

06:07:12

Исследование имплантированных слоев в карбиде кремния модуляционным фоторефлекционным методом

© Х.Г. Вальтер (H.G. Walther), Х. Карге (H. Karge),
К.Л. Муратиков, А.В. Суворов, И.О. Усов

Institute für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller Universität,
Jena, Germany

Jena Wave Engineering & Consulting, Jena, Germany

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Cree Research Inc. Durham, NC, 27713, USA

Поступило в Редакцию 4 марта 1997 г.

Рассмотрена возможность использования модуляционного фоторефлекционного метода для диагностики ионно-имплантированных слоев в карбиде кремния. Показано, что фоторефлекционный метод позволяет определять толщину слоя, а также характер изменения оптических параметров слоя в зависимости от дозы имплантированных ионов.

Исследованию возможностей использования фототермических методов для диагностики полупроводниковых материалов в последнее время уделяется серьезное внимание [1]. К настоящему времени при решении подобного рода задач наиболее широкое распространение получил фоторефлекционный (ФР) метод [1–4], способный обеспечивать высокую чувствительность и пространственное разрешение, а также проведение измерений неразрушающим способом. Фоторефлекционный метод прошел успешную апробацию на таких материалах, как Si [4–11] и GaAs [1,12–13].

Вместе с тем в последнее время все большее внимание уделяется применениям и развитию методов диагностики широкозонных полупроводников [14], в частности карбида кремния. При использовании фоторефлекционного метода для исследования таких полупроводников характерной особенностью является глубокое проникновение как излучения накачки, так и считывающего излучения в глубь материала. Последнее обстоятельство не является типичным для случая полупроводников типа

Si, GaAs и связано с существенным превышением ширины запрещенной зоны энергий фотонов возбуждающего и считывающего лазеров. В связи с этим интересно рассмотреть особенности использования фоторефлексионного метода для диагностики широкозонных полупроводников.

В данной работе исследована возможность использования фоторефлексионного метода для диагностики процессов ионной имплантации в карбид кремния. При этом использована модификация фоторефлексионного метода, подробно описанная в работе [15], с возбуждением и регистрацией фоторефлексионного сигнала на одной длине волны. В таком фоторефлексионном микроскопе источником излучения служит полупроводниковый лазер с мощностью примерно 10 мВт и длиной волны 785 нм. Излучение лазера фокусируется на поверхность объекта в пятно около 2 мкм. Частота временной модуляции излучения изменяется от 100 кГц до 12 МГц.

Эксперименты проводились на образцах 6H-SiC, выращенных методом Лэли. В образцы имплантировались ионы He^+ с энергией 37 кэВ. В работе исследовались образцы с тремя дозами имплантации: 10^{14} см^{-2} , 10^{15} см^{-2} , $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При этом на одном из образцов имелась граница неимплантированной области и имплантированной области с дозой $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Имплантация легких ионов He^+ при сравнительно невысоких энергиях приводила к слабым изменениям оптических свойств образцов и позволяла лучше оценивать предельные возможности метода.

Результаты исследования зависимости фоторефлексионного сигнала от частоты модуляции излучения для образцов карбида кремния, имплантированного ионами He^+ с различными дозами, представлены на рис. 1. Измерения производились на фиксированных частотах модуляции при постепенном ее повышении от 94 кГц до 12 МГц. Из приведенных данных видно, что на фоторефлексионный сигнал оказывает сильное влияние степень имплантации. При этом характерной особенностью использования фоторефлексионного метода в данных условиях является сильно немонотонная зависимость сигнала от дозы имплантации. В частности, для образца карбида кремния с дозой $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ происходит даже изменение фазы сигнала на 180° по отношению к образцам с дозами 10^{14} см^{-2} и 10^{15} см^{-2} . Подобное поведение фоторефлексионного сигнала для карбида кремния существенным образом отличается от кремния и GaAs, для которых характерно достаточно монотонное увеличение сигнала с дозой имплантации [1].

