. В любом режиме работы программы предусмотрены возможность изменения расчетного параметра и выход в основное меню.

В любом режиме расчета поля ввода исходных данных пользователем окрашены в зеленый цвет, а поля вывода расчетных данных окрашены в голубой цвет.

Интерфейс программы в циклическом режиме расчета представлен на рис.3.2. В циклическом режиме расчета пользователь имеет возможность изменять введенные значения исходных параметров и расчетный параметр.

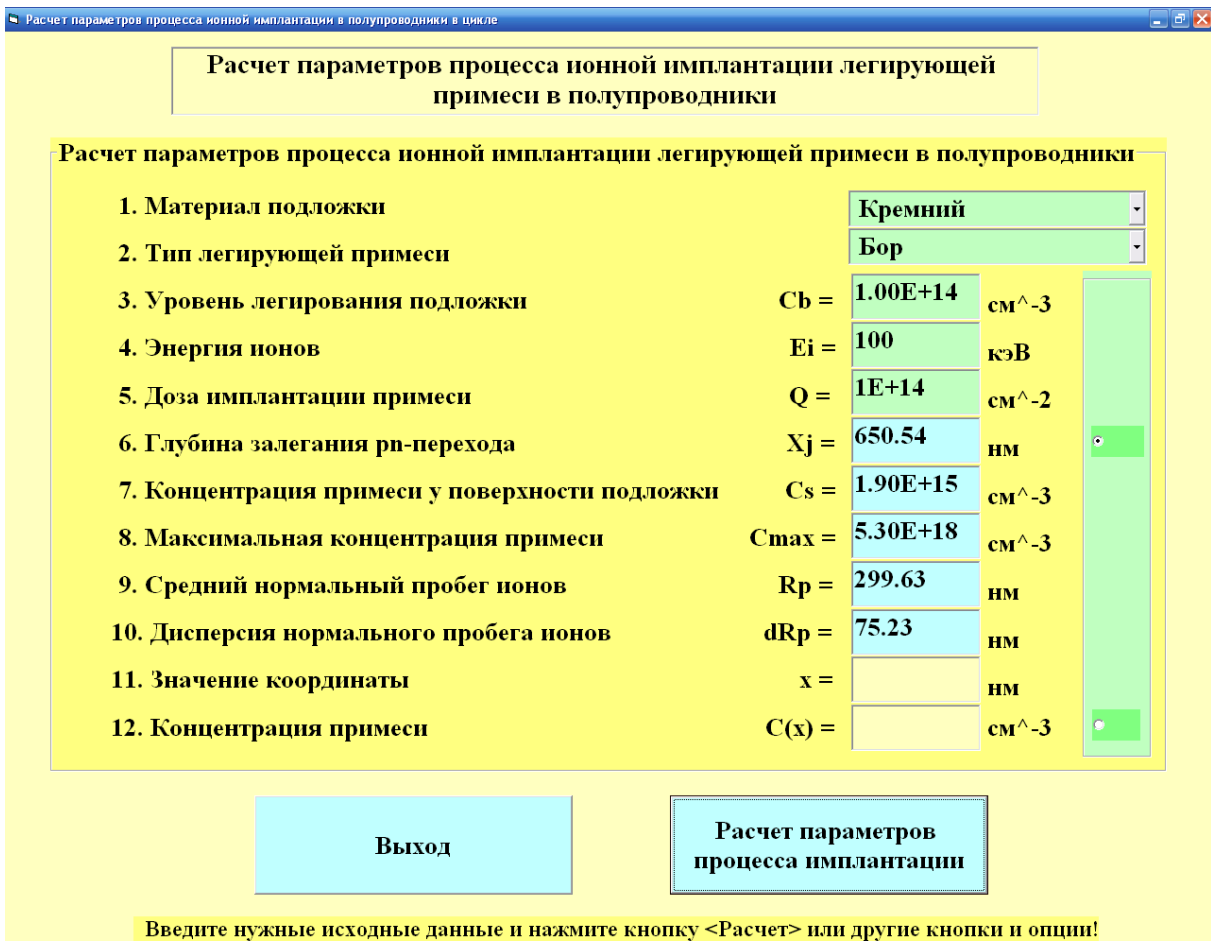


Рис.3.2. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации в циклическом режиме работы при расчете значения глубины залегания рп-перехода -  $X_j$ .

Пример расчета значения глубины залегания рп-перехода -  $X_j$ , а также значений нормального среднего пробега ионов бора в кремнии -  $R_p$ , дисперсии нормального пробега -  $dR_p$ , концентрации примеси у поверхности подложки -  $C_s$ , максимальной концентрации примеси в объеме подложки -  $C_{max}$ , при заданных пользователем исходных данных: уровне легирования подложки -  $C_b = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , энергии ионов -  $E_i = 100 \text{ кэВ}$  и дозе имплантации примеси -  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , представлен на рис.3.2. Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионной имплантации бора в кремний при указанных выше значениях параметров процесса имплантации глубина залегания рп-перехода -  $X_j$  составляет 650.54 нм. При этом нормальный средний пробег ионов бора в кремнии -  $R_p = 299.63 \text{ нм}$ , дисперсия нормального пробега -  $dR_p = 75.23 \text{ нм}$ ,



концентрация примеси у поверхности подложки –  $C_s = 1.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , максимальная концентрация примеси в объеме подложки –  $C_{\text{max}} = 5.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При изменении исходных данных пользователем расчетные значения параметров, соответствующие предыдущим исходным данным удаляются, и для получения новых расчетных значений необходимо нажать на кнопку «Расчет параметров процесса имплантации». Для выхода в основное меню программы необходимо нажать на кнопку «Выход».

Пример расчета значения концентрации примеси в объеме подложки –  $C(x)$  при заданном значении  $x = 0$ , а также значений нормального среднего пробега ионов бора в кремнии –  $R_p$ , дисперсии нормального пробега –  $dR_p$ , концентрации примеси у поверхности подложки –  $C_s$ , максимальной концентрации примеси в объеме подложки –  $C_{\text{max}}$ , при заданных пользователем исходных данных: уровне легирования подложки –  $C_b = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , энергии ионов –  $E_i = 100 \text{ кэВ}$  и дозе имплантации примеси –  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , представлен на рис.3.3.

