

Исследование толстых эпитаксиальных слоев 3C-SiC, полученных методом сублимации на подложках 6H-SiC

© А.А. Лебедев[†], В.В. Зеленин, П.Л. Абрамов, Е.В. Богданова, С.П. Лебедев, Д.К. Нельсон, Б.С. Разбирин, М.П. Щеглов, А.С. Трегубова, М. Suvajarvi*, R. Yakimova*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

* Department of Physics, Chemistry and Biology, Linkoping University, SE-58183 Linkoping, Sweeden

(Получена 15 августа 2006 г. Принята к печати 22 августа 2006 г.)

Эпитаксиальные слои 3C-SiC толщиной до 100 мкм были получены методом сублимационной эпитаксии на гексагональных подложках 6H-SiC. Площадь выращенных слоев составляла 0.3–0.5 см². Максимальные скорости роста достигали 200 мкм/ч. Были получены эпитаксиальные слои *n*-типа проводимости с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a \sim (10^{17} - 10^{18}) \text{ см}^{-3}$. Рентгеновские исследования показали, что эпитаксиальный слой состоит из политипа 3C-SiC, без включений других политипов. В спектре фотолюминесценции преобладала донорно-акцепторная рекомбинация (A1-N) с энергией максимума полосы $h\nu \approx 2.12 \text{ эВ}$. Представлен подробный анализ спектра фотолюминесценции, полученного при 6 К. Сделан вывод, что данные эпитаксиальные слои могут быть использованы как подложки для создания приборов на основе 3C-SiC.

PACS: 61.50.Nw, 73.61.Le, 78.55.Nx, 81.05.Hd, 81.15.Ef

1. Введение

Известно, что карбид кремния (SiC) является перспективным материалом для создания высокотемпературных, силовых и мощных высокочастотных приборов. Среди множества политипов SiC политип 3C-SiC отличается наибольшей подвижностью электронов, которая является одной из важных характеристик материала для производства приборов. Кроме того, 3C-SiC имеет кубическую решетку и в силу симметрии его физические свойства изотропны в отличие от других политипов SiC. В данном политипе существенно ниже вероятность образования дефектов упаковки (stacking faults), которые ведут к деградации характеристик приборов [1]. Промышленное производство подложек политипа 3C-SiC до сих пор отсутствует, поэтому чаще всего слои 3C-SiC выращивают на кремниевых подложках. Тем не менее из-за большого рассогласования постоянных решетки между Si и SiC ($\sim 20\%$) выращенные слои имеют низкое структурное качество. В связи с этим представляет интерес исследование роста 3C-SiC на доступных подложках других политипов (4H-SiC, 6H-SiC), постоянные решетки которых отличаются в 3-м знаке. Основная трудность заключается в возникновении множества областей двойникования на начальном этапе эпитаксиального роста. Ранее была показана возможность формирования эпитаксиальных слоев 3C-SiC *n*- и *p*-типа проводимости толщиной 3–5 мкм на подложках SiC гексагональных политипов (6H-SiC) методом сублимации в вакууме [2,3]. Цель настоящей работы — оптимизация технологических параметров процесса эпитаксии с целью получения толстых ($\geq 50 \text{ мкм}$) слоев 3C-SiC, которые могли бы быть использованы как в качестве базовых областей

силовых приборов, так и в качестве „квазиподложек“ для дальнейшего формирования различных приборов на основе 3C-SiC.

