

«монтажное ИЛИ», образуемую за счет открытых коллекторов на выходах ППЗУ. Выбор нужной пары ППЗУ осуществляется подачей на их V-входы импульсов разрешения выборки от переключателя диапазонов (ПД).

Остальные устройства (ЦАП, ОУ и УТР)— общие для всех шкал дальности.

Относительная нестабильность частоты следования тактовых импульсов в данной схеме составляет примерно 10^{-2} . При более строгих требованиях к этому параметру в качестве ГТИ нужно использовать генератор импульсов на микросхемах с кварцевой стабилизацией, обеспечивающий нестабильность частоты 10^{-4} — 10^{-5} (без термостатирования и принятия других мер термостабилизации), в сочетании с делителями частоты.

При увеличении количества импульсов выборки, например, до 25—30 (в целях повышения точности формирования кривой напряжения развертки), требования к отдельным элементам формирователя, естественно, должны быть пересмотрены. Прежде всего потребуются наращивание разрядности СТИ (до пяти разрядов при $N = 25$ —30), что достигается последовательным подключением к 4-разрядному счетчику К155ИЕ5 еще одного JK-триггера или одного разряда такого же счетчика. ППЗУ на микросхеме К155РЕ3 (32 слова на 8 разрядов) остается без изменений. Что же касается ЦАП, то в последние годы разработаны достаточно быстродействующие 12-разрядные интегральные ЦАП с временем установления меньше 0,5 мкс, управляемые от TTL-схем и рассчитанные на подключение ОУ типа 154УД3 с быстродействием 100 В/мкс и временем установления 0,2 мкс.

Рассмотренные принципы могут быть положены в основу построения формирователей электромагнитной развертки и специальной формы, когда закон перемещения луча по экрану ЭЛТ отличается от линейного.

Список литературы

1. Красноголовый Б. Н.— Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1, физ., мат. и мех., 1982, № 3, с. 12.
2. Красноголовый Б. Н.— Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1, физ., мат. и мех., 1983, № 1, с. 18.
3. Пенни П. И., Филиппов Л. И. Радиотехнические системы передачи информации.— М., 1984.
4. Горовой В. В., Духновский Л. Я., Прибыльский А. В.— Электронная промышленность, 1980, № 1, с. 41.
5. Полупроводниковые запоминающие устройства / Под ред. А. Ю. Гордонова.— М., 1981.
6. Лябин И. В. и др.— Электронная промышленность, 1975, вып. 4 (40), с. 65.

Поступила в редакцию 30.11.84.

УДК 621.315.292

П. Ф. ЛУГАКОВ, В. В. ЛУКЬЯНИЦА

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ДЕФЕКТНЫХ СКОПЛЕНИЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КРЕМНИИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТКАХ

Кристаллы кремния в ряде случаев содержат примесные или примесно-дефектные скопления, формирующиеся при выращивании материала или в результате высокотемпературных обработок, которыми обычно сопровождается трансмутационное, ионное легирование и т. д. В предлагаемой работе выполнены сравнительные эксперименты по изучению свойств скоплений, образованных в кремнии при термообработке облученных эквивалентными по числу смещенных атомов потоками медленных (трансмутационное легирование) или быстрых нейтронов. Заключение о свойствах скоплений сделаны на основе анализа их влияния на процессы накопления при облучении гамма-квантами Co^{60} и отжиге

точечных радиационных дефектов (РД) вакансионного (E -центры, дивакансии) и междоузельного (комплексы междоузельный — узловой углероды $C_I - C_S$, междоузельный углерод C_I) типов.

Материал и методика

Использовались зонные кристаллы n -кремния с $\rho = 200-500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для экспериментов были приготовлены три группы образцов: первая и вторая — идентичные кристаллы, облученные эквивалентными по числу смещенных атомов потоками ($\Phi_n = 1 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) медленных или быстрых нейтронов, а затем подвергнутых термообработке (ТО) при 800°C в течение 2 ч. Третья — контрольная группа образцов, прошедших такую же ТО без предварительного нейтронного облучения. Измерялись температурные (80—350 К) зависимости коэффициента Холла и электропроводности на различных этапах облучения приготовленных таким образом образцов гамма-квантами Co^{60} ($t_{\text{обл}} \leq 50^\circ \text{C}$) или 15-минутного изохронного отжига.