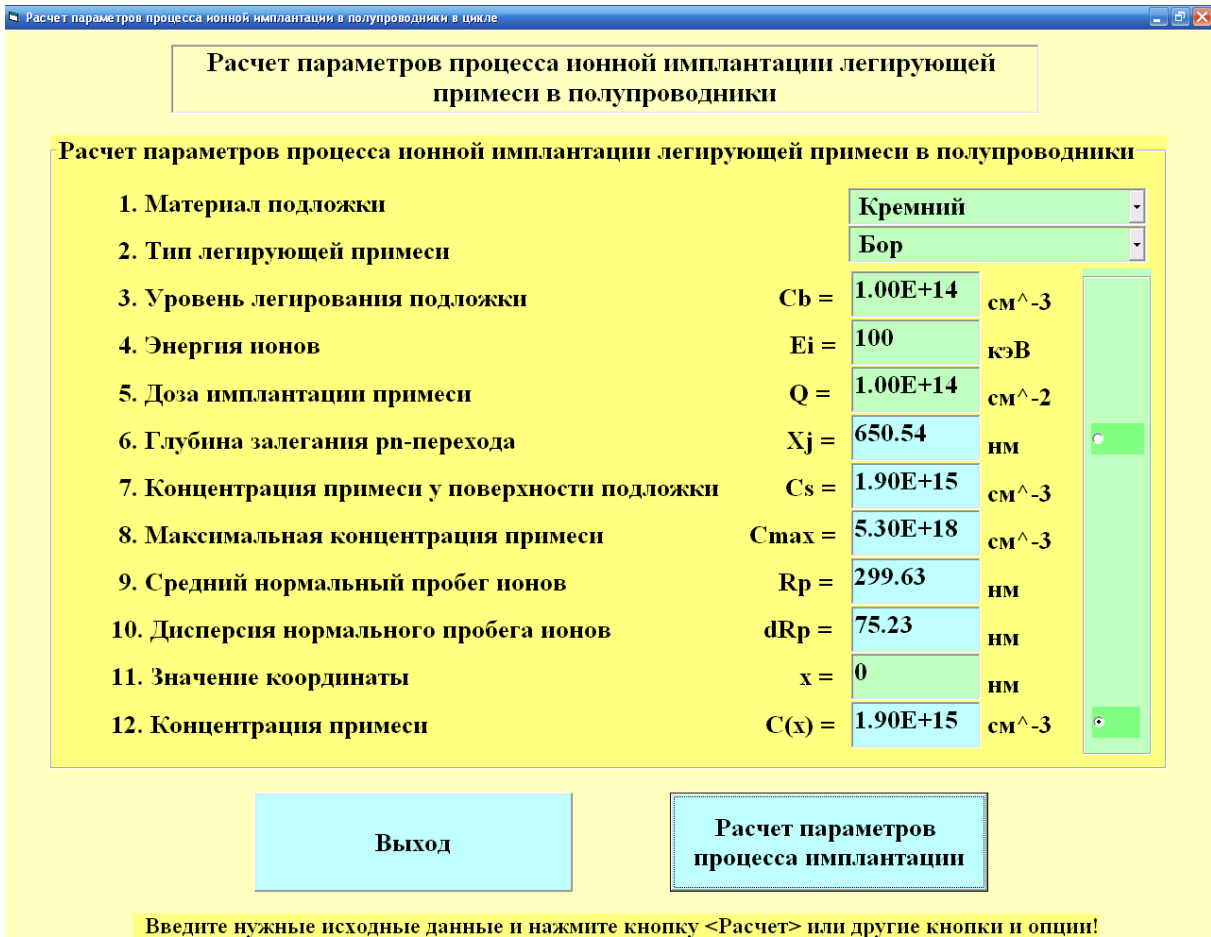


Рис.3.3. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации в циклическом режиме работы при расчете значения концентрации примеси в объеме подложки –  $C(x)$ .

Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионной имплантации бора в кремний при указанных выше значениях параметров процесса имплантации концентрация примеси в объеме подложки –  $C(0) = 1.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что естественно совпадает со значением концентрации примеси у поверхности подложки –  $C_s$ . При этом глубина залегания рп-перехода -  $X_j = 650.54 \text{ нм}$ , нормальный средний пробег ионов бора в кремний –  $R_p = 299.63 \text{ нм}$ , дисперсия нормального пробега –  $dRp = 75.23 \text{ нм}$ , концентрация примеси у поверхности подложки –  $C_s = 1.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а максимальная концентрация примеси в объеме подложки –  $C_{\text{max}} = 5.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

В табличном режиме расчета пользователь также имеет возможность корректировать введенные значения параметров и изменять режим работы программы. Пример выбора и ввода значений исходных данных, а также результаты расчетов глубины залегания рп-перехода  $X_j$  процесса ионной имплантации бора в кремний в выбранном пользователем диапазоне значений энергии ионов от 100 до 300 кэВ с уровнем легирования  $C_b = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и дозой имплантации  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в табличном режиме расчета представлены на рис.3.4.

**Расчет параметров процесса ионной имплантации легирующей примеси в полупроводники**

Параметры процесса

1. Материал подложки: Кремний
2. Тип легирующей примеси: Бор
3. Уровень легирования подложки:  $C_b = 1.00E+14 \text{ см}^{-3}$
4. Энергия ионов:  $E_i = 5-400 \text{ кэВ}$
5. Доза имплантации примеси:  $Q = 1.00E+14 \text{ см}^{-2}$
6. Глубина залегания рп-перехода:  $X_j = \text{Табл } f(E_i) \text{ нм}$
7. Концентрация примеси у поверхности подложки:  $C_s = 1.90E+15-4.98E+08 \text{ см}^{-3}$
8. Максимальная концентрация примеси:  $C_{\text{max}} = 5.30E+18-3.77E+18 \text{ см}^{-3}$
9. Средний нормальный пробег ионов:  $R_p = 299.63-712.89 \text{ нм}$
10. Дисперсия нормального пробега ионов:  $dRp = 75.23-105.69 \text{ нм}$
11. Значение координаты:  $x = \text{нм}$
12. Концентрация примеси:  $C(x) = \text{см}^{-3}$

$E_{\text{imin}} = 100 \text{ кэВ}$      $E_{\text{imax}} = 300 \text{ кэВ}$     **Расчет параметров процесса имплантации**    **Выход**

Таблица расчетных значений параметров процесса

$E_i(\text{кэВ})$	100.00	125.00	150.00	175.00	200.00	225.00	250.00	275.00	300.00
$X_j(\text{нм})$	650.54	754.73	842.85	917.91	982.81	1040.43	1093.63	1145.25	1198.11

Введите нужные исходные данные и нажмите кнопку <Расчет> или другие кнопки и опции!

Рис.3.4. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации в табличном режиме работы при расчете значения глубины залегания рп-перехода -  $X_j$ .

Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионной имплантации бора в кремний при указанных выше значениях параметров процесса имплантации глубина залегания рп-перехода -  $X_j$  изменяется от 650.54 нм до 1198.11 нм соответственно. При этом нормальный средний пробег ионов бора в кремнии –  $R_p$  изменяется от 299.63 нм до 712.89 нм, дисперсия нормального пробега –  $dR_p$  от 75.23 нм до 105.69 нм, концентрация примеси у поверхности подложки –  $C_s$  от  $1.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  до  $4.98 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ , а максимальная концентрация примеси в объеме подложки –  $C_{\text{max}}$  от  $5.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $3.77 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Пример выбора и ввода значений исходных данных, а также результаты расчетов зависимости концентрации примеси  $C(x)$  процесса ионной имплантации бора в кремний в выбранном пользователем диапазоне значений расстояния от поверхности подложки  $x$  от 0 до 800 нм с уровнем легирования  $C_b = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , энергией ионов  $E_i = 100 \text{ кэВ}$  и дозой имплантации  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в табличном режиме расчета представлены на рис.3.5.