2. Экспериментальные условия роста

Рост эпитаксиальных слоев 3C-SiC осуществляли методом сублимации в вакууме [4]. Для роста использовались подложки 6H-SiC, выращенные методом Лэли, либо коммерческие подложки производства фирмы CREE (США) с ориентацией (0001). Для определения C- или Si-границ подложки SiC проводится операция окисления. Окисление проводили в отдельном реакторе в атмосфере влажного кислорода в течение 3 ч при температуре 1100°C. Толщина окисла больше на C-границе SiC. Перед эпитаксией окисел стравливали во фтористоводородной кислоте, и далее проводилась стандартная операция отмывки в деионизованной воде и органических растворителях. В качестве источника для роста использовался коммерческий SiC с размером зерен $\sim 500 \text{ мкм}$. В ряде экспериментов в состав источника добавляли кремний (2% от общей массы источника) с аналогичным размером зерна. Все эксперименты по росту проводились на подложках 6H-SiC, (0001)C-грань. Для роста были использованы графитовый и танталовый тигли. Было обнаружено, что скорость роста в графитовом тигле приблизительно на порядок выше и достигает 100–200 мкм/ч при температурах $\sim (1700 - 1800)^\circ\text{C}$.

3. Структурные исследования

Кристаллическая структура образцов исследовалась рентгеновской топографией с использованием метода обратного отражения рентгеновских лучей. Топограммы

[†] E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

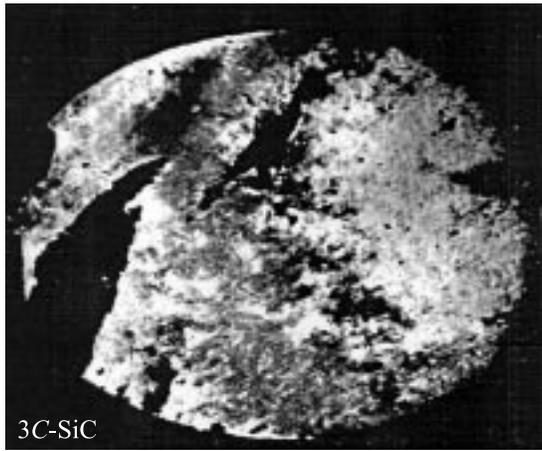


Рис. 1. Рентгеновская топограмма образца 3C-SiC/6H-SiC. Отражение (113), CuK_α -излучение.

снимались в отражениях (113) в CuK_α -излучении. Толщина слоя, в котором формируется дифракционное изображение дефектов при этих условиях съемки, составляет ~ 25 мкм. Анализ топограмм показал, что эпитаксиальный слой отвечает структуре 3C-SiC и в основном для этих толщин состоит из нескольких двойниковых областей разного размера, которые ориентированы с разворотом на 60° относительно друг друга и выявляются на топограммах в черном или светлом контрасте. На рис. 1 представлена топограмма слоя 3C-SiC, состоящего из трех двойниковых областей, одна из которых занимает большую часть ($\geq 80\%$) выращенного эпитаксиального слоя. На топограмме эта область находится в отражающем положении (изображена в светлом контрасте) и в ней выявляется более тонкая дефектная структура, характеризующаяся в основном присутствием дислокаций с плотностью $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$. В отдельных участках области наблюдаются дислокационные границы, однако в целом для исследованных образцов характерно равномерное распределение дефектов по площади.

4. Электрические измерения и фотолюминесценция

Концентрация и распределение электрически активных примесей в выращенных слоях определялись их вольт-фарадных ($C-V$) характеристик. Измерения проводились с помощью ртутного зонда при частоте синусоидального сигнала 1–10 кГц. Определенная из наклона $C-V$ -характеристик величина концентрации нескомпенсированных доноров составила $N_d - N_a \sim (10^{17} - 10^{18}) \text{ см}^{-3}$. $C-V$ -характеристики были линейными в координатах $C^{-2}-V$, что означало равномерное распределение примеси по глубине слоя x (рис. 2).

Было проведено исследование низкотемпературных спектров фотолюминесценции эпитаксиальных слоев

3C-SiC, выращенных на подложках 6H-SiC (рис. 3). Исследования проводились при температуре $T = 6 \text{ К}$ в двух режимах возбуждения — слабое возбуждение непрерывным аргоновым лазером (длина волны излучения 476.5 нм) и сильное возбуждение излучением импульсного азотного лазера ЛГИ-505 (длина волны излучения 337.1 нм, длительность импульса 10 нс, частота повторения 1 кГц, мощность в импульсе 5 кВт.) В последнем случае плотность возбуждения составляла до 1 МВт/см^2 . Перед проведением исследований была измерена спектральная кривая чувствительности установки, и спектры скорректированы в соответствии с этой кривой.

