

Низкотемпературная диффузия лития в твердые растворы кремний–германий

© И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов, Э.Н. Бахранов

ФТИ НПО "Физика–Солнце" Академии наук Узбекистана,
700084 Ташкент, Узбекистан

E-mail: atvi@physic.uzsci.net

(Поступила в Редакцию 5 марта 2001 г.)

Исследовано влияние содержания германия на диффузию лития в твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при температурах 300–500°С. Установлено, что при понижении температуры с ростом содержания германия резко уменьшаются коэффициент диффузии и предельная растворимость лития. Причем с ростом температуры диффузии темп спада коэффициента диффузии лития в зависимости от состава твердого раствора уменьшается, что обусловлено влиянием упругих напряжений решетки, создаваемых изовалентными атомами германия.

Как известно, литий является единственной мелкой примесью, которую применяют для получения сильно-компенсированных i -областей кремниевых детекторов ионизирующего излучения [1]. При этом компенсация проводится методом электрического дрейфа лития из тонкого приповерхностного слоя, в который осуществляется предварительное введение лития при 500–600°С в течение ~ 5 min с резким последующим охлаждением, тогда как дрейф проводится при 65–100°С.

Литературные данные о коэффициенте диффузии лития D_{Li} не только в кремнии, но и в других полупроводниках характеризуются чрезвычайно большим разбросом величин D_{Li} (на несколько порядков) [2]. Данное обстоятельство связано прежде всего с тем, что литий, диффундируя по междоузлиям, эффективно взаимодействует с фооновыми примесями и дефектами, вносимыми при выращивании, а также при термических и других обработках материала.

В [3] показано, что ядерные детекторы на основе монокристаллов сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ обладают в 3 раза большей скоростью счета, чем кремниевые детекторы. Однако некоторые вопросы, связанные с низкотемпературной диффузией лития в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, остаются открытыми. Как известно, введение изовалентной примеси германия в решетку кремния приводит к появлению искажений решетки кристалла, которые в свою очередь могут оказывать существенное влияние на диффузию и растворимость примесей. Так, коэффициент диффузии фосфора в сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ растет с содержанием германия [4].

В случае лития, диффундирующего по междоузельному механизму, локальные напряжения решетки монокристалла $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ также могут существенно влиять на этот процесс. Однако в литературе отсутствует информация о низкотемпературной диффузии лития в этот материал.

В данной работе исследовано влияние содержания германия на диффузию лития в монокристаллах твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при температурах 300–500°С. Диффузию лития проводили путем погружения образцов в галлиевый расплав, насыщенный литием, в печи СУОЛ-44 в течение часа. В связи с низкой температурой расплава галлий отсутствует в объеме кристалла, тогда

как быстрое диффундирующая примесь лития проникает за это время на несколько микрон.

Поскольку диффузия лития чрезвычайно сильно зависит от предыстории кристалла, для более ясной интерпретации результатов все исследованные образцы вырезались из одного варизонного монокристалла $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с переменным составом от $x = 0$ до 35 at.% и с градиентом величины x около 0.7 at.% на 1 mm. Шайбы имели толщину около 300 μm , и мы полагали, что содержание германия в шайбе равно среднему значению. Следует отметить, что изменение содержания германия в шайбе из-за варизонности составляет около 0.21 at.%. Поскольку все шайбы взяты из одного кристалла, выращенного, очевидно, в одном технологическом процессе, все условия выращивания образцов идентичны. Следовательно, параметры образцов, за исключением содержания германия в них, также являются идентичными.

Монокристаллы твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ были выращены методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки [5]. Образцы монокристаллов твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с содержанием германия $0 < x < 35$ имели p -тип проводимости.

Как известно, удельная электропроводность полупроводника равна $\sigma = en\mu$ (n — концентрация электронов, μ — их подвижность), при комнатной температуре $n = N_{\text{Li}}$. Следовательно, $\sigma = eN_{\text{Li}}\mu$. Таким образом, распределение $\sigma(l)$ по глубине образца l может быть использовано для определения профиля концентрации лития $N_{\text{Li}}(l)$.

Распределение $\sigma(l)$ на образцах измерялось односторонним методом [6]. При расчете профиля концентрации $N_{\text{Li}}(l)$ учитывалась зависимость подвижности носителей от состава сплава кремний–германий [7,8].

Известно, что при сравнимых температурах диффузии коэффициент диффузии и растворимость лития в германии выше, чем в кремнии. Однако, как видно из рисунков, при температурах диффузии 325 и 400°С наблюдается аномальное поведение: с ростом содержания германия резко уменьшаются коэффициент диффузии (рис. 1) и предельная растворимость лития (рис. 2). Темп спада коэффициента диффузии лития в зависимости

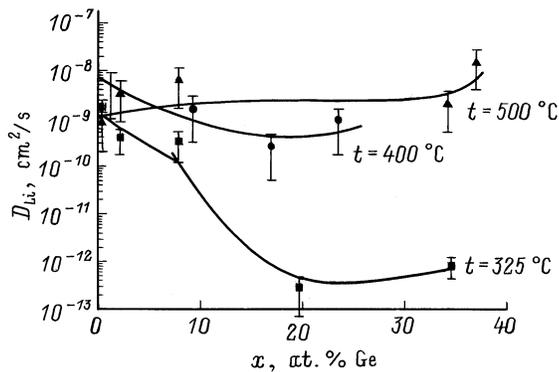


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии лития от содержания германия в твердых растворах кремний–германий.