**Расчет параметров процесса ионной имплантации легирующей примеси в полупроводники**

Параметры процесса

1. Материал подложки	Кремний	
2. Тип легирующей примеси	Бор	
3. Уровень легирования подложки	$C_b = 1.00E+14$	$\text{см}^{-3}$
4. Энергия ионов	$E_i = 100$	кэВ
5. Доза имплантации примеси	$Q = 1.00E+14$	$\text{см}^{-2}$
6. Глубина залегания рп-перехода	$X_j = 650.54$	нм
7. Концентрация примеси у поверхности подложки	$C_s = 1.90E+15$	$\text{см}^{-3}$
8. Максимальная концентрация примеси	$C_{\text{max}} = 5.30E+18$	$\text{см}^{-3}$
9. Средний нормальный пробег ионов	$R_p = 299.63$	нм
10. Дисперсия нормального пробега ионов	$dR_p = 75.23$	нм
11. Значение координаты	$x = 0-1301$	нм
12. Концентрация примеси	$C(x) = \text{Табл } f(X)$	$\text{см}^{-3}$

$X_{\text{min}} = 0$  нм     $X_{\text{max}} = 800$  нм

Расчет параметров процесса имплантации    Выход

Таблица расчетных значений параметров процесса

X (нм)	0	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0	600.0	700.0	800.0
$C(x) \text{ см}^{-3}$	$1.9E+15$	$1.6E+17$	$2.2E+18$	$5.3E+18$	$2.2E+18$	$1.5E+17$	$1.8E+15$	$3.8E+12$	$1.3E+09$

Введите нужные исходные данные и нажмите кнопку <Расчет> или другие кнопки и опции!

Рис.3.5. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации в табличном режиме работы при расчете значения концентрации легирующей примеси -  $C(x)$ .

Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионной имплантации бора в кремний при указанных выше значениях параметров процесса имплантации концентрация легирующей примеси -  $C(x)$  изменяется от  $1.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  до  $1.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  соответственно. При этом нормальный средний пробег ионов бора в кремнии -  $R_p = 299.63 \text{ нм}$ , дисперсия нормального пробега -  $dR_p = 75.23 \text{ нм}$ , концентрация примеси у поверхности подложки -  $C_s = 1.9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а максимальная концентрация примеси в объеме подложки -  $C_{\text{max}} = 5.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Интерфейс программы в графическом режиме расчета представлен на рис.3.6. В графическом режиме расчета пользователь имеет возможность изменять введенные значения исходных параметров и расчетный параметр.

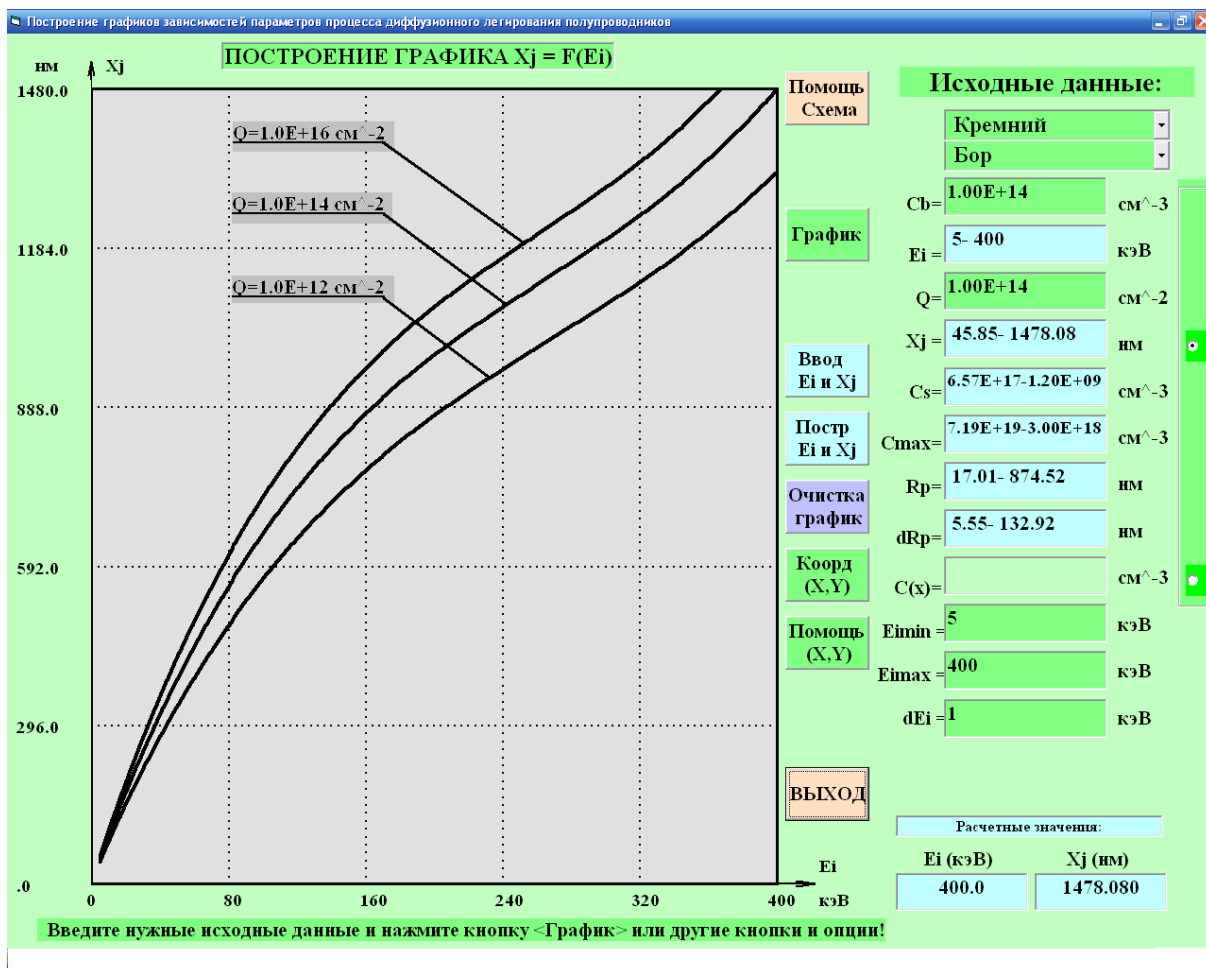


Рис.3.6. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации в графическом режиме работы при построении графиков зависимости глубины залегания  $r_p$ -перехода легирующей примеси от энергии имплантируемых ионов бора в кремний  $X(j)=f(E_i)$ .