Результаты и их обсуждение

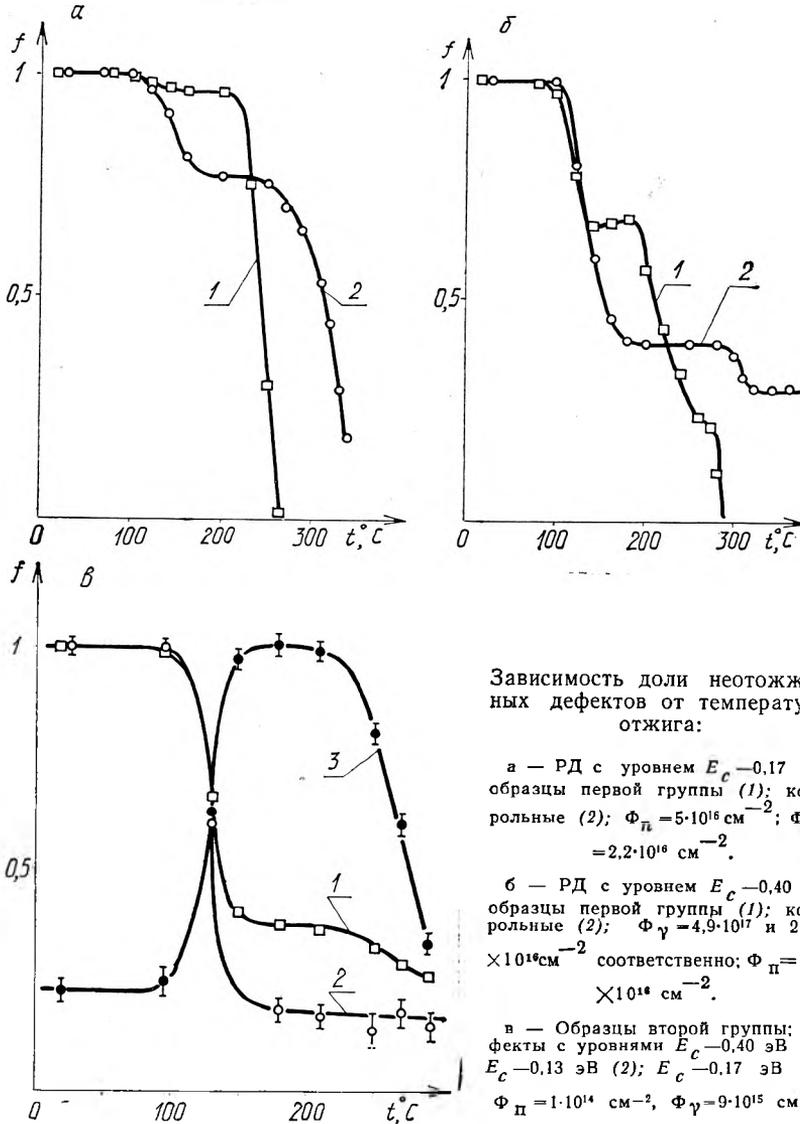
При гамма-облучении образцов всех групп образуются РД с «глубокими» ($\approx E_c - 0,40 \text{ эВ}$) и относительно «мелкими» ($E_c - 0,13 \text{ эВ}$, $E_c - 0,17 \text{ эВ}$) уровнями в запрещенной зоне. На рисунке приведены зависимости доли f неотожженных дефектов от температуры отжига. Здесь $f = \frac{N_T}{N_\Phi}$ или $f = \frac{n_0 - n_T}{n_0 - n_\Phi}$, где N_T и N_Φ — концентрации соответствующих дефектов после облучения и при отжиге, а n_0 , n_Φ и n_T — концентрации свободных электронов ($T = 300 \text{ К}$) до, после облучения и на различных этапах отжига. В таблице даны значения скоростей введения η всех РД. Энергетическое положение уровней РД и особенно скоростей их введения оказывается не одинаковым для образцов различных групп. Так, в контрольных образцах с равными скоростями образуются междоузельные комплексы $C_I - C_S$ (уровень $E_c - 0,17 \text{ эВ}$) и E -центры — дефекты вакансионного типа с уровнем $E_c - 0,42 \text{ эВ}$ [1]. В образцах первой группы более эффективно по сравнению с E -центрами вводятся комплексы $C_I - C_S$. Заметим также, что здесь скорость введения E -центров ($\eta_{0,40}$) существенно меньше, чем в контрольных кристаллах. Характерной особенностью для образцов второй группы является образование с достаточно высокой скоростью РД с уровнем $E_c - 0,13 \text{ эВ}$, отсутствовавшего в двух других группах образцов. При этом сумма величин скоростей введения РД с «мелкими» уровнями ($E_c - 0,13$ и $E_c - 0,17 \text{ эВ}$) сравнима с $\eta_{0,40}$ в этом материале.

