

УДК: 621.382.2

Влияние микроволновой обработки на уровень остаточной деформации и параметры глубоких уровней в монокристаллах карбида кремния

© 2005 Р.В.Конакова, П.М.Литвин, О.Я.Олих*

Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, Украина
E-mail: konakova@isp.kiev.ua

* Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина
E-mail: olikh@mail.univ.kiev.ua

Поступила в редакцию 7 апреля 2004 г., окончательный вариант — 8 июня 2004 г.

Исследовано влияние микроволнового излучения частотой 2,45 ГГц с удельной мощностью 1,5 Вт/см² на радиус кривизны, деформацию и параметры глубоких центров в приповерхностных слоях монокристаллических пластин *n*-SiC·6H. Предполагается, что наблюдаемые изменения параметров глубоких центров связаны с индуцированным СВЧ излучением перераспределением ансамбля структурно-примесных дефектов в поверхностном слое карбида кремния.

Effects of microwave treatment (2.45 GHz, 1.5 W/cm²) on a radius of curvature, strain, and parameters of deep traps in near the surface layer of *n*-SiC·6H single crystal wafers have been investigated. It is proposed that changes in deep trap parameters are connected with microwave radiation induced redistribution of a structure-impurity ensemble in near the surface layer of silicon carbide.

Введение

Влияние микроволнового облучения на электрические характеристики полупроводниковых материалов и приборных структур исследовалась в [1-16]. Было показано, что кратковременное воздействие сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения сантиметрового диапазона при оптимальных режимах обработки приводит к структурно-примесному упорядочению в поверхностном слое полупроводника, вызывающему увеличение диффузионной длины неосновных носителей заряда и, соответственно, улучшение параметров диодных структур с барьером Шоттки. При этом также наблюдалась стимулированная микроволновой обработкой релаксация внутренних механических напряжений [7-13,15,16] и перестройка спектров фотолюминесценции в монокристаллах *n*-GaAs, InP и GaP

[13,16]. Однако более детальная информация об изменении параметров глубоких центров в полупроводниковых материалах под влиянием СВЧ излучения практически неизвестна. Нет подобной информации и для такого перспективного для СВЧ электроники материала, как карбид кремния.

В данной работе методом акустоэлектрической релаксационной спектроскопии исследовано влияние микроволновой обработки на параметры глубоких центров в монокристаллах *n*-SiC·6H.

Методика эксперимента

Исследовались различные по исходному уровню остаточной механической деформации образцы *n*-SiC, изготовленные методом Лелли и легированные азотом до концентрации $\sim 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Образцы относились к политу типу 6H и представляли собой

пластины толщиной 460-490 мкм размером 5×10 мм.

Микроволновая обработка проводилась в магнетроне в условиях свободного пространства при частоте СВЧ излучения 2,45 ГГц и удельной мощности 1,5 Вт/см². Длительность обработки составляла 20 с. До и после СВЧ обработки определялись радиус кривизны R образцов и деформация ϵ приповерхностных кристаллографических плоскостей. Величина ϵ оценивалась рентгенографическим методом по изменению углового положения дифракционного максимума при трансляции образца [17], а кривизна поверхности R измерялась на профилометре DekTak 3030 Veeco Instruments [18]. Параметры глубоких ловушек (центров захвата), такие как поперечное сечение захвата электронов σ_n , положение энергетического уровня относительно дна зоны проводимости ($E_c - E_t$) и характерное время релаксации заряда τ определялись методом акустоэлектрической релаксационной спектроскопии [20,21]. Сущность метода заключается в импульсном возбуждении в размещенном на пьезоэлектрической пластине образце акустических волн. При распространении в пьезоэлектрике ультразвука вследствие акустоэлектрического взаимодействия в полупроводнике возникает постоянное напряжение, связанное с перераспределением носителей, захваченных ловушками в приповерхностном слое. После окончания акустического импульса происходит релаксация напряжения по закону

$$V(t) = V_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (1)$$

Экспоненциальная зависимость (1) справедлива в случае, когда в акустоэлектрическом взаимодействии эффективно принимают участие глубокие центры лишь одного типа. Для полупроводника n -типа характерное время релаксации заряда равно [20,21]

$$\tau = \frac{\exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right)}{\sigma_n v_T N_c}, \quad (2)$$

где v_T — тепловая скорость электронов; N_c — эффективная плотность состояний около дна зоны проводимости.

