

06;12

## Фоновое легирование пленок при молекулярно-лучевой эпитаксии кремния

© Б.З. Кантер, А.И. Никифоров, О.П. Пчеляков

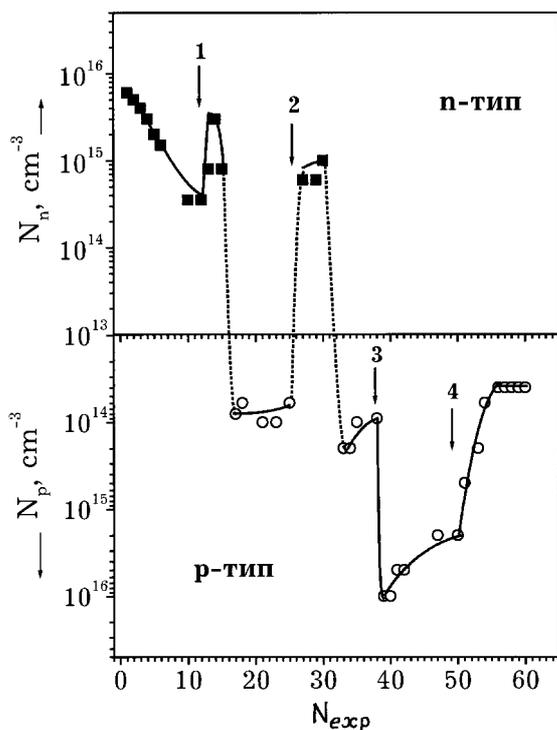
Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 14 июля 1997 г.

Выполнен анализ и обобщены уникальные результаты, полученные при создании эпитаксиальных слоев кремния с предельно низкой концентрацией фоновых примесей для ИК-фотоприемников с блокированной примесной фотопроводимостью. Исследован процесс изменения типа и концентрации электрически активных фоновых примесей в пленках, полученных при молекулярно-лучевой эпитаксии на всех этапах эксплуатации установки: от первого запуска до получения пленок с предельно низким уровнем фоновой примеси  $< 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Установлены закономерности и механизм изменения типа и уровня фонового легирования при работе установки.

Развитие и промышленная реализация метода молекулярно-лучевой эпитаксии показали, что он является лучшим методом получения многослойных эпитаксиальных структур с атомной гладкостью границ, прецизионно заданной толщиной слоев, составом и профилем легирования. Однако при реализации процесса молекулярно-лучевой эпитаксии в высоковакуумных установках качество структур лимитируется глубиной вакуума и производительностью системы откачки. На параметрах пленок отрицательно сказывается ограничение объема вакуумной камеры при развитой поверхности ее стенок, накапливающих и отдающих компоненты молекулярных пучков и атмосферы остаточных газов. С целью преодоления этих недостатков в последние годы успешно реализуется идея выноса технологической бескорпусной установки молекулярно-лучевой эпитаксии в открытый космос в "кильватерную" область молекулярного экрана [1–3]. Анализ тенденций развития технологии интегральных схем и соответствующего оборудования, в том числе высоковакуумных установок кластерного типа, приводит к выводу о том, что будущее полностью интегрированных производственных линий

