

- [4] Sturge M.D., G y o r g y E.M., L e
C r a w R.G., R e m e i k a J.P. - Phys.
Rev., 1969, v. 180, p. 413-423.
- [5] R u d o w i c z Cz. - J. Appl. Phys., 1979,
v. 50 (II), p. 7745-7717.
- [6] А б р а г а м А., Б л и н и Б. ЭПР переходных ионов.
М.: Мир, 1972, т. 1. 652 с.

Симферопольский государственный
университет им. М.В. Фрунзе

Поступило в Редакцию
12 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 10

26 мая 1988 г.

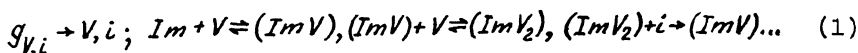
О ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ ПРИ ИОННО-ЛУЧЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОЛУПРОВОДНИКИ

И.В. В е р н е р, А.Б. Д а н и л и н

Для ионной имплантации характерно, что процесс внедрения ускоренных ионов в кристаллическую мишень сопровождается генерацией радиационных дефектов, концентрация которых на порядки величины превышает концентрацию бомбардирующих частиц, а их природа зависит от условий имплантации (массы ионов, дозы, температуры облучения и т.д.). Спектр радиационных нарушений исключительно широк: от пар Френкеля до полностью аморфизованных областей, что существенно определяет свойства ионнолегированных кристаллов. Естественно, возникает вопрос: нельзя ли найти достаточно универсальный подход к анализу поведения радиационных нарушений, чтобы эффективно управлять свойствами облучаемых кристаллов на стадии взаимодействия с внешним пучком?

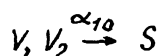
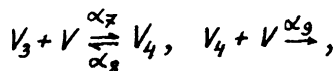
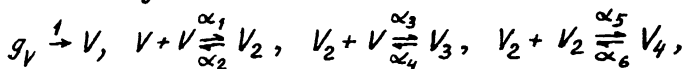
Для различных процессов, являющихся проявлением взаимодействия ионно-лучевого потока и полупроводника есть одно общее, объединяющее их начало. Это то, что твердое тело под действием ионизирующего пучка есть система, находящаяся далеко от термодинамического равновесия. При определенных значениях основных параметров в таких системах возможно так называемое „когерентное“ поведение ансамбля, составляющих объект частиц, что приводит к появлению неустойчивостей различного типа, развитие которых обуславливает динамическое упорядочение, а именно, могут возникнуть периодические, квазипериодические, временные, пространственные, пространственно-временные распределения физических величин [1]. Тот или иной тип поведения системы зависит от того, какие параметры мы фиксируем, какой характер нелинейности реализуется в конкретной неравновесной ситуации, какие параметры системы и внешнего воздействия можно варьировать.

В веществе под действием пучка ионов „частицами“, между которыми возможно кооперативное взаимодействие являются точечные дефекты (ТД): вакансии (В), межузельные атомы (МА), атомы примеси, комплексы ТД с атомами примесей и т.п. В экспериментах проявлениями процессов динамического упорядочения являются различного рода квазипериодические, слоистые примесно-дефектные образования, скачки на дозовых и временных зависимостях концентрации ТД и т.п. (см., например, [2, 3]). Наконец, предельные случаи ионной имплантации – аморфизация полупроводника, а также синтез новых соединений являются процессами, характеризующимися многими внешними признаками кинетического фазового перехода (наличие зародышей, критические флуктуации, резкие границы раздела ...). К перечисленному следует добавить еще ряд интересных и практически важных обстоятельств. Характер взаимодействия ТД во многих случаях приводит к тому, что возникают условия для организации обратных связей, служащих причиной потери устойчивости. В частности, реакции [4]



являются аналогами реакций с субстратным ингибированием (в (1) $g_{V,i}$ – темпы генерации В и МА, Im – атомная доля свободной примеси, (ImV) , (ImV_2) – комплексы). Взаимодействие (1) приводит к колебательному режиму релаксации концентрации ТД. Управляющими параметрами в этом случае являются $g_{V,i}$ и Im^{tot} – общая концентрация примеси в веществе.

Реакция типа $Im^{St} + V \rightarrow (Im^i V) + V$, где Im^{St} – примесь в узле; Im^i – примесь в межузлии, – есть аналог каталитической. Она может, например, проявляться в Si , легированном бором при $900^\circ < T_{обл} < 1000^\circ \text{C}$ [5]. Нетрудно показать, что процесс накопления вакансионных комплексов (ВК) с эквивалентным содержанием В $j \geq 5$.



(S – стоки) также может сопровождаться изменением характера эволюции – резким сигмоидальным переходом между состояниями с различной по ВК степенью дефектности при определенных значениях величины „накачки“ g_V и кинетических коэффициентов α_k .

