

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛИТИЯ ПРИ ЕГО ДРЕЙФЕ В КРЕМНИИ ПО ЕМКОСТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Андреев В. М., Еремин В. К., Строкан Н. Б., Шокина Е. В.

Стандартные вольт-фарадные характеристики не позволяют однозначно решать задачу восстановления профиля распределения примесей в общем случае. Дополнительные условия ее решения вытекают из модели  $p-n$ -перехода. В работе из свойств процесса переноса в электрическом поле ионов лития выделены основные закономерности его распределения в  $n^+-i$  (Li)- $p$ -структуре. Показано, что они позволяют восстанавливать распределение лития в  $i$ -области по емкостным измерениям. Точность совпадения восстановленного профиля с истинным оценена путем численного моделирования процесса дрейфа. Приведены примеры обработки экспериментальных  $C(V)$ -зависимостей для различных стадий дрейфа лития в кремнии.

Метод компенсации германия и кремния путем дрейфового переноса ионов лития, предложенный Пеллом [1], до настоящего времени является сравнительно простым и эффективным способом получения однородных объемных кристаллов полупроводников с разностной концентрацией электрически активных примесей  $< 10^{10}$  см $^{-3}$ . Как показывает практический опыт, в целях отбора кристаллов для последующей компенсации, а также в процессе ее проведения весьма важно контролировать распределение дрейфующего лития. До последнего времени эти задачи решались электролитическим декорированием металлами  $i$ -области [2], электрофотографией [3] либо измерением емкости компенсируемой структуры [4]. Получаемая при этом информация, однако, носила лишь качественный характер. Определялась ширина  $i$ -области и оценивалась точность компенсации по зависимости емкости от напряжения. Отсутствие неразрушающего метода измерения профиля  $N_D-N_A$  по глубине  $i$ -области существенно затрудняло исследование процесса электропереноса ионов примесей в полупроводниках как в научных, так и практических целях. По-видимому, этими трудностями объясняется то, что до настоящего времени нет однозначной модели динамики дрейфа в условиях захвата (комплексообразования).

Далее с учетом свойств процесса переноса ионов лития в электрическом поле  $p-n$ -перехода выделены основные закономерности его распределения в  $n^+-i$  (Li)- $p$ -структуре. Показано, что они позволяют однозначно решать задачу восстановления профиля  $N_D-N_A$  в  $i$ -области из стандартных вольт-фарадных характеристик структуры  $C(V)$ . Точность совпадения восстановленного профиля с истинным оценена путем численного моделирования процесса дрейфа. Приведены примеры обработки экспериментальных  $C(V)$ -зависимостей для различных стадий дрейфа лития в кремнии.

Напомним, что, согласно [5], концентрация ионизованных центров  $N_A$  и  $N_D$  на границах области пространственного заряда (ОПЗ) связана с емкостью структуры  $C$  и напряжением  $V$  соотношением

$$\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} = \frac{1}{2} e \varepsilon_0 S^2 \frac{d(1/C^2)}{dV}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  — диэлектрические проницаемости материала и вакуума,  $S$  — площадь структуры. Изменяя напряжение смещения, можно измерить зависи-

ность  $(N_D^{-1} + N_A^{-1}) w$ , где  $w = \epsilon \epsilon_0 S / C$  — ширина ОПЗ при данном  $V$ . Расширение ОПЗ с увеличением напряжения на  $dV$  происходит в обе стороны от  $p$ - $n$ -перехода, при этом выполняются соотношения

$$dx_A = \frac{N_D}{N_A + N_D} dw, \quad dx_D = \frac{N_A}{N_A + N_D} dw, \quad (2)$$

где  $dx_A, dx_D$  — расширение ОПЗ в  $p$ - и  $n$ -областях соответственно.