связано с их выносом в открытый космос [4]. Для получения эпитаксиальных структур с предельно высоким качеством как в наземных, так и в космических условиях требуется знание закономерностей, определяющих тип и уровень неконтролируемого фонового легирования. В настоящей работе впервые выполнено исследование процесса фонового легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии кремния, сопровождающегося изменениями типа и концентрации носителей заряда в пленках (электронов  $N_n$  и дырок  $N_p$ ). Исследования проводились на всех этапах эксплуатации установки типа "Катунь-С": от первого запуска до получения пленок с рекордно низким уровнем фоновой примеси с  $N_p < 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Прямое измерение молекулярных потоков фоновых примесей практически исключено из-за их малой интенсивности, и информация об источниках и процессах транспорта этих примесей извлекалась нами из систематических измерений  $N_n$  и  $N_p$ . В ростовой камере установки были размещены два электронно-лучевых испарителя для кремния и германия, а также два молекулярных источника примеси с резистивным нагревом. После сборки всех устройств камера роста обезгаживалась при температуре 300°C и откачивалась до давления  $10^{-8}$  Pa магниторазрядным и сублимационным насосами. Перед эпитаксией поверхность подложек кремния диаметром 60 mm КЭФ-5 (100) и КДБ-30 (111) очищалась путем нагрева до 800°C в слабом потоке кремния [5]. Рост пленок проводился в диапазоне температур подложек 500–900°C. Толщина пленок составляла 3–5  $\mu\text{m}$ . Концентрация электрически активной примеси оценивалась путем измерения  $N_n$  и  $N_p$  с помощью C–V-профилометра. На рис. 1 приведены результаты этих измерений. Стрелками отмечены моменты вскрытия камеры роста на атмосферу и повторения цикла прогрева. В моменты "1" и "2" в камере роста проводилась замена небольших узлов, в момент "3" были установлены молекулярные источники, содержащие Sb и  $\text{V}_2\text{O}_3$ . В момент "4" источник  $\text{V}_2\text{O}_3$  был снят. Источники не включались в ходе всего исследования. Максимальная концентрация фоновой примеси (около  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) наблюдалась в пленках, выращенных сразу после сборки и первого обезгаживания камеры. В процессе работы  $N_n$  в пленках уменьшалась со скоростью около одного порядка величины на 10–15 пластин, что соответствует суммарной толщине выращенного слоя кремния около 50  $\mu\text{m}$ . На первом этапе работы установки (1–35 пластин) каждый раз после ее вскрытия и введения новых узлов или деталей происходил резкий подъем  $N_n$ , однако максимальное значе-



**Рис. 1.** Концентрация электрически активной донорной ( $N_n$ ) и акцепторной ( $N_p$ ) примесей в пленках кремния, выращенных при температуре  $800^\circ\text{C}$ . Оценки проведены на основе  $C$ - $V$ -измерений. На оси абсцисс указаны порядковые номера подложек кремния в соответствии с последовательностью проведенных экспериментов.

ние и скорость спада  $N_n$  постепенно уменьшались и преобладающей в пленках становилась примесь  $p$ -типа. При этом вскрытие камеры роста и последующие отжиги уже не приводили к появлению в пленках примеси  $n$ -типа (моменты "3" и "4"). В отличие от примеси  $n$ -типа, концентрация примеси  $p$ -типа изменялась слабо и приближалась к  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . После монтажа молекулярного источника, содержащего  $\text{V}_2\text{O}_3$  (момент "3" на рис. 1),  $N_p$  в пленках увеличилась на два порядка и очень медленно

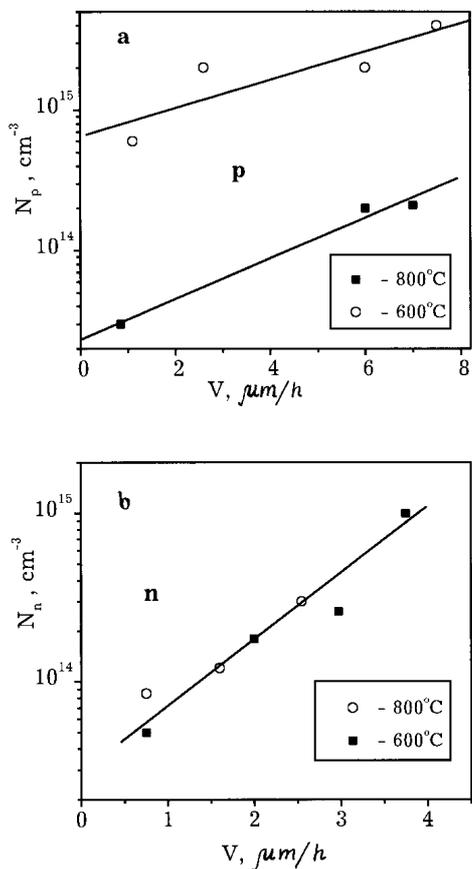


Рис. 2. Зависимость  $N_n$  и  $N_p$  от температуры подложки (a) и скорости роста (b).