Измерения релаксационного участка поперечного напряжения проводились в интервале температур 290-340 К. Обработка экспериментальных данных, полученных при разных температурах, по ф-ле (1) позволяет определить температурную зависимость τ , а по наклону этой зависимости в координатах $(\ln\tau - 1/T)$ — величину $(E_c - E_t)$. Подставляя эти значения в (2), можно рассчитать поперечное сечение захвата электронов ловушками σ_n .

Точность определения положения энергетического уровня составляла 0,02 эВ, а σ_n и τ — около 80 и 5% соответственно. Значения R и ϵ измерялись с относительной погрешностью $\leq 2\%$.

Результаты и обсуждение

Типичные результаты измерений исходных и облученных образцов приведены в Таблице. Как видно, наиболее сильное влияние микроволновая обработка оказывает на величины R , ϵ и σ_n , изменение которых превышают экспериментальный разброс. Оказалось, также, что образцы 6Н-SiC, близкие по уровню легирования, но отличающиеся по величине остаточных механических напряжений в исходном состоянии, по разному реагируют на СВЧ излучение. Так, в практически ненапряженных плоских образцах SC1 и SC3 микроволновая обработка вызывала изменение в распределении структурных дефектов, что приводило к увеличению макродеформации, тогда как в ненапряженном, но выпуклом образце SC2, обработка в течение 20 с инициировала переход в более равновесное состояние. Данные профилометрии коррелируют с результатами рентгеновских измерений.

Полученные результаты можно объяснить, если предположить, что микроволновая обработка приводит к перестройке ансамбля структурно-примесных дефектов, вызывающей перераспределение величины упругой деформации в объеме

Таблица

Параметры исходных и облученных образцов n -SiC-6H

Образец	Состояние образца	$(E_c - E_t)$, эВ	τ^* , мс	σ_n^* , см ²	R , м	ϵ
SC3	исходный	0,33	0,27	$7 \cdot 10^{-18}$	∞	0
	облученный	0,33	0,38	$5 \cdot 10^{-19}$	170,2	$8,7 \cdot 10^{-7}$
SC1	исходный	0,33	0,26	$7 \cdot 10^{-18}$	>2000	$< 1,2 \cdot 10^{-7}$
	облученный	0,33	0,38	$5 \cdot 10^{-19}$	171,9	$1,4 \cdot 10^{-6}$
SC2	исходный	0,34	0,84	$3 \cdot 10^{-18}$	3,8	$6,1 \cdot 10^{-5}$
	облученный	0,29	0,90	$5 \cdot 10^{-19}$	5,5	$4,2 \cdot 10^{-5}$

* при температуре 300 К.

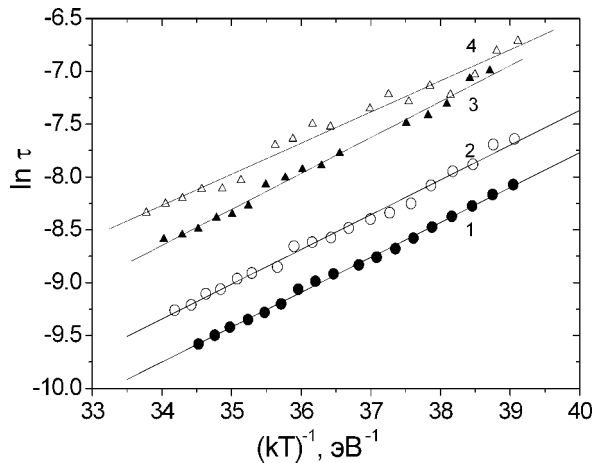


Рис.1. Температурная зависимость времени релаксации заряда на глубоких уровнях. Точки — экспериментальные результаты, линии — линейная аппроксимация, по наклону которой определялись значения $E_c - E_i$. 1, 3 — исходные образцы карбида кремния SC1 и SC2 соответственно; 2, 4 — облученные образцы SC1 и SC2 соответственно.