Выражение (1) справедливо для произвольного  $p$ - $n$ -перехода, однако в общем случае оно не дает однозначного ответа на вопрос о распределении примесей, так как содержит две независимые величины —  $N_A$  и  $N_D$ . Для решения такой задачи необходимо дополнительное условие. Например, для симметричного  $p$ - $n$ -перехода таким условием является равенство  $N_A = N_D$ , тогда  $N_D = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0 S^2} \frac{dV}{d(1/C^2)}$ . В случае резко асимметричного перехода условие  $N_A \gg N_D$  приводит к  $N_D = \frac{2}{\epsilon \epsilon_0 S^2} \frac{dV}{d(1/C^2)}$ .

В нашей задаче необходимое для восстановления профиля дополнительное условие будет получено из общих закономерностей распределения лития в процессе компенсации.

Первое важное свойство следует из кинетики изменения концентрации ионов лития в области дрейфа. Согласно [5], для произвольно выделенного слоя лития, дрейфующего в электрическом поле  $n^+$ - $p$ -перехода, справедливо соотношение

$$N_{Li}(t) = \frac{N_A}{1 + (N_A/N_{Li}(0) - 1) \exp(-t/\tau)}, \quad (3)$$

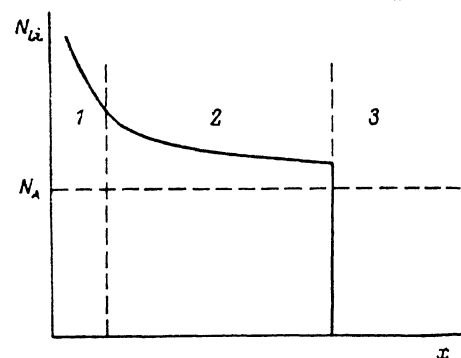


Рис. 1. Качественная модель образованного в процессе компенсации  $n^+ - v(Li) - p$ -перехода.

1 —  $n^+$ -контакт (источник ионов  $Li^+$ ), 2 — компенсированная область  $v(Li)$ , 3 — исходный материал  $p$ -типа проводимости.

где  $\tau = \epsilon \epsilon_0 / e \mu N_A$  — характерное время релаксации неравновесной концентрации лития,  $\mu$  — подвижность ионов,  $N_{Li}(0)$  — концентрация ионов в выделенном слое в начальный момент времени,  $N_{Li}(t)$  — то же через время  $t$ .

С учетом того, что литий дрейфует из источника ионов, в котором  $N_{Li} > N_A$ , из (3) следует, что для любого момента времени во всей компенсируемой области  $N_{Li} > N_A$ , т. е. она имеет электронный тип проводимости  $v$ . Поэтому граница  $v$ - $p$ -перехода находится на фронте дрейфующего пакета лития.

Вторым следствием (3) является то, что резкость фронта дрейфующего пакета примеси во времени возрастает. Действительно, независимо от исходного соотношения  $N_{Li}/N_A$  устанавливается значение  $(N_{Li}/N_A) = 1$ . Поэтому с постоянной времени  $\tau$  у дрейфующего пакета должен формироваться идеально резкий фронт. Качественно такое поведение дрейфующего лития можно объяснить возникновением эффективного электрического поля в движущейся со скоростью фронта системе координат. При этом для ионов, опережающих фронт (границу  $v$ - $p$ -перехода), это поле оказывает тормозящее действие. Ясно, что установившимся является такое распределение, для которого граница эффективного поля совпадает с фронтом пакета, имеющим форму резкой ступени.

Остановимся далее на роли диффузии. Действительно, кроме дрейфовых процессов, на фронте пакета лития неизбежно возникают противодействующие им диффузионные токи, вызывающие его размытие. Поэтому для установившегося распределения на фронте должно выполняться условие диффузионно-дрейфового равновесия. Оно оказывается полностью аналогичным известному соотношению для концентрации свободных носителей на границе электрического поля обычного  $n$ - $p$ -перехода, смещенного в заперном направлении [6]. Следовательно, резкость фронта лития в компенсируемой области может быть

опенена длиной экранирования Дебая  $L_D = (kT\epsilon\epsilon_0/e^2 N_A)^{1/2}$ . Важно, что ее величина даже для чистых полупроводников ( $N_A \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) составляет единицы микрометров, что много меньше реально достигаемой глубины области компенсации (1–10 мм).