уменьшалась в процессе работы. Удаление источника с  $\text{V}_2\text{O}_3$  из камеры привело к быстрому снижению  $N_p$  до постоянного значения  $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Анализ результатов эпитаксии при различных температурах и скоростях роста (рис. 2) показывает, что  $N_n$  практически не зависит от температуры эпитаксии и пропорциональна скорости роста (рис. 2, a).  $N_p$ , напротив, сильно зависит от температуры роста и энергия активации встраивания

акцепторной примеси составляет 1.1 eV (рис. 2, *b*). Из гистограмм, связывающих параметры пленок и подложек, следует, что тип и уровень легирования пленок не зависят от типа и концентрации примеси в подложке, т.е. процесс автолегирования в данном случае не является определяющим. Наличие холодного источника Sb в камере не оказывало заметного влияния на измеряемую концентрацию носителей заряда в пленках. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Наблюдаются два основных режима фонового легирования: переходной режим после сборки и запуска установки, в течение которого эпитаксиальные пленки легируются фоновой примесью *n*-типа, уровень которой монотонно снижается; и стационарный режим, при котором основной становится фоновая примесь *p*-типа, уровень которой далее существенно не меняется.

2. Фоновое легирование в переходном режиме обусловлено поступлением примеси с поверхности стенок камеры и встроенных узлов. При этом наиболее вероятными примесями являются фосфор или марганец, входящие в состав нержавеющей стали. Сравнение с результатами работ [6,7] позволяет оценить величину потока фоновой примеси в пленку равной  $10^{11} - 10^{12}$  atoms/cm<sup>2</sup> · s сразу после сборки и запуска установки. В установившемся режиме поток снижается на 3 порядка величины.

3. Наиболее вероятной причиной легирования пленок в стационарном режиме примесью акцепторного типа является присутствие содержащих бор компонент на поверхности подложки перед эпитаксией и генерация бора из нагретых керамических деталей с переносом его через стенки камеры.

4. Транспорт примеси от источника В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> в растущую пленку при закрытой заслонке происходит путем многократных актов испарения–конденсации легко летучих компонент примеси через поверхность стенок камеры.

Результаты настоящей работы позволяют предположить, что при росте пленок в космических условиях в бескорпусной установке молекулярно-лучевой эпитаксии существенно уменьшится фоновое легирование в связи с отсутствием стенок камеры и с увеличением производительности откачки. Для сокращения времени перехода к стационарному режиму может быть эффективной подготовка технологической аппаратуры в наземных условиях путем напыления пленки кремния или другого эффективного сорбента на ее внутренние поверхности.

Работа выполнена при поддержке Государственных научно-технических программ "Фундаментальные космические исследования" (проект "Эпитаксия"), "Физика твердотельных наноструктур" (проект 2-011) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-18409).

## Список литературы

- [1] *Hieser J.E., Brock F.J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1976. V. 13. N 3. P. 702–710.
- [2] *Ignatiev A.* // Earth Space Review. 1995. V. 2. N 2. P. 10–17.
- [3] *Pchelyakov O.P., Sokolov L.V., Nikiforov A.I., Berzhaty V.I., Zvorikin L.L., Ivanov A.I., Nikitsky V.P., Antropov V.Yu., Biriukov V.M., Markov E.V., Djakov Yu.N.* // Joint X European and VI Russian Symp. on Physical Sciences in Microgravity. St. Petersburg. June, 1997. P. 119.
- [4] *Валиев К., Орликовский А.* // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 1996. № 5-6. С. 3–10.
- [5] *Ishizaka A., Nakagawa K., Shiraki Y.* // Jap. Journ. Appl. Phys. Tokyo, 1982. P. 183–186.
- [6] *Андреев А.Ю., Гудкова Н.В., Кузнецов В.П., Красильников В.С., Рубцова Р.А., Толмачев В.А.* // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1988. Т. 24. N 9. С. 1423–1426.
- [7] *Rzanov A.V., Stenin S.I., Pchelyakov O.P., Kanter B.Z.* // Thin Solid Films. 1986. V. 139. N 2. P. 169–175.