

МЕХАНИЗМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИФФУЗИИ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

И.Б. Снапиро, Н.Н. Ткаченко

Предложена простая модель для объяснения концентрационной зависимости коэффициента диффузии ионизованных атомов примеси в полупроводниках.

Известно, что при высоких значениях концентрации N примесей в полупроводниках их диффузия является нелинейной, т. е. коэффициент диффузии D зависит от концентрации: $D = D(N)$. Например, при легировании кремния фосфором до $N = 10^{21} \text{ см}^{-3}$, D возрастает по сравнению со значением D_0 при низкой концентрации на порядок¹. Предпринимались попытки объяснить увеличение коэффициента диффузии влиянием внутреннего ускоряющего электрического поля². Учет этого поля существенен, когда N превосходит концентрацию носителей в собственном полупроводнике n_i , при температуре диффузии. Однако таким способом удается объяснить только двукратное увеличение коэффициента диффузии при $N \gg n_i$. В настоящее время существует большое количество моделей, предложенных для объяснения зависимости $D(N)$ ¹. Все они основаны на особенностях дефектообразования при диффузии той или иной примеси в данном полупроводнике.

В данной работе предлагается простая модель, дающая возможность рассчитать концентрационную зависимость коэффициента диффузии. Решающим обстоятельством является учет вырождения носителей при $N > N_{c,v}$ ($N_{c,v}$ – плотности состояний в c , v -зонах), который отсутствует в известных нам работах по этой теме.

Для определенности рассмотрим диффузию донорной примеси, предполагая выполненным условие сильного вырождения

$$N \gg N_c , \quad (1)$$

или, что эквивалентно, условие для фермиевской энергии $\epsilon_F \gg kT$. Если характерные размеры Δx области распределения примеси велики по сравнению с дебаевской длиной

$$\Delta x \gg L_g \sim (\epsilon \hbar^2/e^2 m N^{1/3})^{1/2} , \quad (2)$$

то имеет место квазинейтральность, т. е. концентрация электронов $n \approx N$. В электронной подсистеме быстро устанавливается равновесие, и из условия постоянства химического потенциала

$$M = (3/8\pi)^{2/3} (2\pi\hbar)^2 \frac{N^{2/3}}{2m} - e\varphi = \text{const} \quad (3)$$

нетрудно найти формулу для внутреннего электрического поля $E = -\nabla\varphi$. Это поле вызывает дрейфовый поток ионизованных атомов примеси, который, используя соотношение Эйнштейна для связи подвижности с коэффициентом диффузии, можно привести к следующему виду

$$j_{\text{др}} = -(\pi/6)^{1/3} (N/N_c)^{2/3} D_0 \nabla N. \quad (4)$$

При выполнении неравенства (1) $j_{\text{др}}$ превосходит обычный диффузионный поток $j_{\text{диф}} = -D_0 \nabla N$. Таким образом показано, что учет вырождения позволяет объяснить сильную нелинейность диффузии влиянием внутреннего электрического поля, при этом $D(N) \propto N^{2/3}$. По существу, речь идет об амбиполярной диффузии в квазинейтральной плазме в условиях, когда компонента с большей подвижностью является вырожденной. Для классической плазмы в соответствующей ситуации коэффициент амбиполярной диффузии равен $D = 2D_0$.

Численные оценки показывают, что предложенный механизм нелинейности необходимо учитывать при расчете концентрационных профилей для характерных значений уровней легирования, применяемых в производстве полупроводниковых приборов (например, высоколегированного эммитера в биполярном транзисторе). Наиболее ярко рассмотренная нелинейность должна проявляться в GaAs, для которого при характерных температурах диффузионного отжига $N_{c,v} \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и возможно увеличение коэффициента диффузии на два порядка. Разумеется, при количественном сопоставлении с экспериментальными данными не следует исключать одновременное проявление других известных механизмов нелинейности, особенно при высоких температурах.

В заключение отметим, что уравнение диффузии, соответствующее току (4), допускает точное решение для задачи о диффузии из бесконечно тонкого источника (3).

Литература

1. Технология СБИС. Под ред. С.Зи. М.: Мир, 1986.
2. Zaromb S. IBM J. Res. and Development, 1957, 1, 57.
3. Зельдович Я.Б., Компанеец А.С. Сборник, посвященный семидесятилетию академика А.Ф.Иоффе. М.: изд.-во АН СССР, 1950, с. 61.

Поступила в редакцию

2 июня 1989 г.