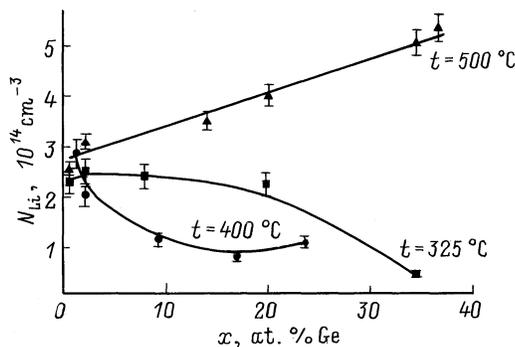


Рис. 2. Зависимость предельной растворимости лития от содержания германия в твердых растворах кремний–германий.

от состава твердого раствора сильнее проявляется при низких температурах диффузии. Как уже упоминалось выше, в случае диффузии по вакансионному механизму коэффициент диффузии фосфора возрастал с ростом x . Нами предполагалось, что это связано с генерацией вакансий в поле упругих напряжений решетки.

В данном случае при междуузельной диффузии введение атомов германия, создавая упругие напряжения решетки, видимо, нарушает периодичность междуузельного потенциала решетки и препятствует перескоку атомов лития по междуузлиям при температурах диффузии до 500°C . Наблюдаемый при $x > 0.20$ рост коэффициента диффузии вызван увеличением эластичности решетки сплава с возрастанием содержания германия.

Растворимость примесей (x_{Li}) в полупроводниках определяется, как известно, величиной $\Delta H_{\text{Li}}^\alpha$ (энтальпия перехода атомов примеси в твердый раствор) и изменением колебательной энтропии ΔS_{vib} [2], а также вкладом кулоновского взаимодействия с носителями тока [9,10]

$$\ln(x_{\text{Li}}) = -\Delta H_{\text{Li}}^\alpha/T + \Delta S_{\text{vib}} + Q(T). \quad (1)$$

Здесь $Q(T)$ — кулоновская добавка в (1) из [9,10].

Анализ концентрационной зависимости растворимости лития с помощью выражения (1) показывает, что

уменьшение растворимости лития определяется изменением величины $\Delta H_{\text{Li}}^\alpha$. Однако при температуре диффузии 500°C и выше тепловая энергия атомов лития в решетке сплава становится сравнимой с потенциальными барьерами, формируемыми упругими напряжениями решетки из-за присутствия изовалентных атомов германия. В результате поведение атомов лития в решетке сплава перестает быть аномальным. Поскольку значение kT при 500°C имеет величину порядка 0.044 eV , видимо, потенциальные барьеры, вносимые атомами германия, имеют величину порядка сотых eV.

Таким образом, обнаружено аномальное поведение коэффициента диффузии и растворимости лития в сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при низких температурах. Высказано предположение, что оно связано с нарушениями периодичности междуузельного потенциала решетки, вызванными локальными упругими напряжениями решетки, вносимыми изовалентными атомами германия.

Список литературы

- [1] С.А. Азимов, Р.А. Муминов, С.Х. Шамирзаев, А.Я. Яфасов. Кремний-литиевые детекторы ядерного излучения. ФАН, Ташкент (1981).
- [2] В.М. Глазов, В.С. Земсков. Физико-технические основы легирования полупроводников. Наука, М. (1967).
- [3] М.С. Саидов, Р.А. Муминов, У.Б. Джурраев, Н.А. Матчанов. Атом. энергия **81**, 4, 56 (1994).
- [4] М.С. Саидов, И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов. Узб. физ. журн. **4**, 75 (1994).
- [5] M.S. Saidov, A. Yusupov, R.S. Umerov. J. Crystal Growth **52**, 514 (1981).
- [6] В.В. Ботавин. В кн.: Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. Сов. радио, М. (1976).
- [7] М.С. Саидов, А. Юсупов, В.В. Никитин, К. Абдримов, И.Г. Атабаев. ФТП **15**, 6, 1221 (1981).
- [8] М.С. Саидов, А. Юсупов, У. Сирожов. Тез. докл. 6-го координац. совещ. по исследованию сплавов кремний–германий. Тбилиси (1986). С. 21.
- [9] И.Г. Атабаев. ФТТ **38**, 8, 2338 (1996).
- [10] М.С. Саидов, И.Г. Атабаев, Э.Н. Бахранов. Узб. физ. журн. **6**, 25 (1998).