образца. В результате такой перестройки возможно не только уменьшение величины ϵ , как это наблюдалось в [8-13], но и ее увеличение и более однородное распределение (рис.1, Таблица). Из приведенных на рис.1 данных видно, что для образца SC1 наклон температурной зависимости времени релаксации заряда τ в полулогарифмических координатах при индуцированном СВЧ обработкой уменьшении радиуса кривизны R практически не меняется, что свидетельствует об отсутствии в этом образце существенных структурных изменений. В то же время, в образце SC2, в котором величина R была намного ниже и в процессе микроволновой обработки изменялась в $\sim 1,5$ раза, отмечены существенные изменения параметров глубоких уровней.

В литературе практически отсутствуют данные о природе центров $E_c - 0,33$ эВ и $E_c - 0,29$ эВ в n -SiC. В то же время, в работах [22-28] отмечалось, что уровни с такими энергиями активации и малыми сечениями захвата (10^{-17} - 10^{-19} см²) могут быть связаны с изоэнергетическими центрами, представляющих собой точечные молекулярные дефекты, содержащие атомы примеси.

Выводы

Наблюдаемые при микроволновой обработке монокристаллов n -SiC 6Н изменения энергии активации и сечения захвата уровней связаны с индуцированным облучением перераспределением механических напряжений, появление которых

подтверждается изменением радиуса кривизны образцов после микроволновой обработки.

Влияние индуцированных излучением остаточных напряжений необходимо учитывать при изучении механизмов деградации микроволновых приборов на основе карбида кремния.

Литература

1. Ржанов А.В., Герасименко Н.Н., Васильев С.В., Ободников В.И. СВЧ нагрев как метод термообработки полупроводников. Письма в ЖТФ 1981, т.7, №20, с.1221-1223.
2. Paton B.E., Sklyarevich V.E., Slusarchuk V.G. Gyrotron processing of materials. MRS Bulletin, 1993, v.18, No.11, p.58-63.
3. Винник Е.В., Гуров В.И., Прохорович А.В., Шевелев М.В. Использование мощного СВЧ излучения для отжига арсенида галлия. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 1989, №15, с.48-50.
4. Covač M., Gay H.C. Recuit thermique rapide de semiconducteur par energie. J.Phys.France, 1993, v.3, No.5, p.973-983.
5. Zohm H., Kasper E., Mehringer P., Muller G.A. Thermal processing of silicon wafers with microwave co-heating. Microelectron.Eng., 2000, v.54, No.3, p.247-253.
6. Bhunia S., Bose D.N. Microwave synthesis, single crystal growth and characterization of ZnTe. J.Crystal Growth, 1998, v.186, No.2, p.535-542.
7. Пашков В.И., Перевощиков В.А., Скупов В.Д. Влияние отжига в поле СВЧ излучения на остаточную деформацию и примесный состав приповерхностных слоев кремния. Письма в ЖТФ, 1994, т.20, №8, с.14-17.
8. Бачериков Ю.Ю., Конакова Р.В., Кочеров А.Н., Светличный А.М., Охрименко О.Б. Влияние сверхвысокочастотного отжига на структуры двуокиси кремния-карбид кремния. ЖТФ, 2003, т.73, №5, с.75-78.
9. Болтовец Н.С., Камалов А.Б., Колядина Е.Ю., Конакова Р.В., Литвин П.М., Литвин О.С., Матвеева Л.А., Миленин В.В., Ренгевич А.Е. Релаксация внутренних механических напряжений в арсенидгаллиевых структурах, стимулированная микроволновой обработкой. Письма в ЖТФ, 2002, т.28, №4, с.57-64.
10. Kryshab T.G., Lytvyn P.M., Mazin M.A., Prokopenko I.V. The structural relaxation in single crystals stimulated by microwave radiation. Metal Phys. Adv. Technol., 1977, v.19, No.5, p.21-26.
11. Крыштаб Т.Г., Семенова Г.Н., Литвин П.М., Конакова Р.В., Прокопенко И.В. Немонотонность процессов структурной релаксации при СВЧ обработке арсенида галлия. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 1996, №31, с.140-145.
12. Миленин В.В., Конакова Р.В., Статов В.А., Ляпин В.Г., Скляревич В.Е., Тхорик Ю.А., Шевелев М.Б. Физико-химические процессы на границе раздела контактов Au/Pt/Cr/GaAs подвергнутых СВЧ отжигу. Письма в ЖТФ, 1994, т.20, №4, с.32-35.