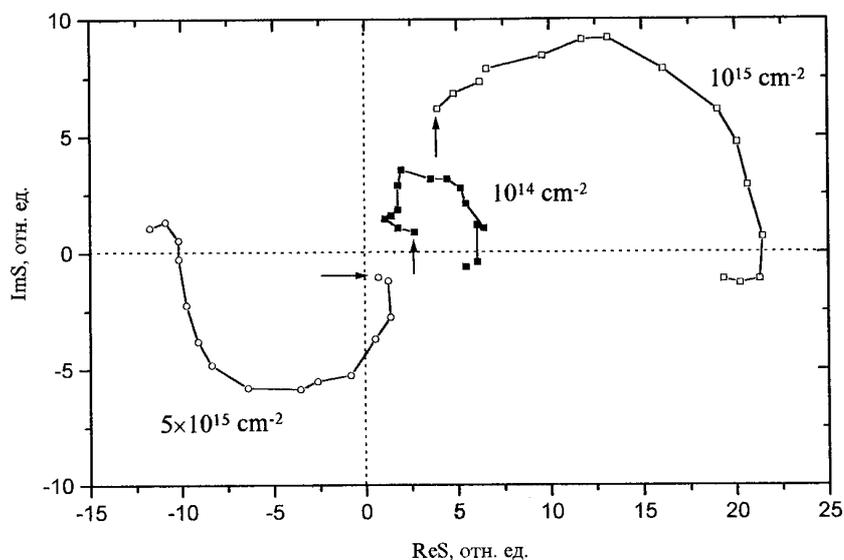


Рис. 1. Поведение действительной и мнимой компонент фоторефлекционного сигнала в зависимости от частоты модуляции для трех имплантированных ионами He^+ с энергией 37 кэВ образцов карбида кремния. Измерения производились на частотах 0.094, 0.125, 0.200, 0.300, 0.500, 0.750, 1.00, 1.60, 2.50, 3.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00, 12.00 МГц. Стрелками отмечены значения фоторефлекционного сигнала, соответствующие частоте 12 МГц.

Для более детального исследования особенностей образования фоторефлекционного сигнала в случае карбида кремния было исследовано его поведение при переходе от имплантированной к неимплантированной области. На рис. 2 представлены результаты измерения оптического коэффициента отражения, амплитуды и фазы фоторефлекционного сигнала при сканировании образца в направлении, перпендикулярном границе раздела этих областей. При таком сканировании глубина имплантированного слоя остается неизменной, так как энергия ионов фиксирована и равна 3 кэВ. Вместе с тем последовательно проходятся участки с различными дозами от $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до полностью неимплантированных. Немонотонный характер изменения оптического коэффициента отражения при сканировании свидетельствует о создании

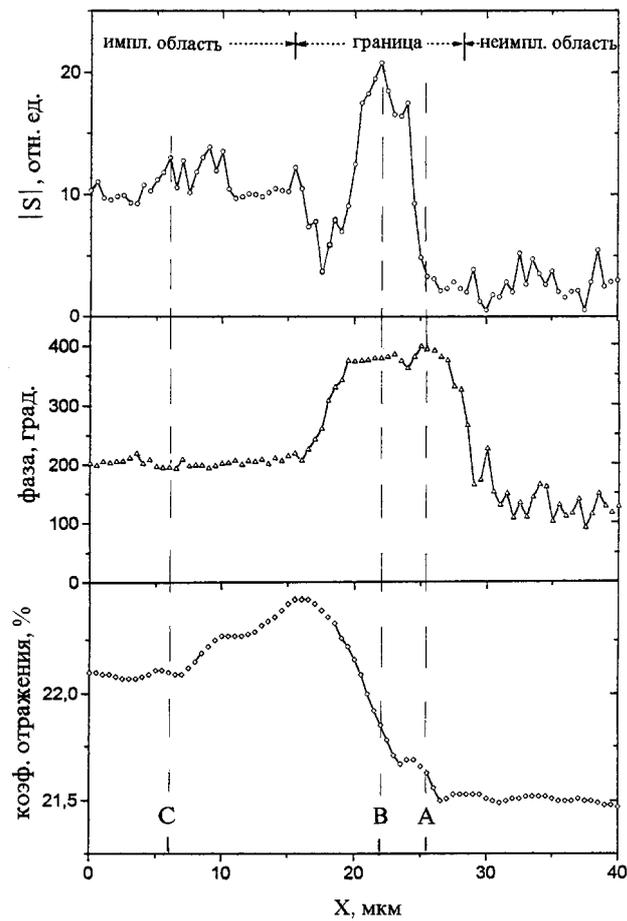


Рис. 2. Поведение фоторефлексионного сигнала и коэффициента отражения оптического излучения при сканировании границы между имплантированными и неимплантированными областями. Доза имплантации на имплантированном участке $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Шаг сканирования 0.5 мкм. Частота модуляции 1 МГц. Символами А, В, С отмечены участки, соответствующие дозам имплантации 10^{14} см^{-2} , 10^{15} см^{-2} , $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