В графическом режиме работы путем варьирования исходных данных пользователь имеет возможность вывести на экран дисплея несколько графиков выбранной функциональной зависимости. На рис.3.6 в качестве расчетного параметра выбрана глубина залегания  $p$ -перехода легирующей примеси -  $X(j)$ . На рисунке представлены три графика зависимости глубины залегания  $p$ -перехода легирующей примеси от энергии имплантируемых ионов бора в кремний  $X(j) = f(E_i)$  для значений доз имплантации ионов бора  $Q$  равных  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  соответственно. При этом после построения каждого графика с введенными пользователем значениями исходных данных на экран выводятся расчетные значения параметров процесса ионной имплантации. Так на рис.3.6 представлены расчетные диапазоны изменения значений глубины залегания  $p$ -перехода легирующей примеси -  $X(j)$  от 45.8 нм до 1478.08 нм, максимальной концентрации примеси в объеме подложки  $C_{\text{max}}$  от  $7.19 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , концентрации примеси у поверхности подложки  $C_s$  от  $6.57 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , нормального среднего пробега ионов  $R_p$  от 17.01 нм до 874.52 нм и дисперсии нормального среднего пробега ионов  $dR_p$  от 5.55 нм до 132.92 нм при изменении энергии ионов  $E_i$  от 5 до 400 кэВ соответственно и значениях дозы имплантации  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Интерфейс программы позволяет пользователю выбирать материал подложки, тип легирующей примеси, то есть тип имплантируемых ионов, вводить значения уровня легирования подложки -  $C_b$ , задавать диапазон изменения значений энергии ионов -  $E_i$ , то есть значения -  $E_{\text{imin}}$  и -  $E_{\text{imax}}$  в кэВ, которые фактически определяют масштаб построения графиков по осям координат, а так же вводить значение дискретного изменения энергии ионов -  $dE_i$  в кэВ при режиме построения графика выбранной зависимости «По точкам». При обнаружении ошибки в процессе ввода пользователем значений параметров процесса программа выводит на экран в низу формы соответствующие комментарии, указывающие на характер ошибки.

При нажатии пользователем на кнопку <Помощь-Схема> на экран дисплея выводится схема проведения процесса ионной имплантации. При повторном нажатии пользователем на кнопку <Помощь-Схема> или при щелчке кнопкой мыши на поле схемы ее изображение сворачивается с экрана дисплея.

При нажатии пользователем на кнопку <График> на экран дисплея выводится рамка с двумя опциями, позволяющими пользователю выбрать режим построения графиков:

- По точкам
- Все точки.

При выборе режима построения - «По точкам» на экран выводится кнопка <Продолжить построение графика> и точка на поле графика соответствующая начальным значениям аргумента -  $E_i = 6$  кэВ и функции  $X(j) = 54.63$  нм в поля в нижней правой части формы. При каждом нажатии

пользователем на кнопку <Продолжить построение графика> происходит увеличение текущего значения аргумента на шаг  $dE_i$ , расчет значения функции  $X(j)$ , вывод этих значений в указанных полях формы и отображение текущей точки на поле графика. Это позволяет пользователю определить значения  $E_i$  и  $X(j) = f(E_i)$  для любой точки графика. Процесс построения графика продолжается до тех пор, пока значение аргумента не достигнет максимального введенного пользователем значения, после чего построение графика прекращается и изображение кнопки <Продолжить построение графика> исчезает. При нажатии пользователем кнопки <Стоп> режим построения графика в режиме «По точкам» завершается.

При выборе режима построения - «Все точки» на экран выводится график выбранной пользователем зависимости  $X(j) = f(E_i)$ .

При нажатии пользователем на кнопку <Ввод  $E_i$  и  $X(j)$ > ему предоставляется возможность ввести числовые значения  $E_i$  и  $X(j)$  в указанных полях формы и при нажатии на кнопку <Построение  $E_i$  и  $X(j)$ > вывести на поле графика точку с данными координатами.

При нажатии пользователем на кнопку <Очистка экрана> все отображаемые на поле графика зависимости удаляются без изменения масштаба изображения и сетки, при этом введенные пользователем последние значения параметров процесса сохраняются.

При нажатии пользователем на кнопку <Координаты (X,Y)> цвет кнопки изменяется на красный и устанавливается режим работы, позволяющий при перемещении указателя мыши на поле графика в любой точке считывать координаты этой точки. Значения координат, то есть в данном случае значения  $E_i$  и  $X(j)$ , отображаются в соответствующих полях справа в низу формы. При повторном нажатии пользователем на кнопку <Координаты (X,Y)> цвет кнопки изменяется на исходный зеленый и устанавливается исходный режим работы мыши.

При каждом новом вводе пользователем значений диапазона изменения аргумента – в данном случае значений  $E_{imin}$  и  $E_{imax}$ , то есть при изменении масштаба изображения графика, происходит удаление отображаемых графиков и автоматический перерасчет масштаба отображения графиков по осям координат. При этом введенные значения аргумента автоматически нормируются под заданную в программе масштабную сетку по оси X. Масштаб изображения графика по оси Y рассчитывается автоматически исходя из введенных пользователем последний раз исходных данных для параметров процесса ионной имплантации и заданной в программе масштабной сетке по оси Y. Следует отметить, что при изменении значений  $E_{imin}$  и  $E_{imax}$  автоматически пересчитывается масштаб отображения графиков по оси ординат для текущих значений параметров процесса имплантации. То есть, если пользователю требуется отобразить на экране несколько графиков выбранной зависимости, то сначала необходимо ввести в качестве

исходных параметров процесса такие значения, которые соответствуют максимальным значениям величины глубина залегания  $p$ -перехода  $X(j)$ , а затем ввести требуемые значения  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$  для пересчета масштаба отображения графиков.

При нажатии пользователем на кнопку <Помощь (X,Y)> на экран дисплея в нижней части формы отображается информация для пользователя о действиях с кнопками мыши. Так при нажатой кнопке <Координаты (X,Y)> (цвет кнопки изменяется на красный и устанавливается режим работы, позволяющий при размещении указателя мыши на поле графика в любой точке считывать координаты этой точки), нажатие левой кнопки мыши приводит к отображению точки на поле графика в месте расположения курсора мыши, а нажатие правой кнопки мыши приводит к стиранию точки на поле графика в месте расположения курсора мыши. Двойной щелчок левой кнопкой мыши на поле графика приводит к тому, что все отображаемые на поле графика зависимости удаляются без изменения масштаба изображения и сетки, при этом введенные пользователем последние значения параметров процесса сохраняются.

При нажатии пользователем на кнопку <Выход)> на экране дисплея отображается интерфейс основного меню программы.

При нажатии пользователем опции, которая определяет расчетный параметр, на экране отображается соответствующий интерфейс программы. Так при выборе опции -  $C(x)$  в графическом режиме работы интерфейс программы представлен на рис.3.7.

На рис.3.7 в качестве расчетного параметра выбрана функция распределения концентрации легирующей примеси -  $C(x)$ . На рисунке представлены три графика зависимости распределения концентрации примеси для значений энергии имплантируемых ионов бора в кремний  $E_i$  равных 100, 200 и 300 кэВ соответственно. При этом после построения каждого графика с введенными пользователем значениями исходных данных на экран выводятся расчетные значения параметров процесса ионной имплантации. Так на рис.3.7 представлены расчетные параметры процесса имплантации для текущего, введенного пользователем, значения энергии ионов  $E_i = 300$  кэВ. В данном случае глубины залегания двух образовавшихся в результате имплантации  $p$ -переходов -  $X(j)$  равны 227.7 нм и 1198.1 нм соответственно, максимальная концентрация примеси в объеме подложки  $C_{\max} = 3.77 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , концентрация примеси у поверхности подложки  $C_s = 4.98 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ , нормальный средний пробега ионов  $R_p = 712.89$  нм и дисперсия нормального среднего пробега ионов  $dR_p = 105.69$  нм.