Скорости (η) введения РД при облучении гамма-квантами Co^{60}

Группы исследуемых образцов	$\eta, \text{см}^{-1}$		
	$E_c - 0,13 \text{ эВ}$	$E_c - 0,17 \text{ эВ}$	$E_c - 0,40 \text{ эВ}$
Первая	—	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Вторая	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Контрольная	—	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$

Различается также и характер отжига дефектов с «мелкими» и «глубокими» уровнями в исследуемых кристаллах (см. рисунок). Так, комплексы $C_I - C_S$ в образцах первой группы и контрольных отжигаются в два этапа, первый из которых обусловлен их взаимодействием с E -центрами [2]. Однако на первом этапе в контрольных кристаллах комплексов $C_I - C_S$ отжигается значительно больше, чем в образцах первой группы

(см. рисунок, а). Отличительной особенностью отжига образцов второй группы является дообразование (отрицательный отжиг) этих комплексов в интервале температур 100—160 °С. Необходимо подчеркнуть также, что в образцах первой и второй групп комплексы $C_I - C_S$ полностью отжигаются при более низких температурах, чем в контрольных (см. рисунок, а, в).



РД с «глубокими» ($\geq E_c - 0,40$ эВ) уровнями во всех группах образцов отжигаются в три стадии. На первой из них происходит отжиг E -центров, на втором — дивакансий и на последней ($t \approx 500$ °С) — фосфорсодержащих комплексов типа фосфор—две (или три) вакансии [1, 3].

Отметим следующее: во-первых, E -центры в образцах первой группы и контрольных отжигаются (см. рисунок, б) в одном температурном интервале. Но доля отоженных E -центров, а соответственно и концентрация восстановившихся при отжиге свободных электронов в зоне проводимости оказывается более высокой в контрольных кристаллах.

Во-вторых, в образцах первой группы имеет место сдвиг в сторону меньших значений температуры отжига дивакансий и фосфорсодержащих комплексов. Для образцов второй группы характерно то, что отжиг

E -центров и РД с уровнем $E_c = 0,13$ эВ происходит в том же интервале температур, где дообразуются комплексы $C_I - C_S$ (см. рисунок, *в*).

Попытаемся объяснить полученные результаты. При облучении кремния нейтронами различных энергий, в том числе и медленными при трансмутационном легировании, образуются области скоплений, в которых локализируются РД, перестраивающиеся при последующей ТО (800°C , 2 ч.) в высокостабильные вакансионные и междоузельные ассоциации [4]. В результате таких перестроек формируются неравномерно распределенные в объеме кристалла различного рода дефектные скопления, создающие вокруг себя из-за искажения кристаллической решетки электрические и деформационные поля. [5]. Под воздействием таких полей к дефектным скоплениям могут направленно мигрировать подвижные при последующем гамма-облучении и отжиге дефекты и их компоненты.

Сформированные при термообработке трансмутационно-легированного кремния дефектные скопления состоят, как предполагается [2], преимущественно из дефектов междоузельного типа (димердоузлия, междоузельный углерод). Образованные при облучении гамма-квантами Co^{60} вакансии, диффундирующие к таким скоплениям, могут здесь аннигилировать с междоузельными дефектами или объединяться в дивакансии. По этой причине в объеме кристалла концентрация свободных вакансий, способных участвовать в образовании комплексов с примесными атомами (фосфор, кислород, углерод), оказывается намного меньше в образцах первой группы по сравнению с контрольными, где отсутствовали дефектные скопления. По нашему мнению, этим обусловлена более низкая эффективность введения E -центров в кристаллах первой группы, в силу чего их доля по отношению к другим дефектам в этом материале существенно меньше (см. рисунок, *б*). Надо учесть также, что в таких образцах вблизи скоплений вакансии находятся в повышенных концентрациях, поэтому здесь велика вероятность их объединения в дивакансии, что приводит к увеличению доли последних по отношению к E -центрам.

В результате взаимодействия вакансий с междоузельными дефектами скоплений происходит освобождение C_I и собственных междоузлий, которые затем принимают участие в образовании комплексов $C_I - C_S$. По-видимому, это и определяет достаточно высокую эффективность введения таких комплексов в образцах первой группы.

Изменение температуры отжига некоторых дефектов также обусловлено присутствием в объеме кристалла примесно-дефектных скоплений. Как показано при исследовании дислокационного кремния [3], из-за наличия полей упругих напряжений уменьшается температура отжига дивакансий, фосфорсодержащих комплексов и комплексов $C_I - C_S$, как и при отжиге облученных гамма-квантами Co^{60} кристаллов первой группы. При этом необходимо отметить то, что, хотя и имеет место уменьшение температуры отжига комплексов $C_I - C_S$ и дивакансий, отжигаются оба этих РД в одном и том же интервале температур (см. рисунок, *б*), как и в контрольных образцах (см. рисунок, *а*). Следовательно, при отжиге комплексы $C_I - C_S$ на первом этапе взаимодействуют с E -центрами, а на втором — с дивакансиями.