на поверхности образца в результате имплантации тонкого оптического слоя. Положение максимума фоторефлекционного сигнала не совпадает с положением максимума оптического коэффициента отражения и оказывается расположенным при дозе, существенно меньшей $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Отметим также, что в соответствии с представленными на рис. 2 данными фазы фоторефлекционных сигналов на участках, соответствующих дозам ионов $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и 10^{14} см^{-2} , 10^{15} см^{-2} , отличаются на 180° . Вместе с тем в соответствии с рис. 2 при переходе границы между имплантированной и неимплантированной областями амплитуда зарегистрированного фоторефлекционного сигнала не падала до нуля, хотя и наблюдалась зона с ярко выраженным уменьшением амплитуды сигнала. Отсутствие при сканировании положения, при котором фоторефлекционный сигнал обращается в ноль, по-видимому, связано с тем, что размер пятна излучения лазера на поверхности образца не был достаточно малым, а составлял 2 мкм.

Перейдем теперь к краткому рассмотрению модели, способной объяснить основные экспериментальные результаты. В соответствии с работами [1–4] фоторефлекционный сигнал в общем случае может быть представлен в виде

$$S = A \left(\frac{\partial R}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial R}{\partial N} \Delta N \right), \quad (1)$$

где A — коэффициент пропорциональности; R — коэффициент отражения от объекта для интенсивности оптического излучения; ΔT — колебания температуры поверхности образца; ΔN — изменение концентрации свободных носителей, генерируемых излучением.

Поскольку энергия квантов света, соответствующая использованному в фоторефлекционных экспериментах излучению, меньше ширины запрещенной зоны карбида кремния, то непосредственной генерации свободных носителей светом не происходит. Поэтому фоторефлекционный сигнал в рассматриваемом случае связан только с возбуждением в объекте температурных волн и описывается первым слагаемым в выражении (1).

Для определения фоторефлекционного сигнала от имплантированного карбида кремния необходимо учитывать оптические и теплофизические свойства имплантированного слоя. В работе [16] было показано, что для описания особенностей образования фоторефлекционного сигнала в

широком диапазоне доз имплантации с учетом процессов аморфизации полупроводникового материала достаточно использовать оптическую модель с тремя слоями. При этом один из них используется для описания слоя аморфизированного материала. В нашем случае при имплантации легких ионов He^+ со сравнительно низкой энергией аморфизации материала не происходило. Поэтому в данной работе для моделирования оптических свойств имплантированного слоя использовалась модель с одним слоем.

В соответствии с результатами работы [17] изменение показателя преломления карбида кремния при полной аморфизации составляет примерно 30% от значения для неимплантированного материала. Поэтому при дозах существенно ниже порога аморфизации можно считать, что изменения действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости при имплантации малы по сравнению со значением диэлектрической проницаемости для неимплантированного SiC. Концентрация дефектов, создаваемых в полупроводнике при имплантации с дозами ниже порога аморфизации, приближенно аппроксимируется зависимостью пропорциональной дозе внедренных ионов [18]. В связи с этим в рассматриваемом случае можно считать, что изменения как действительной, так и мнимой компонент диэлектрической проницаемости также пропорциональны дозе имплантированных ионов. Тогда, используя связь показателя преломления с компонентами диэлектрической проницаемости, можно показать, что изменения показателя преломления и коэффициента поглощения должны быть также линейными функциями от дозы.

Для определения коэффициента отражения от SiC с имплантированным слоем можно воспользоваться известными методиками расчета отражения оптического излучения от тонких слоев [19]. При этом для рассматриваемого случая следует учесть малость изменения показателя преломления на границе имплантированного и неимплантированного SiC, практически отсутствие поглощения света на длине волны 785 нм в неимплантированном SiC [21], а также выполнение условия $\alpha d \ll 1$ (α — коэффициент поглощения излучения в имплантированном слое, d — толщина имплантированного слоя).