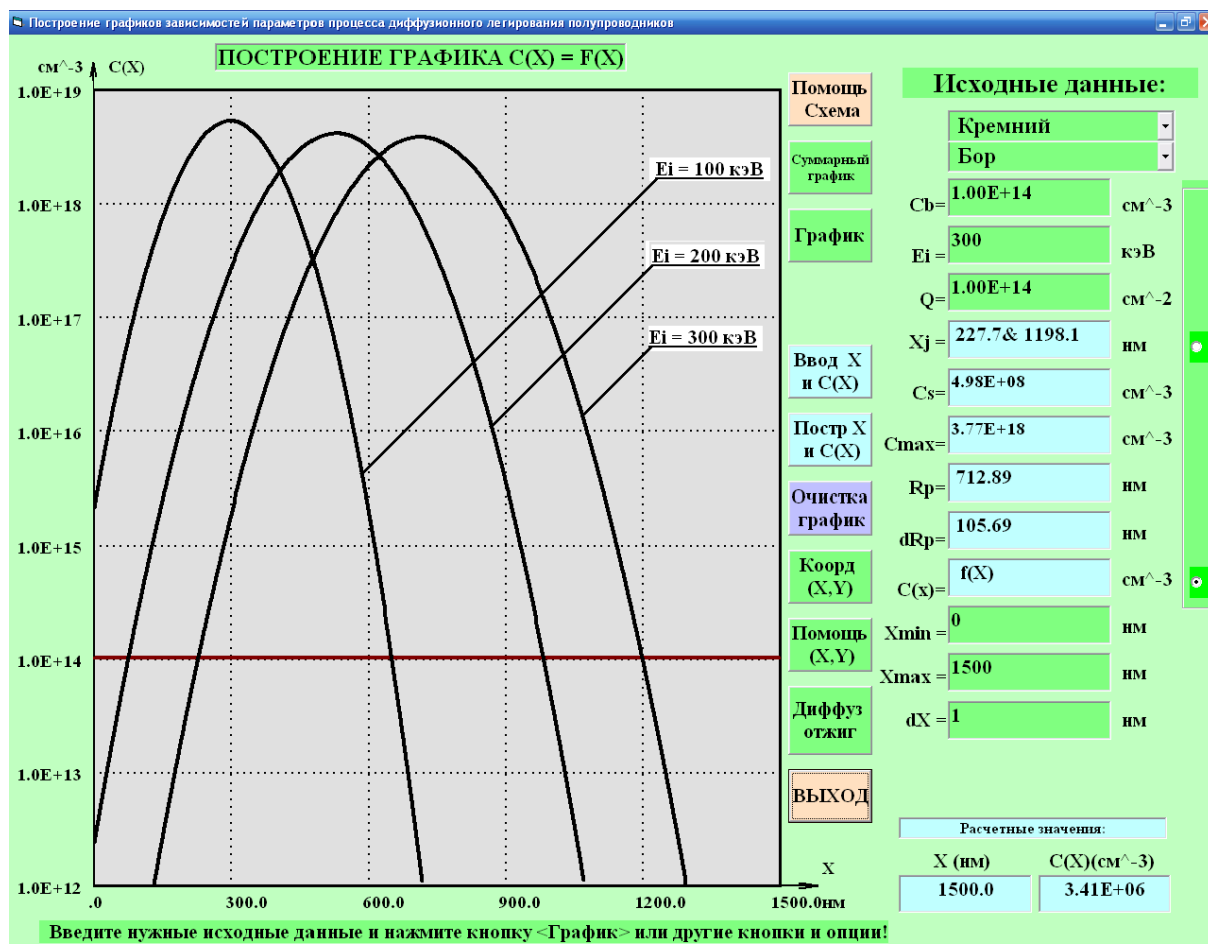


Рис.3.7. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации в графическом режиме работы при построении графиков распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии.

Интерфейс программы в этом случае позволяет пользователю выбирать материал подложки, тип легирующей примеси, то есть тип имплантируемых ионов, вводить значения уровня легирования подложки -  $C_b$ , задавать диапазон изменения значений координаты -  $x$ , то есть значения –  $X_{min}$  и –  $X_{max}$  в нм, которые фактически определяют масштаб построения графиков по осям координат, а так же вводить значение дискретного изменения значения приращения координаты  $x$  –  $dx$  в нм при режиме построения графика выбранной зависимости «По точкам». Следует отметить, что при изменении значений  $X_{min}$  и  $X_{max}$  автоматически пересчитывается масштаб отображения графиков по осям координат для текущих значений параметров процесса имплантации. То есть, если пользователю требуется отобразить на экране несколько графиков выбранной зависимости, то сначала необходимо ввести в качестве исходных параметров процесса такие значения, которые соответствуют максимальным значениям величины концентрации имплантируемой



примеси -  $C_{max}$ , а затем ввести требуемые значения  $X_{min}$  и  $X_{max}$  для пересчета масштаба отображения графиков.

На рис.3.8 представлены графики распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии при уровне легирования подложки  $C_b = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , энергии ионов  $E_i = 100 \text{ кэВ}$  для трех значений дозы имплантации  $Q$  равных  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  соответственно. Расчетные значения параметров имплантации  $X_j$ ,  $C_s$ ,  $C_{max}$ ,  $R_p$  и  $dR_p$  представлены для текущего значения дозы имплантации  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