Таким образом, моделью полупроводника с компенсированным литием слоем является резкий  $n(\text{Li})-p$ -переход (рис. 1), в котором  $N_D = N_{\text{Li}}$  — искомая функция координаты, а  $p$ -область однородна и имеет известную концентрацию акцепторов  $N_A$ . Дополнительное условие  $N_A = \text{const}$  позволяет,

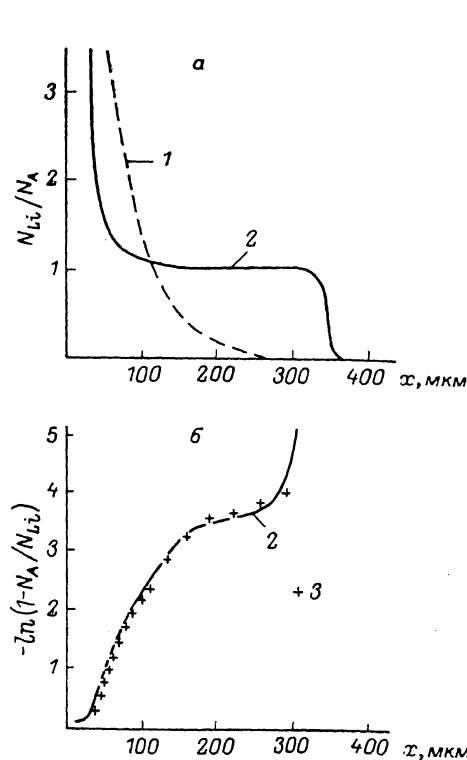


Рис. 2. Результат численного эксперимента по восстановлению профиля  $N_D - N_A$  в компенсированной области в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

В расчете принято  $\mu = 10^{-10} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $N_A = 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $U_{\text{см}} = 300 \text{ В}$ ; 1 — исходное распределение лития в слое-источнике, 2 — расчетный профиль концентрации лития  $N_{\text{Li}}$  в области дрейфа через время  $3 \approx 6 \text{ ч}$ , 3 — восстановленный профиль по расчетной  $C(V)$ -зависимости.

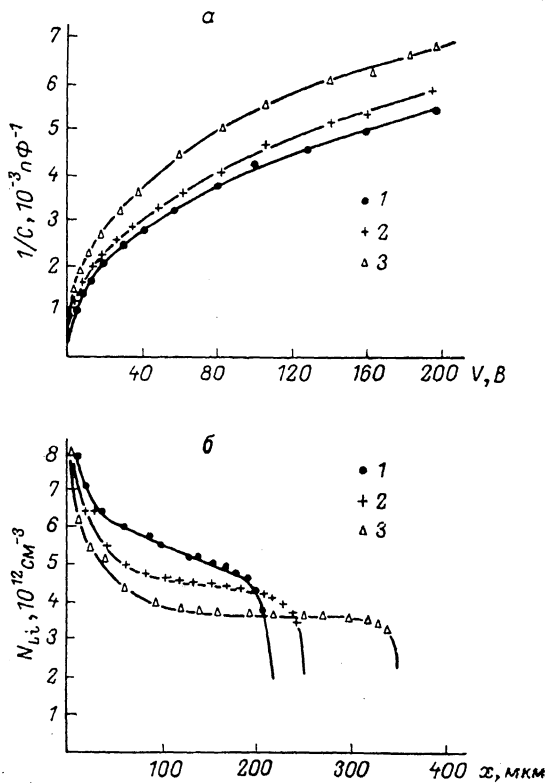


Рис. 3. Пример восстановления профиля  $N_{\text{Li}}(x)$  в компенсированной области из экспериментальных вольтфарадных зависимостей.

а — измеренные зависимости  $1/C$  от напряжения, б — восстановленные профили  $N_{\text{Li}}(x)$ . Время дрейфа, ч: 1 — 10, 2 — 15, 3 — 27.

