

- [9] Павлов Н. И. // ФТП. 1970. Т. 4. В. 10. С. 1918—1921.
 [10] Костышин М. Т., Стронский А. В., Ушенин Ю. В. // Тез. докл. Всес. конф. «Структурно-образные полупроводники». Л., 1985. С. 314—315.
 [11] Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М., 1978. 248 с.
 [12] Shaw D. // J. Cryst. Growth. 1988. V. 86. N 4-6. P. 778—796.
 [13] Барацова Н. В., Ванюков А. В., Томсон А. С. // Свойства легированных полупроводников. М., 1977. С. 140—143.
 [14] Destefanis G. L. // J. Vac. Sci. Techn. (A). 1985. V. 3. N 1. P. 171—175.

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

Получено 9.08.1989
 Принято к печати 14.11.1989

ФТП, том 24, вып. 3, 1990

КОМПЕНСАЦИЯ КРЕМНИЯ ПРИ ДРЕЙФЕ ЛИТИЯ ИЗ ОГРАНИЧЕННОГО РЕЗЕРВУАРА

Андреев В. М., Афанасьева Н. П., Еремин В. К.,
 Строкан Н. Б., Тархин Д. В.

Компенсация кремния и германия методом дрейфа ионов лития в электрическом поле широко применяется для создания высокоомных и высокоодно-родных полупроводниковых кристаллов [1]. Традиционно дрейф осуществляется в поле обратного смещенного $n-p$ -перехода, образованного предварительной диффузией донорной примеси лития в исходный материал p -типа проводимости. Таким образом, диффузионный литиевый резервуар играет двойную роль: он служит в качестве источника ионов, втягиваемых полем в глубь полупроводника, и одновременно представляет собой n^+ -контакт, чем обеспечивает двойную характеристику структуры в целом. При истощении резервуара лития структура теряет запорные свойства и дрейф оказывается невозможным. По-видимому, с этим связаны описанные в литературе случаи резкого повышения тока через образец при длительном дрейфе в кремнии [2].

В настоящей работе описан эксперимент, в котором впервые продемонстрирован дрейф ионов лития после истощения резервуара. Показано, что может быть осуществлен «отрыв» компенсированной области от контакта.

Суть проделанного эксперимента в следующем. Перед диффузией лития в кремниевый образец его поверхность была легирована фосфором. Тем самым был создан резкий несимметричный n^+-p -переход. Поскольку фосфор имеет коэффициент диффузии, на много порядков меньший, чем литий, можно утверждать, что его распределение не успевает заметно деформироваться за время компенсации. Следовательно, независимо от присутствия лития у контакта структура сохраняет свойства $n-p$ -перехода. Это позволяет осуществить дрейф ионов даже после истощения литиевого резервуара.

В качестве исходного материала был взят кремний с исходной концентрацией акцепторов $N_A = 1.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Диффузия фосфора велась по стандартной технологии при температуре 1100°C в течение 3 ч. Глубина образовавшегося при этом n^+ -слоя составила 3 мкм. Затем сквозь этот слой осуществлялась диффузия лития при температуре 150°C в течение 20 с. Столь необычно низкая температура и малое время были выбраны для дозированного введения и создания достаточно малого резервуара лития у поверхности. Образец, подготовленный для дрейфа, представлял собой шайбу с поперечным сечением $S = 1.0 \text{ см}^2$ и толщиной 5.9 мм.

Дрейф осуществлялся при температуре 105°C и напряжении смещения 300 В. На рис. 1 приведены вольтфарадные характеристики структуры, снятые перед началом и в процессе дрейфа. Измерения проводились на частоте 1 кГц с помощью моста емкостей Е8-2. Отметим, что начальный этап процесса (кривые 2—4) укладывается в обычные рамки [3]. Однако кривая 5, соответствующая

щая 14 ч дрейфа, имеет вид, качественно отличающийся от предыдущих. Начиная с этого момента, $C(V)$ -характеристика структуры в области малых V начинает постепенно приближаться к исходной (кривая 1). Такая тенденция в поведении $C(V)$ может быть связана с образованием вблизи фосфорного n^+ -контакта достаточно протяженной области, имеющей p -тип проводимости. Причем разностная концентрация $N_A - N_D$ в этом слое, определенная по $C(V)$ -характеристикам, со временем увеличивается, приближаясь к исходной концентрации акцепторов.

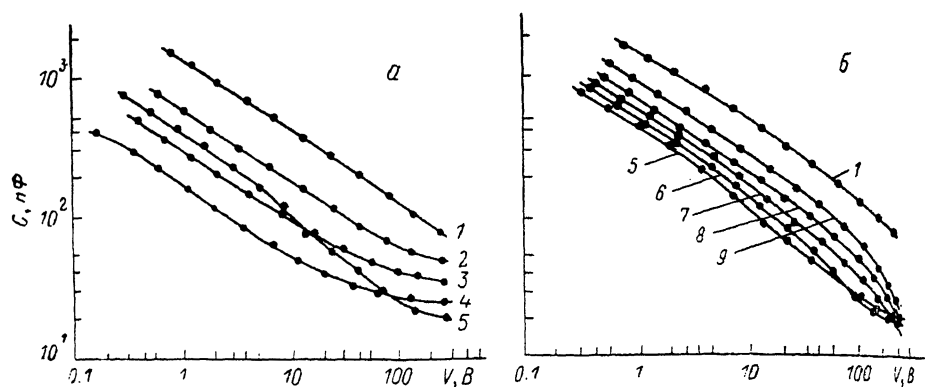


Рис. 1. Вольт-фарядные характеристики образца с ограниченным резервуаром лития в процессе компенсации.

a — начальная стадия процесса, *b* — образование вблизи контакта раскомпенсированного слоя. Время дрейфа, ч: 1 — 0, 2 — 1.0, 3 — 3.0, 4 — 6.0, 5 — 14.0, 6 — 19, 7 — 25, 8 — 48, 9 — 88.