Для определения фоторефлекционного сигнала в соответствии с выражением (1) необходимо знать колебания температуры поверхности объекта. При их расчете следует учесть, что поглощение света и возбуждение температурных волн происходит главным образом в имплан-

тированном слое. При типичных значениях толщин имплантированных слоев и длин температурных волн в SiC вплоть до частот в 1 МГц, можно считать, что генерация температурных волн носит чисто поверхностный характер. Ограничиваясь в данной работе указанным диапазоном частот, приведем сразу окончательный результат для фоторефлекционного сигнала

$$S = adA' \left\{ n_0 - 1 + \frac{1 + 3n_0 - 2n_0^2}{n_0(n_0 + 1)} \Delta n + \left[\alpha d(n_0 - 1) + 2 \frac{n_0 - 2}{n_0 + 1} \Delta n \right] \right. \\ \left. \times \cos \frac{4\pi nd}{\lambda} + 2 \left[\frac{\alpha \lambda}{4\pi} \frac{1 + n_0 - n_0^2}{n_0(n_0 + 1)} + (n_0 - 1) \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n \right] \sin \frac{4\pi nd}{\lambda} \right\}, \quad (2)$$

где $A' = A \frac{32I_0}{qK} \frac{n_0}{(1+n_0)^5} \frac{\partial n_0}{\partial T}$, I_0 — интенсивность оптического излучения, $q = \sqrt{\frac{i\omega}{k}}$, $\omega = 2\pi f$, f — частота модуляции излучения, K и k соответственно коэффициенты тепло- и температуропроводности, n_0 — коэффициент преломления неимплантированного материала, Δn — изменение коэффициента преломления при имплантации, $\frac{\partial n_0}{\partial T}$ — изменение коэффициента преломления карбида кремния с температурой.

Выражение (2) позволяет определить фоторефлекционный сигнал при различных дозах имплантации при условии, что известны толщина имплантированного слоя и зависимости Δn и α от дозы. В соответствии с результатами работы [18] будем считать, что для рассматриваемого случая зависимости Δn и α от дозы имплантации D ионов He^+ описываются линейными функциями $\Delta n = \gamma_1 D$ и $\alpha = \gamma_2 D$ (γ_1 и γ_2 — некоторые коэффициенты пропорциональности). Значение коэффициента преломления n_0 для 6H-SiC при $\lambda = 785$ нм находится в интервале от 2.61 до 2.64 [21]. Экспериментальные данные по коэффициенту отражения оптического излучения и фоторефлекционному сигналу при различных дозах имплантации могут быть использованы для определения параметров имплантированного слоя. В данной работе подобная задача решалась методом одновременной минимизации среднеквадратичной ошибки для отклонений между теоретическими и экспериментальными данными, полученными для коэффициента отражения и фоторефлекционного сигнала. Результаты таких вычислений представлены на рис. 3. При использовании для коэффициента преломления карбида кремния значения $n_0 = 2.64$ для остальных параметров были получены следующие

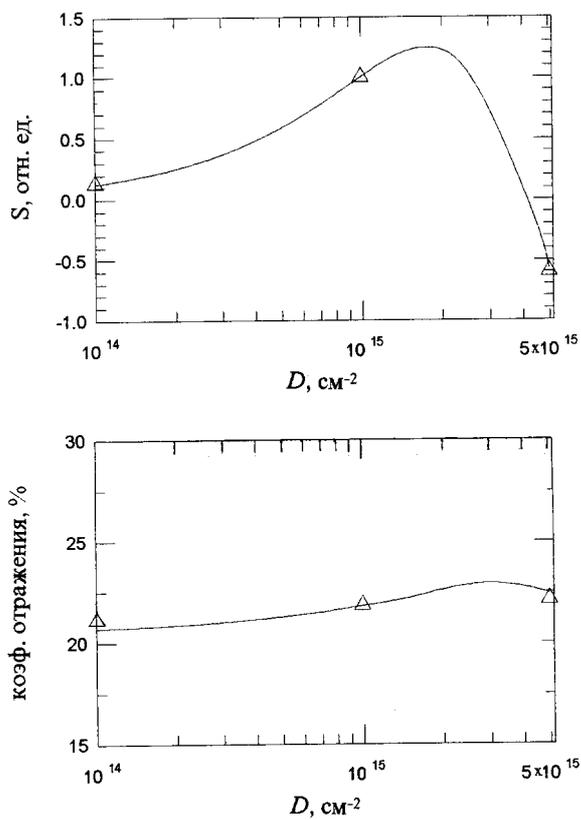


Рис. 3. Теоретические результаты вычисления коэффициента отражения и фоторефлекционного сигнала от дозы имплантации. Треугольники — экспериментальные данные.