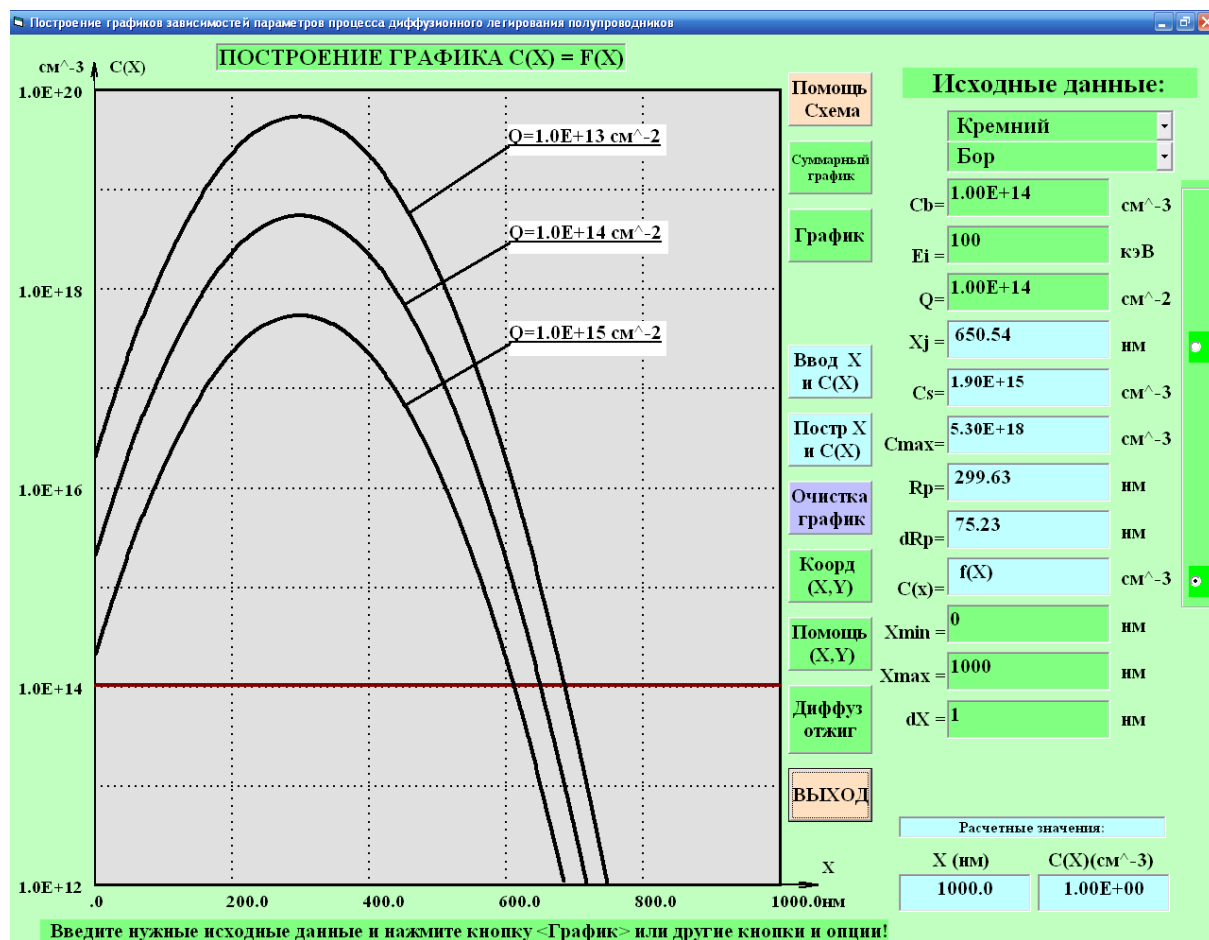


Рис.3.8. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации при построении графиков распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии для трех значений дозы имплантации  $Q$ .

На рис.3.9 представлены два графика распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии при уровне легирования подложки  $C_b = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  для энергии ионов  $E_i = 100 \text{ кэВ}$  в режиме построения графика «Все точки» и для  $E_i = 125 \text{ кэВ}$  в режиме построения графика «По точкам» соответственно. Расчетные значения параметров имплантации  $X_j$ ,  $C_s$ ,  $C_{max}$ ,  $R_p$  и  $dR_p$  представлены для текущего значения дозы имплантации  $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и энергии ионов  $E_i = 125 \text{ кэВ}$  при шаге по энергии  $dX = 10 \text{ нм}$ . При

пошаговом построении графика  $C(x)$  в нижней правой части формы в соответствующих полях отображаются расчетные текущие значения  $X$  и  $C(X)$ . В данном случае при  $X = 760$  нм значение  $C(X) = 7.47 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

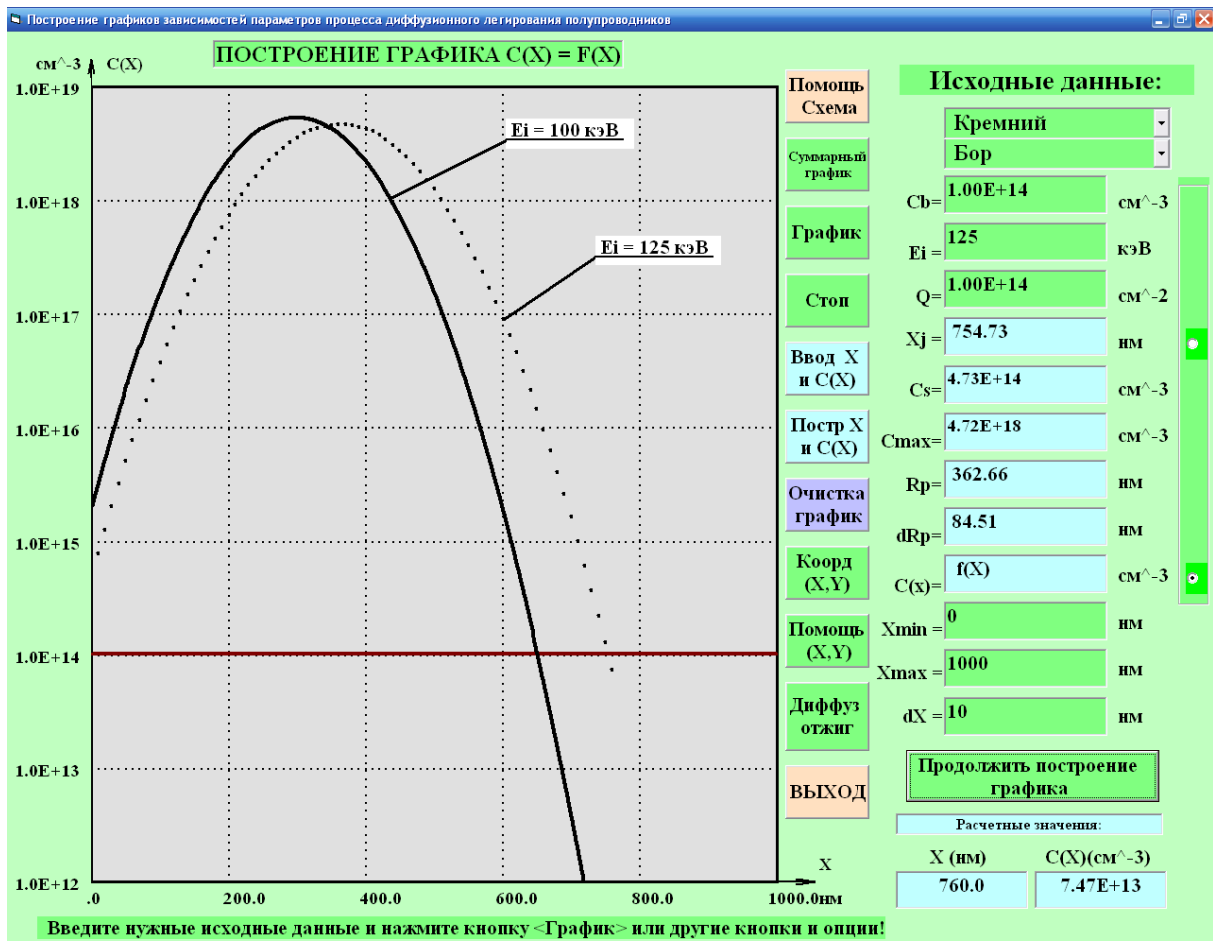


Рис.3.9. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионной имплантации при построении графиков распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии для трех значений дозы имплантации  $Q$ .