Чтобы однозначно доказать факт раскомпенсации сформировавшейся i -области вблизи фосфорного n^+ -слоя, образец был распилен и сделан косой шлиф. После полировки шлиф окрашен проявляющим травителем, состоящим из плавиковой кислоты с добавлением нескольких капель азотной. На рис. 2 приведена фотография, показывающая итоговое распределение примесей в структуре. Отчетливо видно, что под n^+ -слоем (светлая полоска 1) образовалась

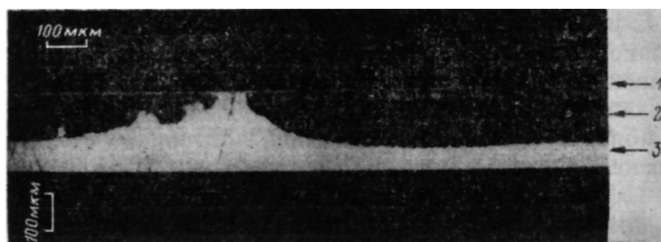


Рис. 2. Фотография шлифа на разрезе образца после полировки и обработки окрашивающим травителем.

1 — фосфорный n^+ -контакт, 2 — p -область, образовавшаяся в результате «отрыва» компенсированного слоя от контакта, 3 — область компенсации (n -типа).

протяженная область (2) толщиной ~ 120 мкм, имеющая темную окраску, следовательно, p -типа проводимости. Ниже расположена еще одна светлая область (3) — компенсированный литием слой.¹

Таким образом, впервые экспериментально доказана возможность компенсации полупроводников при дрейфе ионов из ограниченного резервуара. Показано, что может иметь место отрыв компенсированной области от контакта. Это открывает принципиально новые подходы к анализу дрейфовых свойств

¹ В средней части образца осталась область, где еще не произошел отрыв компенсированного слоя. По-видимому, резервуар лития был неоднороден по плоскости контакта, и в этом месте имелось локальное повышение его емкости.

примесей в условиях комплексообразования, так как появляется возможность исследования процессов развала комплексов в той области, из которой электрическим полем уже вытянуты свободные ионы. Отметим также, что результаты относятся не только к случаю дрейфа лития, а легко могут быть обобщены на случай других примесей, например водорода [4, 5].

Список литературы

- [1] Peil E. M. // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. N 2. P. 291—302.
- [2] Юскеселива Л. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1967. Т. 31. В. 2. С. 255—259.
- [3] Антонов А. С., Юскеселива Л. Г. Дрейф ионов лития в электрическом поле $p-n$ -перехода в кремнии и германии. София, 1972. 132 с.
- [4] Seager C. H., Anderson R. A. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 13. P. 1181—1183.
- [5] Tavendale A. J., Alexiev D., Williams A. A. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 3. P. 316—318.

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

Получено 31.10.1989
Принято к печати 14.11.1989

ФТП, том 24, вып. 3, 1990

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ ДЛЯ ГЛУБОКИХ $3d$ -УРОВНЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ $A^{IV}B^{VI}$

Кикоин К. А., Курек И. Г., Мельничук С. В.

Экспериментальные исследования последних лет позволили установить существование ряда универсальных химических тенденций в свойствах полупроводников, легированных примесями переходных металлов, в зависимости этих свойств от атомного номера примеси Z или типа матрицы [1, 2]. В частности, оказалось, что положение глубоких уровней (ГУ) в запрещенной зоне определяется универсальными « W -образными» зависимостями $E_i(Z)$, единными для всех матриц $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^{V}$. Подобные зависимости наблюдаются и для других физических величин (ковалентных радиусов $3d$ -элементов, параметра кристаллического поля и т. д.).

Общая теория ГУ установила, что одноэлектронное приближение среднего поля для энергий ГУ не дает удовлетворительного описания химических тенденций и основная особенность зависимости электронных характеристик d -ионов в полупроводниках от атомного номера определяется спиновыми эффектами — вкладом от обменного взаимодействия в энергию связи электрона в d -оболочке. Этот вклад меняет знак при заполнении оболочки наполовину, и поэтому зависимости всех электронных характеристик от Z имеют излом при Z , отвечающем конфигурации примесного d^5 -иона (в случае замещения в A^2B^{8-x} — это Mn) [3, 4]. Эта закономерность проявляется уже на уровне зависимости от Z потенциалов ионизации свободных d -атомов. Более тонкие особенности химических тенденций связаны в основном с ковалентными эффектами — вкладом от химических связей примесь—лиганд в энергию примесного состояния.

Хотя основные закономерности, определяющие химические тенденции в ряду $3d$ -примесей в полупроводниках, установлены, до настоящего времени отсутствуют последовательные расчеты зависимостей $E_i(Z)$ для систем $A^{IV}B^{VI}$, учитывающие как зонные (ковалентные) эффекты, так и поправки на мультиплетность (МП). В работе [4] разработана схема расчета МП, но одноэлектронные энергии среднего поля, к которым делаются эти поправки, фактически восстанавливаются из эксперимента. В данной работе на основе одноэлектронного расчета по методу ЛКАО в рамках «резонансной модели» глубоких d -уровней, методика которого описана в [5] и с учетом МП по методу Фаццио и др., предлагается количественное описание химических тенденций для $E_i(Z)$ в ряду соединений $A^{IV}B^{VI}$, легированных $3d$ -примесями.