13. Belyaev A.E., Konakova R.V., Lytvyn P.V., Milenin V.V., Prokopenko I.V., Svechnikov G.S., Soloviev E.A., Fedorenko L.L. Effect of microwave and laser radiations on the parameters of semiconductor structures. Kiev: Intas, 2002, 191 p.
14. Ashkinadze B.M., Cohen E., Ron Arza, Linger E., Pfeiffer L.N. The effect of photogenerated free carriers and microwave electron heating on exciton dynamics in GaAs/AlGaAs quantum wells. Solid State Electron., 1996, v.40, No.3, p.561-565.
15. Ermolovich I.B., Venger E.F., Konakova R.V., Milenin V.V., Svechnikov S.V., Shevel'ov M.V. Photoluminescent investigations of SHF irradiation effect on defect states in GaAs:Sn(Te). Proc.SPIE, 1998, v.3359, p.265-272.
16. Венгер Е.Ф., Ермолович И.Б., Миленин В.В., Конакова Р.В., Чайка Г.Е. Влияние внешних радиационных СВЧ и механических возбуждений на образование дефектов в неметаллических кристаллах. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1999, вып.2, с.60-72.
17. Godwod K., Nagy A.T., Rek Z. The application of the X-ray triple crystal spectrometer for measuring the radius curvature of bend single crystals. Phys.Stat.Sol.(a), 1976, v.34, No.2, p.705-710.
18. Болтовец Н.С., Иванов В.Н., Конакова Р.В., Литвин П.М., Литвин О.С., Миленин В.В., Прокопенко И.В. Фазовые и структурные изменения в многослойных контактах к *n*-GaAs, стимулированные быстрыми термическими обработками. ФТП, 2003, т.37, №9, с.1138-1142.
19. Венгер Е.Ф., Грендел М., Данишка В., Конакова Р.В., Прокопенко И.В., Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборах. Киев: Феникс, 1994, 247 с.
20. Ostrovskii I.V., Olikh O.Ya. Characterization of interface deep levels in as vapor grown epi-GaAs. Solid State Commun., 1998, v.34, No.2, p.705-710.
21. Островский И.В., Сайко С.В. Спектроскопия поверхностных состояний в GaAs посредством акустоэлектрического эффекта. ФТТ, 1993, т.35, №4, с.1043-1050.
22. Ржанов А.В. Характер энергетического спектра поверхностных состояний и кинетика импульсного эффекта поля. ФТП, 1972, т.6, №8, с.1495-1501.
23. Берг А., Дин П. Светодиоды. М.: Мир, 1973, 525 с.
24. Шишияну Ф.С. Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах. Кишинев: Штиинца, 1978, 231 с.
25. Лебедев А.А. Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния. Обзор. ФТП, 1999, т.33, №2, с.129-155.
26. Аникин М.М., Андреев А.Н., Лебедев А.А., Пятко С.Н., Расстегаева М.Г., Савкина Н.С., Стрельчук А.М., Сыркин А.Л., Челноков В.Е. Высокотемпературный диод Шоттки Au-SiC₆H. ФТП, 1991, т.25, №2, с.328-333.
27. Аникин М.М., Зубрилов А.С., Лебедев А.А., Стрельчук А.П., Черенков А.Е. Рекомбинационные процессы в 6H-SiC *p-n*-структурах и влияние на них глубоких центров. ФТП, 1991, т.25, №3, с.479-486.
28. Лебедев А.А., Давыдов Д.В., Трегубова А.С., Богданова Е.В., Щеглов М.П., Павленко М.В. Влияние степени структурного совершенства на спектр глубоких центров в 6H-SiC. ФТП, 2001, т.35, №12, с.1434-1436.