Назначение кнопок <Помощь Схема>, <График>, <Ввод  $X$  и  $C(x)$ >, <Построение  $X$  и  $C(x)$ >, <Очистка графика>, <Координаты  $(X,Y)$ >, <Помощь  $(X,Y)$ > и <ВЫХОД> в режиме построения графиков распределения концентрации примеси  $C(x)$  аналогичны рассмотренному выше режиму построения графиков зависимостей  $X_j = f(E_i)$ . Однако, интерфейс программы, представленной на рис.3.7, рис.3.8 и рис.3.9, предусматривает дополнительные возможности.

Кнопка <Суммарный график> предназначена для построения графика распределения концентрации –  $C(x)$ , являющегося результатом нескольких последовательных процессов ионной имплантации, проведенных при разных параметрах процесса имплантации одной и той же примеси в один и тот же выбранный материал подложки, то есть при различных значениях

энергии ионов -  $E_i$  и дозы имплантации -  $Q$ . При нажатии на кнопку <Суммарный график> название кнопки меняется на <Построение графика>, а на экране дисплея появляется диалоговое окно, в котором пользователю предлагается ввести количество процессов ионной имплантации, для которых будет рассчитан суммарный график распределения концентрации примеси (от двух до пяти). Интерфейс программы представлен на рис.3.10.

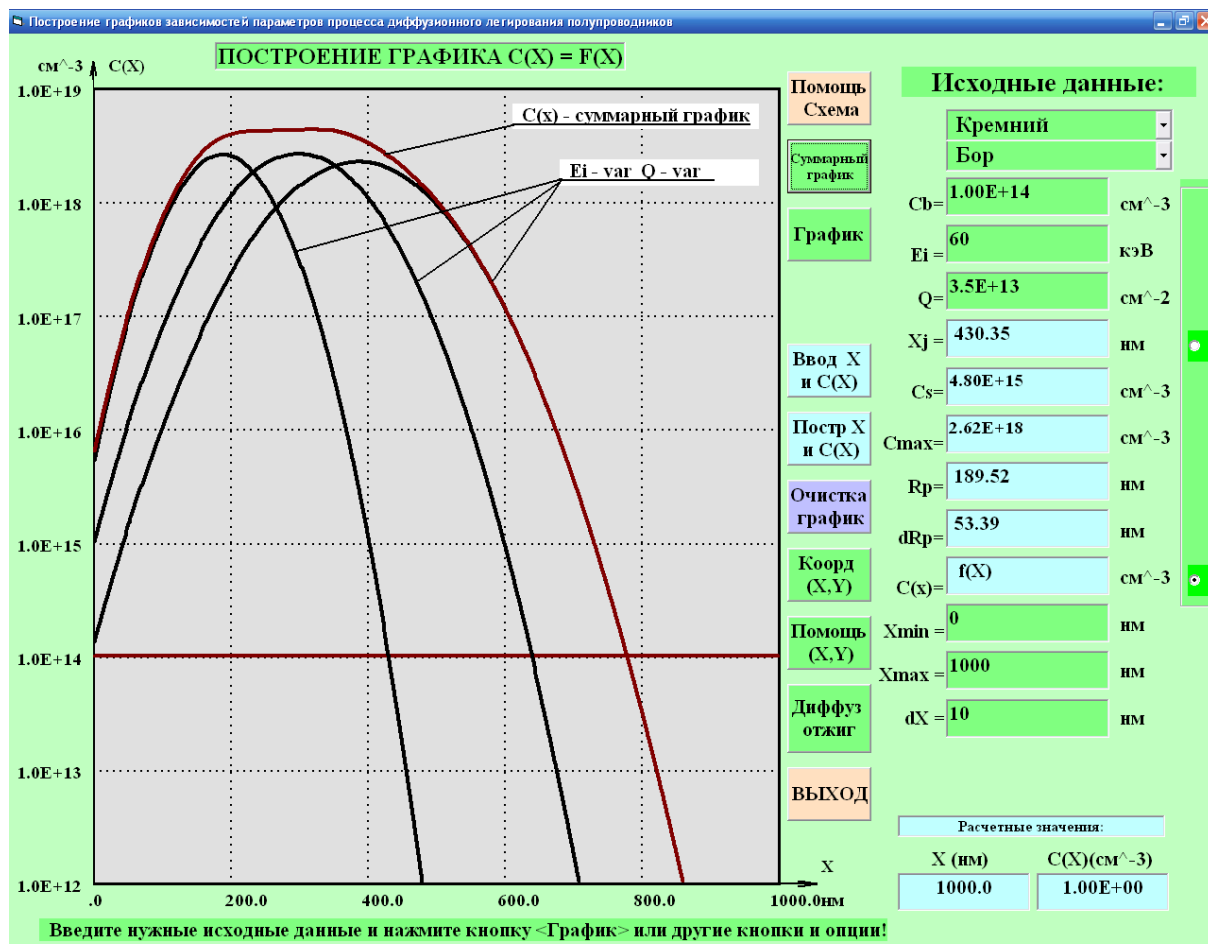


Рис.3.10. Интерфейс программы расчета и построения суммарного графика распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии для трех последовательных процессов ионной имплантации.

После ввода пользователем количества процессов имплантации ему предлагается построить введенное им количество графиков распределения концентрации –  $C(x)$  при различных значениях энергии ионов -  $E_i$  и дозы имплантации –  $Q$ , и нажать кнопку <Построение графика>. При нажатии пользователем на кнопку <Построение графика> название кнопки меняется на исходное <Суммарный график>, происходит суммирование построенных зависимостей и построение результирующего графика распределения концентрации –  $C(x)$ . Следует отметить, что для полного отображения суммарного графика, следует выбрать соответствующий масштаб

отображения графиков, то есть в качестве исходных параметров процесса ввести значения соответствующие максимальной концентрации примеси, превышающей значение суммарной концентрации.

Кнопка <Диффузионный отжиг> предназначена для построения графиков распределения концентрации имплантированных ионов примеси –  $C(x)$ , являющихся результатом проведения диффузионного отжига полученной имплантированной структуры. При этом предусмотрено проведение диффузионного отжига структуры в трех режимах:

- Диффузионное перераспределение имплантированной примеси по Гауссу.
- Диффузионное перераспределение имплантированной примеси, при условии непрозрачности внешней границы подложки при  $x = 0$ , то есть при условии  $dC(0,t)/dx = 0$ .
- Диффузионное перераспределение имплантированной примеси, при условии открытости (прозрачности) внешней границы подложки при  $x = 0$ , то есть при условии  $C(0,t) = 0$ .

При нажатии на кнопку < Диффузионный отжиг > название кнопки меняется на <Распределение после отжига>, а на экране дисплея появляется диалоговое окно, в котором пользователю предлагается выбрать одну из трех опций, определяющих режим проведения отжига, и ввести значения параметров процесса диффузионного отжига – температуры  $T$  в градусах К и времени проведения процесса –  $t$  в секундах, для которых будет рассчитан график распределения концентрации примеси. Интерфейс программы представлен на рис.3.11.

На рис.3.11, представлены графики распределения концентрации легирующей примеси –  $C(x)$  ионов бора в кремнии для всех возможных трех режимов проведения процесса диффузионного отжига, проведенных при температуре отжига  $T = 1300\text{К}$  и времени  $t = 2000$  сек. При нажатии на кнопку < Распределение после отжига > название кнопки меняется на исходное <Диффузионный отжиг>, диалоговое окно выбора режима отжига закрывается, а на экране дисплея отображается соответствующий график распределения концентрации примеси после диффузионного отжига структуры.