величины: $\gamma_1 = 6.48 \times 10^{-17} \text{ см}^{-2}$, $\gamma_2 = 1.10 \times 10^{-12} \text{ см}$, $d = 243 \text{ нм}$. На основании полученных данных изменение коэффициента преломления при максимальной дозе имплантации $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ составляет 12% от значения для неимплантированного материала, а коэффициент поглощения оказывается равным $6.5 \times 10^3 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, полученные результаты косвенно подтверждают предположение об отсутствии пол-

ной аморфизации карбида кремния в рассматриваемых условиях. Далее в соответствии с разработанными процедурами определения параметров имплантированных слоев [22] глубина имплантированного слоя для ионов He^+ с энергией 37 кэВ составляет 220 нм. Поэтому полученное фоторефлекционным методом значение толщины имплантированного слоя находится в хорошем согласии с известным значением.

Таким образом, полученные результаты показывают, что фоторефлекционный метод при использовании излучения, попадающего в зону прозрачности полупроводника, позволяет определять не только толщину имплантированного слоя, но также и его оптические характеристики. При этом важным достоинством фоторефлекционного метода по сравнению с оптическим является существенно более сильная зависимость фоторефлекционного сигнала от дозы имплантации. Последнее обстоятельство может быть использовано для существенного улучшения точности определения оптических и геометрических параметров имплантированных слоев.

В заключение авторы благодарят А.Л. Глазова за помощь в проведении численных расчетов. Один из авторов (К.Л. Муратиков) благодарит DAAD за возможность проведения части исследований в Германии.

Список литературы

- [1] *Rosencwaig A.* // Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors / Ed. by A. Mandelis. New York, Elsevier Science Publishing Co, 1987. P. 97–135.
- [2] *Opsal J., Rosencwaig A., Willenborg D.L.* // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 11. P. 3169–3176.
- [3] *Rosencwaig A., Opsal J., Smith W.L., Willenborg D.L.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 11. P. 1013–1015.
- [4] *Opsal J., Rosencwaig A.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 5. P. 498–500.
- [5] *Hara T., Hagiwara H., Ichikawa R., Nakashima S., Mizoguchi K., Smith W.L., Welles C., Hahn S.K., Larson L.* // IEEE Electron Device Lett. 1990. V. 11. N 11. P. 485–486.
- [6] *Christofides C., Vitkin I.A., Mandelis A.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. N 6. P. 2815–2821.
- [7] *Vitkin I.A., Christofides C., Mandelis A.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. N 6. P. 2822–2830.
- [8] *Nesteros M., Forget B.C.* // Phys. Rev. B. 1995-II. V. 51. N 20. P. 14115–14123.

- [9] *Seas A., Christofides C.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. N 24. P. 3346–3348.
- [10] *Forget B.C., Barbereau I., Fournier D., Tuli S., Battacharyya A.B.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. N 8. P. 1107–1109.
- [11] *Benedetto G., Boarino L., Spagnolo R.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1994. V. 146. P. 777–783.
- [12] *Sawada T., Gohshi Y., Watanabe T., Furuga K.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 12. P. L938–L940.
- [13] *Uchitomi N., Mikami H., Toyoda N., Nii R.* // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. N 1. P. 30–32.
- [14] *Pensl G., Helbig R.* // Advances in Solid State Physics / Ed. by U. Rössler. Friedr. Vieweg & Sohn. Braunschweig. 1990. V. 30. P. 133–156.
- [15] *Geiler H.D., Karge H., Kluge A.* // Surface Science and Coatings Technology. 1994. V. 66. P. 265–270.
- [16] *Opsal J.* // Photoacoustic and Photothermal Phenomena. II. Springer Series in Optical Sciences. 1990. V. 62. P. 140–145.
- [17] *Wendler E., Heft A., Zammit U., Glaser E., Marinelli M., Wesch W.* // Nucl. Instr. & Methods. B. 1996. V. 116. P. 398–403.
- [18] *Вавилов В.С.* Действие излучений на полупроводники. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1963. 264 с.
- [19] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.
- [20] *Derst G., Wilberts C., Bhatia K.L., Kratschmer W., Kalbitzer S.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 18. P. 1722–1724.
- [21] *Shaffer P.T.B.* // Appl. Opt. 1971. V. 10. N 5. P. 1034–1036.
- [22] *Biersack J.P., Haggmark L.G.* // Nucl. Instrum. & Methods. 1980. V. 174. P. 257–269.