В спектре люминесценции исследованных гетероструктур наблюдается ряд пиков, наиболее коротковолновый из которых (B_0) при слабом возбуждении имеет энергию $h\nu = 2.125 \text{ эВ}$ и может быть интерпретирован как излучательная рекомбинация донорно-акцепторных пар азот-алюминий в 3C-SiC [5]. Более длинноволновые пики ($B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}$) представляют собой его фонные повторения. Энергии пиков,

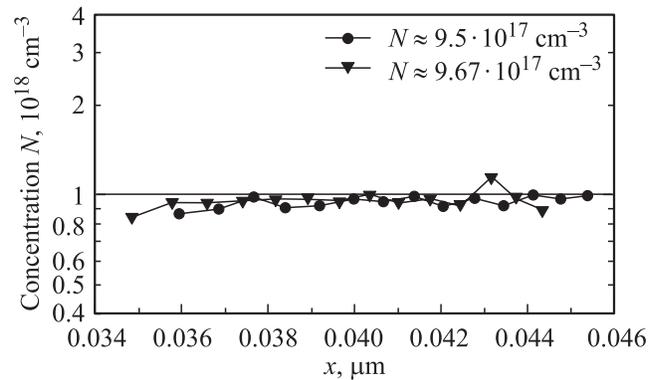


Рис. 2. Типичное распределение примеси в эпитаксиальном слое 3C-SiC.

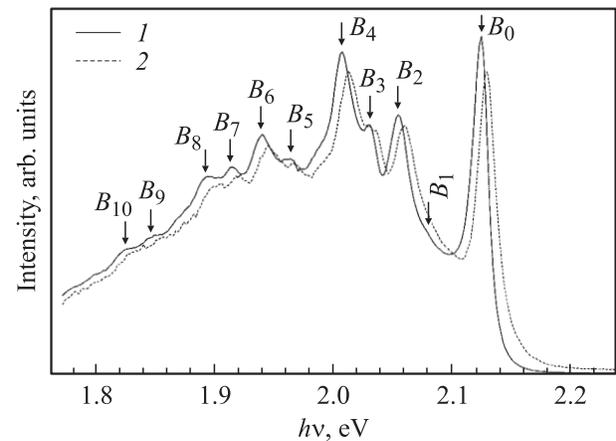


Рис. 3. Низкотемпературные спектры люминесценции гетероструктуры 3C-SiC/6H-SiC при слабом (1) и сильном (1 МВт/см^2) возбуждении (2). $T = 6 \text{ К}$. Стрелками отмечены положения максимумов при слабом возбуждении.

Пики люминесценции гетероструктуры 3C-SiC/6H-SiC

Пик	Энергия, эВ	Смещение, мэВ *	Фононы
B_0	2.125	0	—
B_1	2.080	45	TA
B_2	2.055	70	LA
B_3	2.030	95	TO
B_4	2.008	117	LO
B_5	1.963	162	LO + TA
B_6	1.939	186	LO + LA
B_7	1.913	212	LO + TO
B_8	1.892	233	2LO
B_9	1.845	280	2LO + TA
B_{10}	1.823	302	2LO + LA

Примечание. * Приводится смещение пиков относительно B_0 .

величины их смещения относительно пика B_0 и тип фононов [6] приведены в таблице.

Спектр люминесценции при высоком уровне возбуждения полностью идентичен спектру слабого возбуждения, с той лишь разницей, что положения всех пиков смещены в коротковолновую сторону на величину $\Delta E \approx 5$ мэВ. Смещение может быть обусловлено тем, что при повышении плотности возбуждения происходит насыщение донорных уровней и более эффективной становится излучательная рекомбинация дырки на акцепторе и свободного электрона в зоне проводимости. (Энергия ионизации уровней азота в 3C-SiC составляет ~ 0.06 эВ [7]).