согласно (1), восстановить распределение  $N_D(x) - N_A$  в компенсированной области.

Профиль  $N_D(x) - N_A$  в  $n$ -области по измеренной зависимости  $C(V)$  можно получить в параметрическом виде, определив из (1) зависимость  $N_D(V) - N_A$ , а после интегрирования (2) — зависимость  $x_D(V)$ . Окончательные выражения имеют вид

$$N_D(V) = \left( \frac{e\epsilon\epsilon_0 S^2}{2} \frac{d(1/C^2)}{dV} - \frac{1}{N_A} \right)^{-1} + N_A, \quad (4)$$

$$x_D(V) = \epsilon\epsilon_0 S \int_{C(V+V_k)}^{C(0)} \frac{N_A}{N_A + N_D} \frac{dC}{C^2}, \quad (5)$$

где  $V_k$  — контактная разность потенциалов.

Очевидно, что на точность метода может повлиять «неидеальность» ступенчатого профиля концентрации в области  $v$ - $p$ -перехода. Размытие фронта диффузией было оценено выше. Дополнительный вклад может внести распределение лития в слое — источнике. Для оценки влияния этого фактора на точность было проведено математическое моделирование дрейфа из диффузионно размытого слоя — источника. Численно решалась система уравнений, описывающих перенос ионов лития в электрическом поле, при типичных значениях параметров  $\mu$ ,  $N_A$ ,  $U_{см}$ .

По результатам расчета (рис. 2, а, сплошная линия) интегрированием уравнения Пуассона вычислялась зависимость  $C(V)$ . Результаты такого численного эксперимента в дальнейшем использовались как исходные данные для восстановления профиля  $N_{Li}(x) - N_A$  по соотношениям (4), (5). На рис. 2, б в логарифмическом масштабе приведены «восстановленный» и ранее вычисленный профили. Видно, что влияние начальной размытости источника примеси не превосходит величины  $\delta [1 - (N_A/N_{Li})] \approx 1\%$ .

Разработанный алгоритм был использован для контроля дрейфа лития в кремнии с  $N_A = 2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Дрейф проводился при температуре  $89^\circ \text{C}$  и напряжении смещения 200 В. На рис. 3, а приведены экспериментальные вольт-фарадные зависимости, соответствующие временам 10, 15 и 27 ч от начала процесса. Измерения проводились при комнатной температуре с помощью моста емкостей Е8-2 на частоте 1 кГц. На рис. 3, б показаны восстановленные профили  $N_{Li}(x)$ . Видно качественное соответствие между рассчитанными (рис. 2) и экспериментальными профилями. Количественным критерием корректности восстановления служило экспоненциальное падение со временем, согласно теории [7], концентрации  $N_D - N_A$  в компенсируемой области.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет получать распределение  $N_D - N_A$  в компенсированной методом дрейфа ионов области. Тем самым открывается возможность контроля и исследования самого процесса, узлового в технологии изготовления приемников слабо поглощаемого излучения на кремнии и германии.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Н. П. Афанасьевой, И. М. Котиной и Д. В. Тархину за полезные обсуждения и помощь в работе.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Pell E. M. — J. Appl. Phys., 1960, v. 31, N 2, p. 291—302.
- [2] Антонов А. С., Осяпенко Б. П., Юскеселива Л. Г. — ЖФХ, 1965, т. 39, в. 9, с. 2252—2258.
- [3] Антонов А. С., Юскеселива Л. Г. — ДАН СССР, 1965, т. 164, в. 6, с. 1260—1262.
- [4] Lauber A., Malmsten B. — Nucl. Instr. Meth., 1970, v. 81, p. 77—84.
- [5] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектрометрия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
- [6] Андреев В. М., Еремин В. К., Ломашевич С. А., Строкан Н. Б. — ФТП, 1986, т. 20, в. 10, с. 1856—1860.
- [7] Андреев В. М., Еремин В. К., Строкан Н. Б. — ФТП, 1987, т. 21, в. 9, с. 1673—1680.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 8.02.1988  
Принята к печати 15.06.1988