Если и здесь проводить аналогию с другими неравновесными объектами, то явление накопления ВК по механизму, приводящему к неустойчивому режиму (скачок), есть аналог М-стадии образования предбиотического полимера [6].

Приведем еще один пример простой схемы взаимодействия ТД, при анализе которой можно показать, что критические параметры, определяющие потерю устойчивости системы ТД могут контролироваться:

$$g_V \xrightarrow{1} V, g_i \xrightarrow{1} i, (g_W \xrightarrow{1} W), W_j + V \xrightarrow{\lambda_1} W_{j+1}, W_j + i \xrightarrow{\lambda_3} W_{j-1},$$

$$i \xrightarrow{\lambda_4} S, V \xrightarrow{\lambda_2} S, (W_j \xrightarrow{\lambda_5} S). \quad (2)$$

W_j - ВК с эквивалентным содержанием В j ; λ_k ($k = 1, \dots, 6$) - кинетические коэффициенты. В (2) учтены возможности взаимодействия нарушений с какими-либо иными стоками. Кинетические уравнения для (2) можно записать, применяя широко используемые в радиационной физике методы квазихимии. Так, для концентрации индивидуальных В (C_V) имеем

$$\frac{dC_V}{dt} = g_V + \lambda_2 C_W - \lambda_1 C_V \cdot C_W - \lambda_5 \cdot C_V \quad (3)$$

(величины в (5) будем считать "безразмерными"). В адиабатическом приближении [1] и при $g_W \approx 0$ стационарные (но неравновесные) решения для вакансионных переменных таковы:

$$C_V^{St} = \frac{g_V}{\lambda_5}, \quad C_W^{St} = 0.$$

Линейный анализ устойчивости стационарных решений дает характеристическое уравнение

$$(\omega + \lambda_5) \cdot (\omega + \lambda_2 - \lambda_1 \cdot C_V^{St}) = 0,$$

откуда видно, что система теряет устойчивость при $C_V^{St} > \lambda_2/\lambda_1$ или $g_V > \frac{\lambda_5 \cdot \lambda_2}{\lambda_1}$. Этот результат согласуется с экспериментальными данными 7 о существовании пороговой концентрации первичных дефектов, при которой начинается образование крупных разупорядоченных областей. По смыслу g_V , λ_k легко определить, что

$$g_V, \lambda_k \sim \dot{\phi}, T, \Delta E_V,$$

где T - температура образца, $\dot{\phi}$ - скорость набора дозы (интенсивность облучения), ΔE_V - средняя энергия реакции захвата В на W - центр. Пороговые эффекты возникают при варьировании в эксперименте температуры, энергии и массы ионов, степени дефектности (исходной) образца, дозы и скорости набора дозы.

Таким образом, можно сделать вывод: используя общие свойства, присущие сильнонеравновесным объектам, в облучаемом полупроводнике можно целенаправленно стимулировать режимы, приводящие к

динамическому упорядочению – образованию пространственно-временных структур примеси и дефектов. В каждой конкретной ситуации необходимо определить значение или диапазон значений доступных управлению величин, при которых в полной мере проявляются нелинейные свойства системы, приводящие к нужному характеру эволюции – периодическому, слоистому распределению, переходу к новой фазе и т.п.

Авторы благодарят В.Н. Мордковича за интерес к работе и ценные замечания.

Л и т е р а т у р а

- [1] Х а к е н Г. Синергетика: иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах, М.: Мир, 1985, 419 с.
- [2] Ку л и к а у с к а с В.С., М о р д к о в и ч В.Н., Р а з г у л я е в И.И. В сб.: Имплантация в полупроводники и другие материалы, Вильнюс, 1983, с. 170-171.
- [3] М а ж и р и н А.П., Г е р а с и м е н к о Н.Н. Использование $C-V$ метода для обнаружения аморфных включений в кремний. Препринт ИФП СО АН СССР № 1-84, Новосибирск, 1984. 19 с.
- [4] В е р н е р И.В., Ц у к а н о в В.В. – ЖТФ, 1985, т.55, № 11, с. 2236-2238.
- [5] В а в и л о в В.С., К и в А.Е., Н и я з о в а О.Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. 368 с.
- [6] G o l d b e t e r A., N i c o l i s G. – Biophysik, 1972, v. 8, p. 212-219.
- [7] Физические процессы в облученных полупроводниках. / Под ред. Л.С. Смирнова. Новосибирск: Наука, 1977. 256 с.

Московский институт
электронной техники

Поступило в Редакцию
22 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 10

26 мая 1988 г.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Ю.А. Б ы к о в с к и й, В.И. Р о м а н ю к,
С.М. С и л ь н о в

Интерес к изучению процессов, происходящих при нагреве и формировании лазерной плазмы, а также использованию продуктов ее разлета в ускорительной технике стимулировал разработку методик и проведение исследований характеристик потоков отрицательных