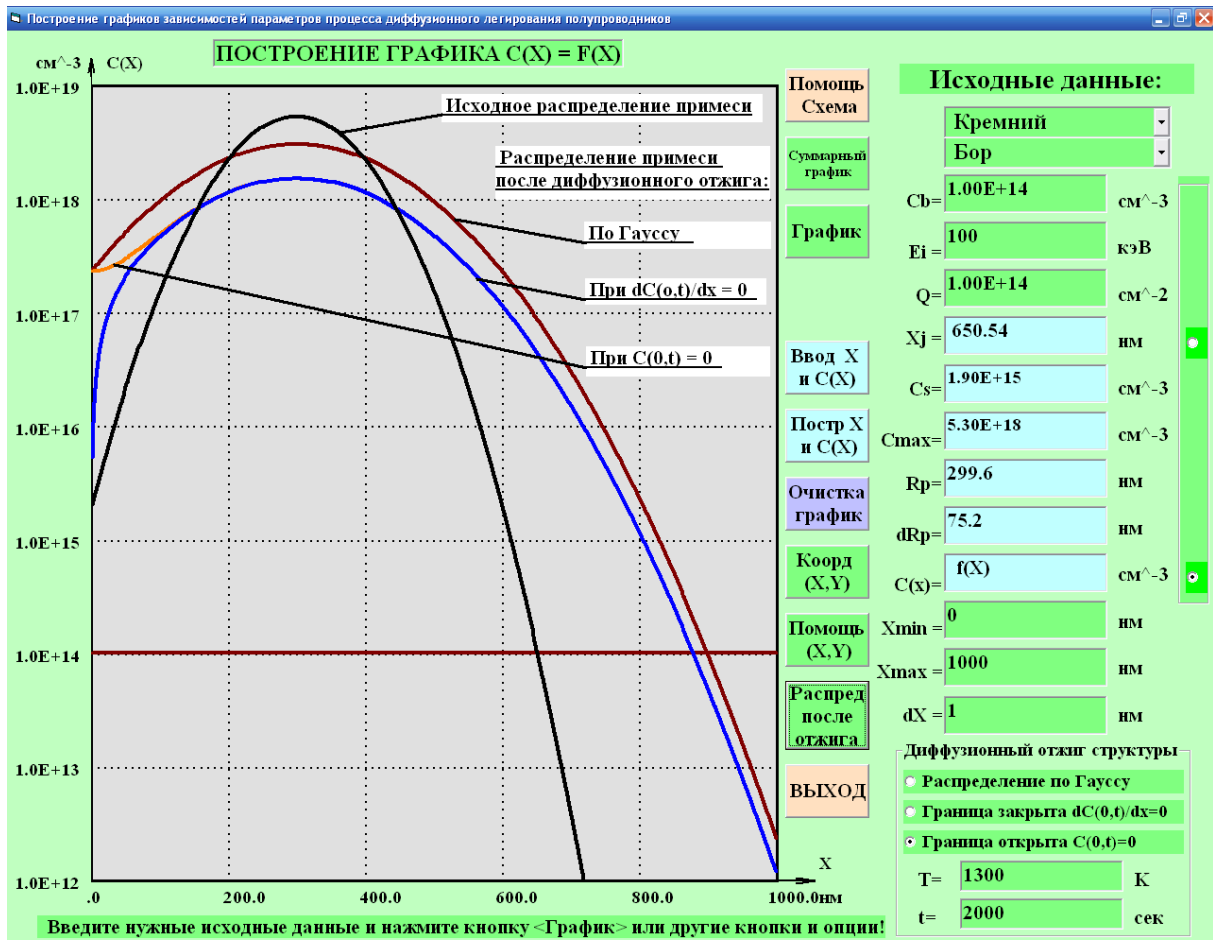


Рис.3.11. Интерфейс программы расчета и построения графиков распределения концентрации –  $C(x)$  ионов бора в кремнии для трех режимов проведения процесса диффузионного отжига.

#### 4. Порядок и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить физические основы процесса полиэнергетической ионной имплантации.
2. Подготовить необходимые таблицы для записи результатов расчетов процесса ионной имплантации в соответствии с Приложением.
3. Провести расчеты процесса ионной имплантации в соответствии с полученным заданием.
4. Оформить отчет по результатам расчетов в виде таблиц и графиков.
5. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

#### 5. Требования к отчету по лабораторной работе

1. Написать название и цель проведения лабораторной работы. Записать в тетрадь краткие сведения о физических основах процесса полиэнергетической ионной имплантации.

3. Представить результаты расчетов режимов проведения процесса ионной имплантации.
4. Представить расчетные значения параметров процесса, а также графики зависимостей параметров процесса в соответствии с полученным заданием от преподавателя.
5. Представить в отчете выводы по полученным данным.

#### **6. Контрольные вопросы**

1. Каковы преимущества имплантационного легирования по сравнению с диффузионным?
2. Какие профили распределения примеси можно получить методом полиэнергетической ионной имплантации?
3. Из каких соображений выбираются энергии ионов при полиэнергетической имплантации?

#### **7. Указания по технике безопасности**

1. Соблюдать правила ТБ при работе на электрооборудовании.
2. Не приступать к выполнению работы без вводного инструктажа по ТБ преподавателем, ведущим занятие.
3. Строго соблюдать все указания преподавателя.

#### **8. Литература**

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: «Круглый год», 2001. – 528 с.
2. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. – М.: Наука, 1983. – 360 с.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры Физических основ электронной техники (21.05.2009 г. Протокол № 5) и рекомендованы к использованию в учебном процессе.

Заведующий кафедрой ФОЭТ  
профессор, д. т. н.

Быков Д.В.

## Содержание

<b>Конструирование заданных профилей распределения примеси в полупроводниках методом ионной имплантации . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1. Цель работы . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2. Имплантационное легирование полупроводников . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>3. Описание программного обеспечения для расчета параметров процесса ионной имплантации в полупроводники . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>4. Порядок и методика выполнения лабораторной работы . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>5. Требования к отчету по лабораторной работе . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>6. Контрольные вопросы по лабораторной работе . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>7. Указания по технике безопасности . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>8. Литература . . . . .</b>	<b>22</b>

*Учебное издание*

*Конструирование заданных профилей распределения примеси в полупроводниках методом ионной имплантации.*

*Составители*

*ГРИГОРЬЕВ Федор Иосифович*

*ЧЕРНОВ Аркадий Алексеевич*

*Редактор С.П.Клышинская*

*Технический редактор О.Г.Завьялова*

*Подписано в печать 18.06.09. Формат 60x84/16. Бумага типографская.  
Печать-ризография. Усл. печ.л.1,5. Уч.-изд.л. 1,3. Изд. № 61. Тираж 50 экз.  
Заказ*

*Московский государственный институт электроники и математики.  
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.*

*Отдел оперативной полиграфии Московского государственного  
института электроники и математики.  
113053, Москва, ул. М. Пионерская, 12.*