В образцах второй группы комплексы $C_I - C_S$ при гамма-облучении образуются с весьма низкой эффективностью. Основными здесь являются РД с уровнем $E_c = 0,13$ эВ. Отметим следующие экспериментальные результаты, которые необходимо принять во внимание при установлении природы этого дефекта.

1. Отжиг РД с уровнем $E_c = 0,13$ эВ в образцах второй группы (см. рисунок) сопровождается дообразованием комплексов $C_I - C_S$ в концентрациях, сравнимых с концентрацией отжигающихся дефектов. Это значит, что РД с уровнем $E_c = 0,13$ эВ практически полностью перестраиваются в междоузельные комплексы.

2. РД с уровнем $E_c = 0,17$ эВ в образцах первой группы образуются с малой скоростью, поэтому генерируемые гамма-квантами междоузлия

могут участвовать в образовании других дефектов междоузельного типа, возможно, дефектов с уровнем $E_c - 0,13$ эВ.

3. Как видно из таблицы, скорости введения дефектов с «глубокими» и «мелкими» уровнями (соответственно дефектов вакансионного и междоузельного типов) в образцах второй и третьей групп оказываются примерно равными. Из этого следует, что «расход» создаваемых гамма-облучением вакансий и междоузлий на образование электрически активных комплексов также одинаков.

С учетом отмеченных обстоятельств можно сделать заключение о междоузельной природе дефектов с уровнем $E_c - 0,13$ эВ, которые при отжиге перестраиваются в комплексы $C_I - C_S$ (см. рисунок, в, кривые 2, 3). Логично предположить, что таким дефектом может быть междоузельный углерод (C_I). Однако температура его отжига, как правило, гораздо меньше ($\leq 100^\circ\text{C}$), чем дефектов с уровнем $E_c - 0,13$ эВ в образцах второй группы. С нашей точки зрения, такое различие в температурах отжига дефекта обусловлено присутствием в объеме кристалла сформированных при ТО дефектных скоплений, с чем связано также уменьшение температур отжига комплексов $C_I - C_S$ и дивакансий в этих образцах (см. рисунок, в, кривые 1, 3). Действительно, генерируемые гамма-квантами Co^{60} междоузельные атомы кремния создают C_I , подвижные уже при температуре облучения. Стоком для них в контрольных образцах является узловый углерод, при взаимодействии с которым образуется комплекс $C_I - C_S$. Иная ситуация имеет место в образцах второй группы, содержащих дефектные скопления, к которым диффундирует C_I , накапливаясь вблизи них. Из-за наличия окружающих скопления полей C_I оказываются здесь неподвижными до $t \approx 100^\circ\text{C}$, когда они полностью отжигаются в контрольных образцах. При $t > 100^\circ\text{C}$ начинают отжигаться E -центры, которые направленно мигрируют в исследуемых кристаллах к скоплениям дефектов, как и в дислокационном кремнии [3]. Накапливаясь у скоплений, E -центры частично компенсируют создаваемые скоплениями поля и тем самым способствуют «высвобождению» (отжигу) C_I . Став свободными, C_I взаимодействуют с узловым углеродом с образованием комплексов $C_I - C_S$, что и наблюдается экспериментально (см. рисунок, в).

Таким образом, свойства дефектных скоплений, образующихся при термообработке облученного медленными (трансмутационное легирование) и быстрыми нейтронами кремния, различны. В первом случае дефектные скопления представляют собой центры аннигиляции для вакансий, а во втором — стоки (геттеры) для подвижных в условиях эксперимента РД, и вблизи них эффективно идут процессы комплексообразования.

Список литературы

1. Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В.—ФТП, 1983, т. 17, вып. 1, с. 166.
2. Föll H., Gosele U., Kobbesen B. O.—J. Cryst. Growth. 1977, v. 40, p. 90.
3. Kazakevich L. A., Lugakov P. F.—Phys. Stat. Sol. (a), 1982, v. 74, № 1, p. 113.
4. Kuznetsov V. I., Lugakov P. F.—Phys. Stat. Sol. (b), 1982, v. 112, № 2, p. 457.
5. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках.—М., 1974.

Поступила в редакцию 17.12.84.

УДК 535.399

А. М. БЕЛЬСКИЙ, О. Ю. ШАЛИН

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ ГАУССОВА ПУЧКА ОТ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ

При призмном вводе излучения в планарный волновод конечной толщины в отраженном от основания призмы пучке наблюдаются так называемые темные m -линии [1]. В работах [1, 2] появление темных