Подобный эффект имеет место и при повышении температуры в условиях слабого возбуждения. В наших экспериментах при повышении температуры до 60 К наблюдалось коротковолновое смещение спектра на 3 мэВ. При этом происходит уширение пиков, так что наиболее слабые из них становятся неразличимыми в спектре. Температурная зависимость спектра люминесценции подтверждает указанную выше интерпретацию наблюдаемых спектров как излучательную рекомбинацию донорно-акцепторных пар.

5. Заключение

Показана возможность формирования толстых эпитаксиальных пленок политипа 3C-SiC на гексагональных подложках 6H-SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме. Выращенные слои имели толщину 10–200 мкм. Максимальная скорость роста достигала ~ 200 мкм/ч. Согласно рентгеновским данным, слои состояли из нескольких крупных двойников. Лучшие слои состояли из одного политипа 3C-SiC ($\sim 90\%$ площади) с редкими включениями по периметру мелких областей. Проведенные исследования показали равномерное легирование слоя и наличие хорошо различимого спектра донорно-акцепторной рекомбинации. Большая толщина полученных слоев, низкая плотность двойников и однородность электрических параметров показывают, что

данные слои могут быть использованы как подложки для формирования приборных структур на основе 3C-SiC.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 04-02-16632а и гранта KWA Шведской академии наук.

Список литературы

- [1] A.A. Lebedev. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, R17 (2006).
- [2] D.V. Davydov, A.A. Lebedev, A.S. Tregubova, V.V. Kozlovskii, A.N. Kuznetsov, E.V. Bogdanova. *Mater. Sci. Forum*, **338–342**, 221 (2000).
- [3] A.A. Лебедев, А.М. Стрельчук, Н.С. Савкина, А.С. Трегулова, А.Н. Кузнецов, В.А. Соловьев, Н.К. Полегаев. *ФТП*, **37**, 499 (2003).
- [4] N.S. Savkina, A.A. Lebedev, D.V. Davydov, A.M. Strel'chuk, A.S. Tregubova, C. Raynaud, J.-P. Chante, M.-L. Locatelli, D. Planson, J. Milan, P. Godignon, F.J. Campos, N. Mestres, J. Pascual, G. Brezeanu, M. Badila. *Mater. Sci. Eng.*, **B77**, 50 (2000).
- [5] A. Suzuki, H. Matsunami, T. Tanaka. *J. Electrochem. Soc.: Sol. St. Sci. Technol.*, **124** (2), 241 (1977).
- [6] *Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev and M.S. Shur (John Wiley & Sons, Inc., 2001).
- [7] Kuwabara, H., K. Yamanaka, S. Yamada. *Phys. Status Solidi A*, **37**, K157 (1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Growth and investigation of thick 3C-SiC grown on 6H-SiC substrate by sublimation epitaxy in vacuum

A.A. Lebedev, V.V. Zelenin, P.L. Abramov, E.V. Bogdanova, S.P. Lebedev, D.K. Nel'son, B.S. Razbirin, M.P. Scheglov, A.S. Tregubova, M. Syväjärvi*, R. Yakimova*

loffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

* Department of Physics,
Chemistry and Biology, Linkoping University,
SE-58183 Linkoping, Sweden

Abstract 3C-SiC epitaxial layers with thickness $\sim 100 \mu\text{m}$ were grown by sublimation epitaxy on hexagonal substrates (6H-SiC). The area of the grown epilayers is about $0.3\text{--}0.5 \text{ cm}^2$. The maximum grown rate was about $200 \mu\text{m}$ per hour. Were obtained epilayers with n -type conductivity and $N_d - N_a \sim 10^{17}\text{--}10^{18} \text{ cm}^{-3}$. X-ray analysis shows that the epilayers consist only of 3C-SiC, without inclusions of other polytypes. In the photoluminescence spectrum the acceptor recombination band (Al-N) at $\sim 2.12 \text{ eV}$ is dominating. Detailed study of photoluminescence spectrum obtained at 6 K are presented. It was concluded that such epilayers can be used as substrates for growth and development of 3C-SiC based electronic devices.